

Rancang Bangun Bed Storage untuk Thermal Energy Storage Berbasis Parafin dan Serbuk Besi

by Dwi Rahmalina

Submission date: 16-Sep-2021 01:15PM (UTC+0700)

Submission ID: 1649706985

File name: 163-174.pdf (2.81M)

Word count: 5513

Character count: 30650

Rancang Bangun *Bed Storage* untuk *Thermal Energy Storage* Berbasis Parafin dan Serbuk Besi

Agri¹¹wandi[#], Zulfikar Sjarief², Dwi Rahmalina², Reza Abdu Rahman¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Indonesia

²Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Pancasila, Indonesia

[#]agrisuwandi@univpancasila.ac.id

Abstrak

Thermal Energy Storage (TES) dimanfaatkan sebagai media penyimpanan panas untuk sistem *concentrated solar power*, *solar heater*, dan *thermal management system* pada kendaraan ringan. Tantangan dari aplikasi TES adalah desain dari *bed storage* yang digunakan harus memenuhi fungsi dasar yakni proses perpindahan panas saat *charging* dan *discharging* serta mampu menyimpan panas dengan kerugian panas yang sedikit. Pada penelitian ini, *bed storage* untuk TES didesain guna memenuhi fungsi sebagai media penyimpanan panas untuk aplikasi suhu rendah yakni 50-100°C. Material penyimpanan yang digunakan adalah campuran parafin dan serbuk besi dengan rasio massa 90:10. Penentuan fungsi menggunakan metode desain Pahl dan Beitz memberikan opsi penggunaan *coil tube* dengan material tembaga sebagai media perpindahan panas dan *bed storage* dengan bahan polimer termoplastik *polyacetal*. Hasil pengujian prototipe *bed storage* proses *charging* menunjukkan efisiensi perpindahan panas hingga 26,85% dengan koefisien perpindahan panas menyeluruh 21,422 W/m².°C. Proses *discharging* menunjukkan performa yang efektif dengan karakteristik perpindahan panas optimal berdasarkan koefisien perpindahan panas yang tinggi. Pada penggunaan bahan *polyacetal* dan nilai konduktivitas termal rendah yakni 0,231 W/m.K menyebabkan laju kerugian panas yang sangat lambat hanya 2,924 W. Prototipe yang dibuat mampu memaksimalkan proses perpindahan panas di sisi material *bed storage* untuk fungsi *charging* dan *discharging* dan mampu menekan laju kerugian panas pada fungsi *storing*.

Kata kunci: *Thermal Energy Storage* (TES), *bed storage*, desain Pahl dan Beitz, *polyacetal*, *coil tube*

Abstract

Thermal Energy Storage (TES) is used as a heat storage medium for concentrated solar power systems, solar heaters and thermal management systems in light vehicles. The challenge with the TES application is that the design of the bed storage used must fulfill the basic function, namely the heat transfer process when charging and discharging and being able to store heat with minimal heat loss. In this research, bed storage for TES is designed to fulfill its function as a heat storage medium for low temperature applications, namely 50–100°C. The storage material used is a mixture of paraffin and iron powder with a mass ratio of 90:10. Determination of function using the Pahl and Beitz design method, provides the option of using a coil tube with copper material as a heat transfer medium and bed storage with a polyacetal thermoplastic polymer material. The test results of the prototype bed storage charging process show a heat transfer efficiency of up to 26.85% with an overall heat transfer coefficient of 21.422 W/m².°C. The discharging process shows effective performance, optimal heat transfer characteristics based on the high heat transfer coefficient. The use of polyacetal material and the low thermal conductivity of 0.231 W/mK causes a very slow heat loss rate of only 2.924 W. The prototype made is able to maximize the heat transfer process on the side of the bed storage material for charging and discharging functions and is able to reduce the rate of heat loss in storing function.

Keywords: *Thermal Energy Storage* (TES), *bed storage*, Pahl and Beitz designs, *polyacetal*, *coil tube*

I. PENDAHULUAN

Sistem penyimpanan energi memberikan opsi yang luas untuk dikembangkan sebagai inovasi dan pengembangan teknologi pada aplikasi energi baru

terbarukan. Sistem penyimpanan energi termal dapat dikembangkan pada banyak aplikasi seperti *solar heater*, *concentrated solar power*, dan *thermal management system* pada kendaraan ringan [1]. Terdapat tiga kategori material penyimpanan panas

berdasarkan karakteristik material tersebut yakni *sensible*, *latent*, dan *thermochemical heat* [2]. Sistem kombinasi antara *sensible* dan *latent heat* (*hybrid storage*) terbukti memiliki peluang pengembangan terbaik untuk aplikasi suhu rendah (50-120°C) [3]. Tantangan terbesar untuk sistem penyimpanan panas *hybrid storage* adalah desain *bed storage* yang digunakan [4]. Parameter utama pengembangan desain *bed storage* dapat dilihat dari berbagai hal berikut [5]:

1. Cakupan temperatur kerja yang direncanakan;
2. Jenis material penyimpanan panas yang digunakan;
3. Karakteristik dan sifat material penyimpanan panas;
4. Banyaknya rencana *cycle* penggunaan material penyimpanan panas;
5. Karakteristik *charging* dan *discharging rate* yang direncanakan;
6. Rencana instrumentasi dan desain perakitan;
7. Efektifitas biaya terhadap penggunaan.

Aplikasi dari *bed storage* untuk temperatur rendah (50-100°C) untuk pemanas p2umas kendaraan bertenaga bensin memungkinkan limbah panas mesin disimpan pada suatu wadah (*thermal storage*) lalu digunakan kembali untuk memanaskan oli saat *idle warming up*. Tantangannya adalah optimasi bentuk *bed storage* dengan karakteristik perpindahan panas yang baik dan juga minim kerugian panas.

Optimasi desain *bed storage* penting untuk dilakukan karena dapat memaksimalkan fungsi penyimpanan energi panas. Dong, dkk. [6] menyatakan manajemen termal unit penyimpanan panas merupakan masalah penting yang harus dipecahkan untuk meminimalisir kerugian panas dan memaksimalkan proses penyerapan panas di material *storage* baik untuk proses *charging* maupun *discharging*. He, dkk. [7] fokus terhadap perbaikan desain *bed storage* untuk bentuk *encapsulated paraffin* dan mendukung pernyataan bahwa interaksi perpindahan panas merupakan aspek penting pada *bed storage*. Dari aspek material, Chandra [8] membahas tentang peningkatan kapasitas penyimpanan panas melalui penggunaan parafin dengan menambahkan pasir. Kombinasi material penyimpanan membuat bentuk *bed storage* yang direncanakan harus disesuaikan dengan karakteristik material penyimpanan tersebut. Kabeel, dkk. [9] memberikan contoh penyesuaian antara material penyimpanan kombinasi dengan desain *bed storage* untuk memaksimalkan proses pertukaran panas saat *charging* dan *discharging*. Mostafavi, dkk. [10] membuat gambaran dasar tentang pengaruh yang signifikan dari desain *bed storage* dan jenis material yang digunakan sehingga

fungsi penyimpanan dapat dibuat lebih baik dengan minim kerugian dan mampu meningkatkan rerata perpindahan panas untuk *charging* dan *discharging*.

Banyak variabel desain dari *bed storage* untuk unit penyimpanan panas menyebabkan belum ada acuan baku untuk *bed storage*. Proses rancang bangun *bed storage* pada penelitian ini mengacu kepada parameter desain *bed storage* dan juga jenis material penyimpanan yang digunakan. Poin penting lainnya yaitu material *storage* yang dipakai adalah parafin dan serbuk besi, tergolong sebagai material baru untuk material penyimpanan termal.

Masalah utama p2ses rancang bangun dari unit penyimpanan panas untuk *Thermal Energy Storage* (TES) berbasis parafin dan serbuk besi adalah *desain* alternatif material *bed storage* untuk rencana aplikasi pada temperatur rendah yakni 50-100°C dan karakteristik perpindahan panas prototipe *bed storage* saat proses *charging*, *storing*, dan *discharging*. Pemilihan sistem penyimpanan panas yang optimal dari *Phase Change Material* (PCM) dan geometri *bed storage* memainkan peran penting. Jenis PCM untuk unit penyimpanan panas tertentu didasarkan pada titik lelehnya sementara geometri sistem penyimpanan panas menggerakkan perpindahan panas [11].

Tujuan penelitian ini untuk menghasilkan desain dan prototipe *bed storage* yang dapat digunakan sebagai unit penyimpanan panas menggunakan material *storage* campuran parafin dan serbuk besi. Tujuan lainnya untuk mengoptimalkan performa dari unit penyimpanan panas menggunakan material *storage* campuran parafin dan serbuk besi pada sistem energi panas guna rencana aplikasi pada temperatur rendah. Hasil penelitian ini adalah unit penyimpanan panas yang dapat digunakan pada sistem aplikasi panas temperatur rendah dengan menggunakan parafin dan serbuk besi sebagai upaya penting untuk penghemat14 energi dan meningkatkan efektifitas dari sistem tersebut. Selain itu, hasil penelitian dapat dijadikan sebagai *benchmark* untuk rancang bangun *bed storage* TES pada temperatur rendah.

II. METODE PENELITIAN

A. Metode Perancangan Desain

Jenis *hybrid storage material* umumnya digunakan untuk kombinasi dari *sensible* dan *latent heat material*. Performa dari *hybrid storage material* mampu meningkatkan titik penguapan dan leleh parafin untuk aplikasi pada cakupan 50-130°C [3]. Pada sistem 2ES, *bed storage* dapat didefinisikan sebagai tempat terjadinya pertukaran dan penyimpanan panas dari material penyimpanan panas. Kalor yang diterima kemudian disimpan dan

digunakan oleh sistem di luar unit *bed storage* [12]. Alat Penukar Kalor (APK) tipe *regenerator* cocok untuk diterapkan pada aplikasi sistem penyimpanan panas karena fungsi dasar dari regenerator adalah sistem penyimpanan panas yang “diam” [13]. Persamaan matematis APK tipe regenerator rentang suhu operasi (T_{span}) seperti persamaan 1 [14], berikut:

$$\Delta T_{span} = T_h - T_c \quad (1)$$

dimana T_h adalah suhu masuk fluida, T_c adalah suhu keluar fluida.

Metode desain Pahl dan Beitz seperti pada Tabel 1 cocok untuk digunakan dalam pengembangan sistem teknis yang belum memiliki desain sempurna namun sudah ada beberapa referensi awal terkait desain tersebut [15], [16]. Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Wadah yang digunakan untuk menangani material pengubah fase dioperasikan dalam kondisi berbeda dan mengalami suhu variabel yang menyebabkan cepatnya korosi pada material wadah jika tidak dipilih dengan benar [11]. Perencanaan suatu komponen untuk temperatur rendah didasarkan atas kekuatan leleh sedangkan pada temperatur lebih tinggi perlu didasarkan atas kekuatan melar, karena pengaruh waktu pembebanan adalah besar [18] seperti ditunjukkan pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Kualitas desain diukur seberapa baik desain mencapai semua persyaratan produk. Kualitas desain dapat diukur dengan seberapa baik kinerja

produk dibandingkan dengan persyaratan produknya. Sasaran dari setiap program pengujian dan evaluasi harus untuk mengidentifikasi area untuk perbaikan desain, yang meningkatkan produktivitas dan keandalan dan mengurangi risiko teknis [19]. Untuk menguji penyimpanan panas, perlengkapan uji dirancang dan dibangun serta diwujudkan sesuai dengan spesifikasi dari standar EN 12977-3. Hal ini memungkinkan untuk melakukan semua tes yang ditentukan untuk karakterisasi penuh dari *bed storage* [20].

Survei dilakukan untuk mengetahui kebutuhan dari pengguna atau dalam hal ini masyarakat untuk memperkenalkan sekaligus mengadopsi konsep kerja dari *bed storage* (Gambar 2). Hasil atau proses kuesioner survei Google Formulir adalah daftar persyaratan. Dengan demikian, dokumen ini mewakili spesifikasi yang dapat digunakan untuk menilai keberhasilan proyek desain [17].

Tabel 1. Model proses desain Pahl dan Beitz [17]

No.	Tahapan dalam proses desain	Metode yang tepat
1.	Memperjelas tujuan	Pohon tujuan
2.	Menetapkan fungsi	Analisis fungsi
3.	Menetapkan persyaratan	Spesifikasi penampilan
4.	Menentukan karakteristik	Penerapan fungsi kualitas
5.	Menghasilkan alternatif	Bagan morfologi
6.	Mengevaluasi alternatif	Tujuan berbobot
7.	Memperbaiki detail	Rekayasa nilai

Tabel 2. Kekuatan kelelahan plastik [18]

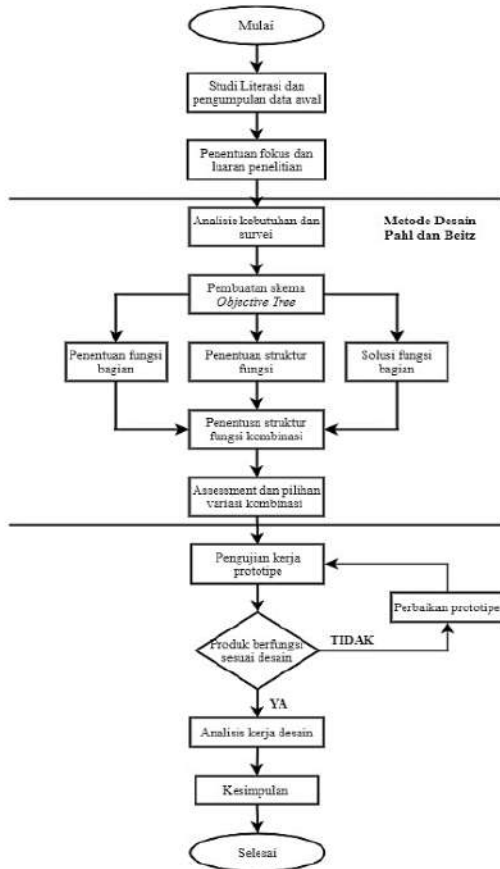
Polimer Termoplastik	Kelelahan $\text{kg/mm}^2 \times 10^7$	Kelelahan Perpanjangan α	Kelelahan Lentur β
Nilon	1,20	0,22	0,24
<i>Polyacetal</i>	2,74	0,37	0,25
PTFE (Teflon)	1,12	0,50	0,40

Tabel 3. Kekuatan tarik, tekan dan lentur bahan polimer [18]

Polimer Termoplastik	Kekuatan tarik kgf/mm^2	Perpanjangan (%)	Modulus elastik $\text{kgf/mm}^2 \times 10^3$	Kekuatan tekan kgf/mm^2	Kekuatan lentur kgf/mm^2
Nilon	7,1-8,4	25-320	1,0-2,6	4,6-8,5	5,6-11,2
<i>Polyacetal</i>	6,1-7	15-40	2,4-2,8	12,6	8,4-9,8
PTFE (Teflon)	1,4-3,1	200-400	0,4	1,19	-

Tabel 4. Karakteristik termal bahan plastik [18]

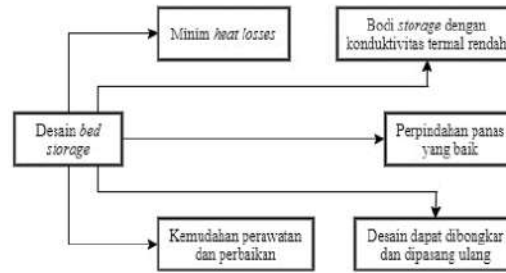
Polimer Termoplastik	Temperatur distorsi panas (°C)
Nilon	(-50) ~ 185
<i>Polyacetal</i>	(-50) ~ 170
PTFE (Teflon)	(-260) ~ 179



Gambar 1. Diagram alir penelitian



Gambar 2. Tampilan kuesioner survei



Gambar 3. Objective tree desain *bed storage*

Tabel 5. Daftar kebutuhan (D) dan harapan (W)

Indikator	Parameter
	Desain
W	Bentuk: silinder
W	Rakitan: mampu bongkar-pasang
W	Tekanan maksimal: 1 – 2 Bar
D	Panjang: 120 mm
D	Lebar: 70 mm
D	Diameter: 60 mm
	Gerak
D	Arah aliran: horizontal
D	Siklus: tertutup
D	Laju aliran: tunak
	Energi
D	Masuk dan keluar: termal
D	Simpanan energi: termal
W	Efisiensi perpindahan: 20% - 30%
D	Kerugian termal: minim
D	Kerugian mekanik: minim
	Material
D	Wadah: Tahan panas sampai 170 °C
D	Wadah: konduktivitas termal rendah
D	Tubing: konduktivitas termal tinggi
	Standar Kualitas
D	Acuan material: ASTM
D	Acuan pengukuran: NIST

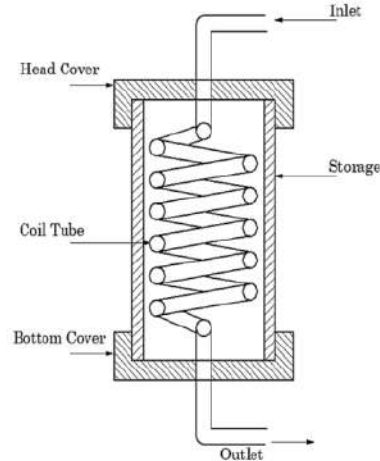
Objective tree merupakan pola hubungan yang menerangkan kebutuhan pelanggan dan kajian pustaka yang dilakukan (Gambar 3). Kebutuhan ini yang menjadi rujukan dalam mengembangkan spesifikasi detail dari desain *bed storage*.

Mengacu kepada banyak referensi dan mempertimbangkan daftar kebutuhan dan harapan pada Tabel 5, maka desain yang dikembangkan dari unit *bed storage* harus mampu memenuhi fungsi keseluruhan tersebut. Rencana desain dari *bed storage* ada pada Gambar 4.

Gambar 5 menunjukkan fungsi bagian *inlet* berperan sebagai saluran masuk untuk fluida kerja yang digunakan, material *piping* dan *tubing system* dijadikan sebagai material yang cocok untuk digunakan pada bagian ini. *Head cover* berfungsi sebagai penutup atas bagian *storage* dan untuk tempat kedudukan *inlet tube*. Fungsi *bottom cover*

adalah sebagai penutup bawah bagian *storage* dan untuk tempat kedudukan *outlet tube*. Bodi *storage* merupakan fungsi terpenting dari unit *bed storage*, sebagai tempat penyimpanan material kerja yang digunakan untuk menyimpan panas yang ditransfer dari luar, juga harus mampu meminimalisir kerugian panas akibat adanya perbedaan suhu dengan lingkungan sekitar. *Coil tube* yang berperan sebagai media tempat fluida kerja bersirkulasi, memindahkan panas dari dan ke fluida kerja untuk material penyimpanan. Karakteristik terpenting dari bagian ini adalah mampu berperan sebagai konduktor panas yang baik.

Metode penentuan dibuat ke dalam sebuah tabel matriks yang membantu untuk menentukan pilihan-pilihan kombinasi berdasarkan kemungkinan yang ada pada tiap bagian. Fungsi pemilihan matriks dapat menghasilkan lebih dari 1 kombinasi fungsi untuk penilaian berikutnya (Tabel 6).



Gambar 4. Rencana desain *bed storage*



Gambar 5. Fungsi keseluruhan bagian

Tabel 6. Alternatif desain *bed storage*

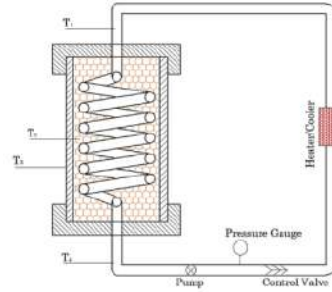
Kode	Aliran	Bagian	Kriteria	Indikator	1	2	3	4	5
a	Sinyal	<i>Inlet tube</i>	<ul style="list-style-type: none"> Memungkinkan untuk penyambungan Koefisien gesekan dalam rendah Minim <i>turbulence</i> 	Saluran masuk fluida kerja tanpa membuat perubahan aliran menjadi turbulane					
b	Sinyal	<i>Outlet tube</i>	<ul style="list-style-type: none"> Memungkinkan untuk penyambungan Koefisien gesekan dalam rendah Mampu menahan tekanan lokal 	Saluran masuk fluida kerja tanpa membuat tekanan dan suhu turun					
c	Sinyal	<i>Coil tube</i>	<ul style="list-style-type: none"> Koefisien gesekan dalam rendah Memiliki daya hantar panas optimal Tahan suhu tinggi 	Memaksimalkan proses perpindahan panas dari dan ke material kerja					
d	Matenal	<i>Head cover</i>	<ul style="list-style-type: none"> Mudah dibentuk Tidak berdeformasi terhadap waktu 	Penutup <i>storage</i> pada bagian atas, mampu buka pasang					
e	Material	<i>Bottom cover</i>	<ul style="list-style-type: none"> Mudah dibentuk Tahan terhadap tekanan lokal 	Penuutupbawah permanen, dapa menahanbeban material kerja					
f	Material	<i>Storage</i>	<ul style="list-style-type: none"> Stabilitas kimia baik Tahan korosi Konduktivitas termal rendah Mampu kerja pada hingga suhu 170 °C 	Tempat penyimpanan material kerja dengan karakteristik minim heat losses dan tidak korosi					

Tabel 7. Kombinasi bagian komponen *bed storage*

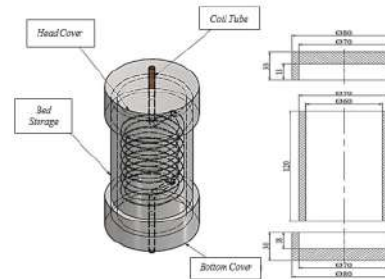
MAGISTER TEKNIK MESIN UNIVERSITAS PANCASILA		Pemilihan variasi bagian pada <i>bed storage</i>						
VARIASI DESAIN BAGIAN	Criteria:		Keputusan: (+) Bagian sesuai (-) Bagian dieliminasi (?) Lakukan pencarian informasi (!) Lengkapi kekurangan					
	Utilization							
	Demanded							
	Cost							
Proper information		Desirable						
Sajety								
	A	B	C	D	E	F	DESKRIPSI	Nilai
a ₁	+	-	+	+	-	+		-
a ₂	+	+	-	+	+	+		+
4	+	+	+	+	+	+	Aman dan sesuai	+
a ₄	-	-	-	-	-	-		-
a ₅	+	+	+	+	+	+		+
b ₁	+	-	+	+	-	+		-
b ₂	+	+	+	+	+	+	Aman dan sesuai	+
b ₃	+	+	+	+	+	+		+
b ₄	-	-	-	-	-	-		-
b ₅	+	+	+	+	+	+		+
c ₁	+	-	+	+	-	+		-
c ₂	+	+	+	+	+	+		+
c ₃	+	+	+	+	+	+	Ukuran dapat disesuaikan	+
c ₄	-	-	-	-	-	-		-
c ₅	+	+	+	+	+	+		+
d ₁	-	+	+	+	+	+		-
d ₂	-	+	+	+	+	+		-
d ₃	+	+	+	+	+	+		+
d ₄	+	+	+	+	+	+		+
d ₅	+	+	+	+	+	+	Mudah dibentuk	+
e ₁	-	+	+	+	+	+		-
e ₂	-	+	+	+	+	+		-
e ₃	+	+	+	+	+	+		+
e ₄	+	+	+	+	+	+		+
e ₅	+	+	+	+	+	+	Stabilitas kimia baik	+
f ₁	-	+	+	+	+	+		-
f ₂	-	+	+	+	+	+		-
f ₃	+	+	+	+	+	+		+
f ₄	+	+	+	+	+	+		+
f ₅	+	+	+	+	+	+	Kekuatan mekanis terpenihi	+

Proses pemilihan dilakukan melalui analisis butir fungsi dan kesesuaian terhadap kondisi pendukung lainnya, dengan pemberian indikator positif (+) untuk bagian yang memiliki kesesuaian terhadap variabel desain dan tanda negatif (-) untuk sebaliknya (Tabel 7).

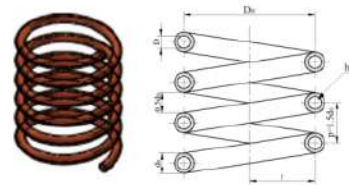
Pilihan tersebut selanjutnya dihubungkan menggunakan garis hubung sebagai kaitan untuk kesesuaian terhadap kombinasi yang mungkin dilakukan pada tiap pilihan. Tabel 8 merupakan tabel pemilihan bagian komponen *bed storage* berdasarkan indikator kesesuaian yang diturunkan dari Tabel 7.



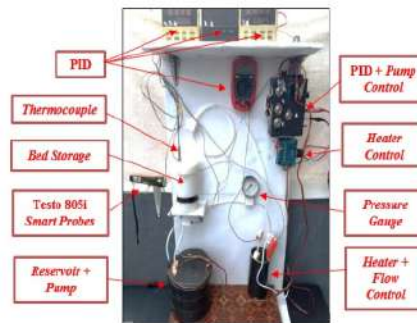
Gambar 6. Titik pengukuran uji prototipe



Gambar 7. Desain dan ukuran *bed storage*



Gambar 8. Desain dan ukuran *coil tube*



Gambar 9. Perlengkapan uji prototipe *bed storage*

Terdapat lima (5) pilihan alternatif material *bed storage* berdasarkan Tabel 8 yang dijadikan sebagai referensi dalam pemilihan komponen untuk tiap bagian yang dibuat. Tiap alternatif yang dipilih harus ditentukan nilai berdasarkan kriteria penting yang dijadikan sebagai aspek pertimbangan dalam pemilihan. Kriteria tersebut harus disesuaikan dengan parameter desain untuk mencapai hasil yang

maksimal berdasarkan pemilihan tiap bagian pada variasi Tabel 9.

Asessment kriteria pilihan untuk tiap variasi pada Tabel 9 menghasilkan nilai *Overall Weighted Value* (OWV) untuk tiap-tiap variasi. Nilai OWV merupakan nilai acuan dalam pemilihan variasi yang dilakukan untuk tiap bagian. Berdasarkan hasil penilaian tersebut, nilai OWV tertinggi ada pada kombinasi pilihan 3, karena polimer termoplastik *Polyacetal* sesuai dengan rencana komponen untuk temperatur rendah, unggul ditinjau dari ketahanan leleh (Tabel 2), ketahanan melar dan ketahanan abrasi (Tabel 3). Bahan ini juga lebih ringan daripada logam, unggul dalam ketahanan air, pelumasan diri dan menguntungkan dalam kemampuan produksi.

B. Pengujian Prototipe *Bed Storage*

Desain model pengujian dirancang seperti pada Gambar 6 dengan desain ukuran *bed storage* ditampilkan pada Gambar 7, serta desain dan ukuran *coil tube* pada Gambar 8. Adapun realisasi perlengkapan uji *bed storage* ditunjukkan pada Gambar 9. Metode uji kinerja untuk penyimpanan pemanas dirancang sesuai spesifikasi standar EN 12977-3 [21], [22].

Spesifikasi alat pengujian dan komponen yang digunakan terangkum pada Tabel 10. Pengujian prototipe *bed storage* yang dilakukan melalui metode eksperimen yakni:

1. Pengujian *charging*, yang menandakan panas masuk ke *bed storage*.
2. Pengujian *storing statis* dan dinamis, pengujian pelepasan panas dari *bed storage* tanpa diberi beban pendingin (statis) dan dengan diberi beban pendinginan air (dinamis).
3. Pengujian *discharging*, yang menandakan panas dilepaskan dari *bed storage*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian *charging* dengan indikator suhu material *storage* dan suhu bodi *storage* ditunjukkan pada Gambar 10. Grafik kenaikan suhu pada material kerja dan pada bodi *storage* tidak bersifat linier. Kenaikan suhu pada bodi *storage* jauh lebih lambat dibandingkan dengan kenaikan suhu pada material. Hal ini karena dipengaruhi oleh konduktivitas termal dari bodi *storage* dan juga material *storage*.

Tabel 8. Solusi desain alternatif material *bed storage*

Kode	Aliran	Bagian	Kriteria	Indikator	1	2	3	4	5
a	Sinyal	<i>Inlet tube</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Memungkinkan untuk penyambungan • Koefisien gesekan dalam rendah • Minim <i>turbulence</i> 	Saluran masuk fluida kerja tanpa membuat perubahan aliran menjadi turbulane	SS 316	AL 6061	PTFE	Nylon	POM
b	Sinyal	<i>Outlet tube</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Memungkinkan untuk penyambungan • Koefisien gesekan dalam rendah • Mampu menahan tekanan lokal 	Saluran masuk fluida kerja tanpa membuat tekanan dan suhu turun	SS 316	AL 6061	PTFE	Nylon	POM
c	Sinyal	<i>Coil tube</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Koefisien gesekan dalam rendah • Memiliki daya hantar panas optimal • Tahan suhu tinggi 	Memaksimalkan proses perpindahan panas dari dan ke material kerja	C10200	C10300	C10800	C12000	C12200
d	Material	<i>Head cover</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mudah dibentuk • Tidak berdeformasi terhadap waktu 	Penutup <i>storage</i> pada bagian atas, mampu buka pasang	SS 316	AL 6061	PTFE	Nylon	POM
e	Material	<i>Bottom cover</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mudah dibentuk • Tahan terhadap tekanan lokal 	Penutup bawah permanen, dapat menahan beban material kerja	SS 316	AL 6061	PTFE	Nylon	POM
f	Material	<i>Storage</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilitas kimia baik • Tahan korosi • Konduktivitas termal rendah • Mampu kerja pada hingga suhu 170 °C 	Tempat penyimpanan material kerja dengan karakteristik minim heat losses dan tidak korosi	SS 316	AL 6061	PTFE	Nylon	POM

Keterangan Kombinasi:

- Kombinasi Desain 1 (- - - - -) : a₁ - b₁ - c₁ - d₃ - e₃ - f₃
- Kombinasi Desain 2 (- · - · -) : a₂ - b₂ - c₂ - d₁ - e₁ - f₁
- Kombinasi Desain 3 (- - - - -) : a₃ - b₃ - c₃ - d₅ - e₅ - f₅

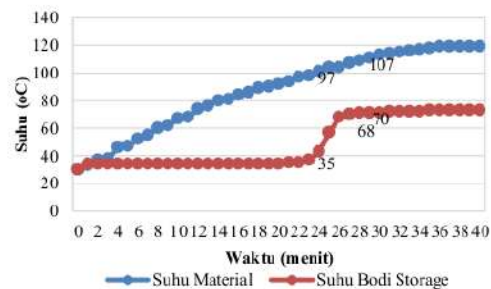
- Kombinasi Desain 4 (- - - - -) : a₄ - b₃ - c₄ - d₂ - e₂ - f₂
- Kombinasi Desain 5 (- · - · -) : a₅ - b₅ - c₅ - d₄ - e₄ - f₄

Tabel 9. Asement kriteria pilihan

No	Kriteria	W _i	Parameter	Varian 1		Varian 2		Varian 3		Varian 4		Varian 5	
				V _i	W _i ·V _i	V _i	W _i ·V _i	V _i	V _i	W _i ·V _i	V _i	W _i ·V _i	V _i
1	Aksesibilitas pengujian tes	0,1	Mudah diuji	7	0,7	7	0,7	8	0,8	7	0,7	8	0,8
2	Fungsi perpindahan panas	0,15	Laju perpindahan panas baik	7	1,05	6	0,9	7	1,05	7	1,05	7	1,05
3	Proses <i>assembly</i> tidak memerlukan banyak peralatan	0,06	Durasi proses perakitan	6	0,36	6	0,36	8	0,48	6	0,36	7	0,42
4	Banyaknya komponen	0,1	Total komponen	6	0,6	6	0,6	7	0,7	6	0,6	7	0,7
5	Ketersediaan komponen	0,08	Komponen umum di pasaran	6	0,48	8	0,64	8	0,64	7	0,56	8	0,64
6	Minimalisir <i>turbulence</i> pada fluida	0,08	Koefisien gesekan dalam rendah	7	0,64	6	0,48	8	0,64	7	0,56	7	0,56
7	Fungsi menahan panas	0,14	Fungsi isolator yang baik	7	0,98	6	0,84	7	0,98	8	1,12	7	0,98
8	Kekuatan mekanis material	0,1	Tahan tekanan dari dalam	7	0,7	7	0,7	8	0,8	7	0,7	7	0,7
9	Kekuatan sambungan <i>tubing</i>	0,09	Sambungan permanen	7	0,63	6	0,54	7	0,63	6	0,54	7	0,63
10	Bentuk dan ergonomis	0,1	Kompak	7	0,7	6	0,6	8	0,8	7	0,7	8	0,8
TOTAL				6,84	6,36	7,52	6,89	7,28					

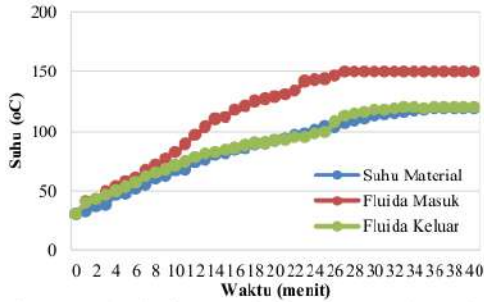
Tabel 10. Detail perlengkapan uji

Komponen	Spesifikasi
Mini Oil Pump	Turbine Impeller Material: Aluminium alloy Penggerak: DC 12 V 1,5 Amp Flow: 12 L/menit Tekanan maksimal 3 bar
Thermocouple	Type: Type-K Range ukur: -50 °C – 650 °C Akurasi: + 1 °C
PID	PXR4 – Fuji
Heater	Water bath heater Heating rate: 5°C / min Maximum temp: 220°C Contact heater
Testo 805i Smart Probes	Measuring range : -30°C to 250°C Resolution : 0.1°C Measurement rate : 2/sec Laser marking : Diffraction lens as laser marking The testo Smart Probes App (via Bluetooth)
Fluida kerja	Smooth Fluida 05 (SF-05) Specific Gravinetry: 0.800 – 0.835 (60°F) Viscosity: 2.5 – 3.5 mm ² /s

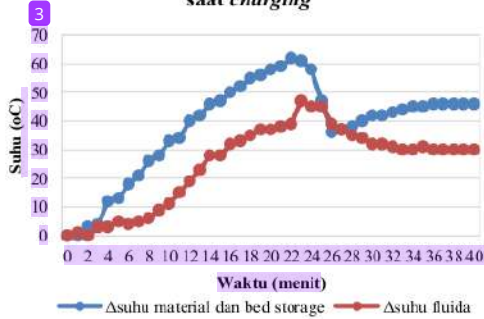


Gambar 10. Grafik suhu material storage dan bodi storage saat charging

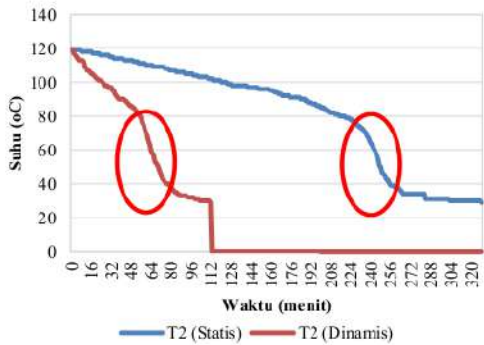
Antara menit 22–26 terjadi kenaikan suhu yang signifikan pada bodi *storage*, kondisi ini terjadi akibat proses perpindahan panas pada bodi *storage* yang sudah merata dan sebagian panas dari material *storage* sudah terserap ke seluruh bagian bodi *storage*. Fenomena ini dapat dibuktikan dimana kenaikan pada material *storage* tidak signifikan pada rentang waktu yang sama dan kenaikan yang signifikan terjadi pada bodi *storage*. Kenaikan suhu yang drastis pada bodi *storage* dianggap sebagai titik kritis dan setelah melewati titik ini kenaikan suhu kembali menjadi landai sedangkan pada material *storage* kenaikan suhu terus berlanjut.



Gambar 11. Grafik suhu fluida dan material kerja saat charging

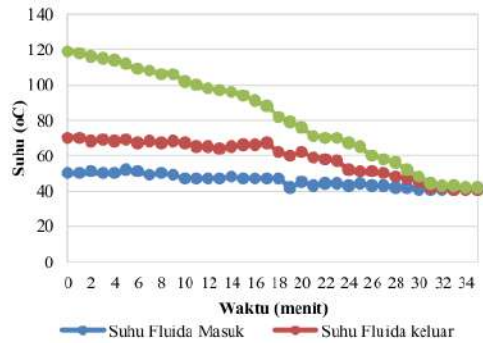


Gambar 12. Grafik perbedaan suhu fluida dan material kerja saat charging



Gambar 13. Grafik suhu fluida dan material kerja saat storing

Gambar 11 menyajikan grafik hubungan antara fluida masuk dan keluar serta suhu material. Perbedaan suhu fluida masuk dan keluar pada menit 1–25 cukup tinggi yang disebabkan oleh sistem menerima panas secara cepat. Selanjutnya, kenaikan suhu fluida keluar pada menit 26–40 tidak menunjukkan kenaikan signifikan karena nilai panas pada material *storage* dan *bed storage* sudah tinggi. Suhu fluida masuk dan keluar serta suhu material *storage* sendiri menjadi landai pada menit akhir karena perpindahan panas yang terjadi kurang signifikan akibat kenaikan nilai kalor pada material *storage*.



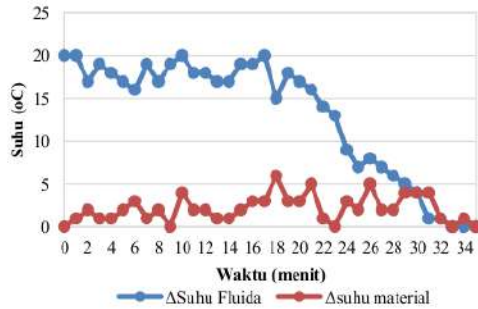
Gambar 14. Grafik suhu fluida dan material kerja saat discharging

Gambar 12 memperlihatkan grafik dengan jelas bahwa bentuk grafik antara perbedaan suhu fluida kerja (masuk dan keluar) dengan perbedaan suhu bodi *storage* dan material kerja cenderung identik. Kedua grafik sama-sama mengalami kenaikan yang signifikan sampai dengan menit 22. Lalu nilai perbedaan antara bodi *storage* dan material turun secara drastis karena suhu bodi *storage* mengalami kenaikan signifikan (titik kritis Gambar 10) dan berangsur naik kembali setelah melewati titik kritis. Perbedaan suhu fluida kerja dan masuk tidak signifikan karena panas pada sistem sudah mengalami kejenuhan yang menyebabkan nilai perpindahan panas menurun.

Gambar 13 memperlihatkan penurunan suhu material *storage* pada pengujian statis dan dinamis. Terlihat bahwa terjadi fenomena penurunan suhu yang drastis pada rentang suhu 80–40°C pada kedua pengujian. Penurunan yang cepat disebabkan kondisi kritis dari bodi *storage* yang digunakan sebagaimana yang ditunjukkan pada saat charging (Gambar). Informasi penting yang bisa diperoleh adalah dengan sifat termal konduktivitas rendah dari material bodi *storage* yang digunakan, maka penurunan suhu yang terjadi cukup lama melalui konveksi natural.

Saat pengujian *discharging* (Gambar 14) terlihat penurunan suhu pada material terjadi secara cepat tanpa menyebabkan kenaikan yang signifikan pada fluida kerja. Saat suhu material semakin menurun, maka perbedaan antara suhu fluida masuk dan keluar menjadi semakin kecil. Sebagai perbandingan, pengujian *discharging* pada suhu fluida masuk berbeda dilakukan untuk melihat pengaruh dari suhu masukan fluida terhadap perbedaan suhu keluaran fluida.

Agri Suwandi, dkk: Rancang Bangun *Bed Storage* untuk ...



Gambar 15. Grafik perbedaan suhu fluida dan material kerja saat *discharging*

Perbedaan suhu maksimal saat *discharging* (Gambar 15) antara fluida masuk dan keluar adalah 20°C sedangkan perbedaan suhu maksimal pada material uji 6°C. Karakteristik perbedaan suhu fluida dan suhu material berlangsung dengan efektif pada 18 menit pertama yang merupakan kondisi dimana kapasitas panas yang tersimpan pada material masih tinggi, seiring dengan penurunan kapasitas termal pada material *storage*, maka perbedaan suhu masuk dan keluar menjadi menurun secara drastis dan mencapai titik kesetimbangan dalam waktu 35 menit dengan suhu setimbang pada 41°C.

Kapasitas panas dari material *storage* dapat ditentukan berdasarkan persamaan 2, berikut [23]:

$$q_{total} = q_{sensible} + q_{laten} \quad (2)$$

dimana $q_{sensible}$ dari besarnya panas yang mampu diserap material *sensible* (serbuk besi) diperoleh berdasarkan persamaan 3 [23].

$$q_{sensible} = m_{besi} \cdot Cp_{besi} \cdot \Delta T_{besi} \quad (3)$$

Dengan massa besi 27 gram dan perbedaan suhu total 89°C, maka diperoleh

$$\begin{aligned} q_{sensible} &= 27 \text{ g} \cdot 0,444 \frac{\text{J}}{\text{g}} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 89 \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 1,066 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{laten} &= 243 \text{ g} \cdot 2,62 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 89 \text{ }^\circ\text{C} \\ &= 56,663 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Maka, nilai total panas pada sistem adalah:

$$\begin{aligned} q_{total} &= 1,066 \text{ kJ} + 56,663 \text{ kJ} \\ &= 57,729 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Efisiensi *charging* pada sistem *bed storage* merupakan nilai perbandingan antara besarnya panas yang tersedia saat proses *charging* dan panas yang dapat diserap oleh sistem dan dapat dihitung dengan persamaan 4, berikut [24]:

$$\eta_{charging} = \frac{q_{stored}}{q_{available}} \quad (4)$$



Gambar 16. Fungsi efisiensi *charging* terhadap waktu

Tabel 11. Nilai efisiensi *charging*

Waktu (menit)	Fluida masuk T_1 ($^\circ\text{C}$)	Fluida keluar T_2 ($^\circ\text{C}$)	Suhu lingkungan T_s ($^\circ\text{C}$)	$\eta_{charging}$ (%)
1	41	40	30	9%
2	43	42	30	6%
3	49	46	30	16%
4	53	50	30	13%
5	58	53	30	18%
6	61	57	30	13%
7	67	62	30	14%
8	71	65	30	15%
9	77	68	30	19%
10	82	71	30	21%
11	89	74	30	25%
12	97	78	30	28%
13	104	81	30	31%
14	110	82	30	35%
15	112	84	30	34%
16	118	86	30	36%
17	121	88	30	36%
18	125	90	30	37%
19	127	90	30	38%
20	129	92	30	37%
21	131	93	30	38%
22	134	95	30	38%
23	142	95	30	42%
24	143	98	30	40%
25	144	99	30	39%
26	147	108	30	33%
27	150	113	30	31%
28	150	115	30	29%
29	150	116	30	28%
30	150	118	30	27%
31	150	118	30	27%
32	150	119	30	26%
33	150	120	30	25%
34	150	120	30	25%
35	150	119	30	26%
36	150	120	30	25%
37	150	120	30	25%
38	150	120	30	25%
39	150	120	30	25%
40	150	120	30	25%
Rerata efisiensi <i>charging</i>				26,85 %

Besarnya panas yang diserap dan tersedia bergantung kepada perbedaan suhu, sehingga bentuk akhir seperti pada persamaan 5 berikut [24]:

$$\eta_{charging} = \frac{\Delta T_{fluida \text{ charging}}}{\Delta T_{fluida \text{ ideal}}} \quad (5)$$

Nilai koefisien perpindahan panas menyeluruh dapat diperoleh melalui persamaan 6, berikut [24]:

$$q = UA\Delta T_{overall} \quad (6)$$

Luas area perpindahan panas merupakan luas *coil* pada yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 7 [24].

$$\begin{aligned} A_{coil} &= l_{coil} \cdot \phi_{luarcoil} \cdot \pi \\ &= 1,772 \cdot 0,0049 \cdot 3,14 \\ &= 0,0273 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Nilai $\Delta T_{overall}$ adalah 47°C data uji *discharging* sehingga nilai koefisien perpindahan panas menyeluruh adalah:

$$\begin{aligned} U &= \frac{q}{A\Delta T_{overall}} \\ &= \frac{(57.729 \text{ J}) / (2.100 \text{ s})}{0,0273 \text{ m}^2 \cdot 47 \text{ }^\circ\text{C}} \\ &= 21,422 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Data pengujian per-menit memberikan keuntungan untuk nilai *charging* tiap satuan waktu dapat diperoleh dan menunjukkan bahwa nilai *charging* secara umum bervariasi terhadap waktu dengan rerata 26,85%. Data pada Tabel 11 diubah ke dalam bentuk grafik fungsi efisiensi *charging* terhadap waktu. Dari Gambar 16 terlihat bahwa efisiensi di atas 30% berada pada rentang waktu dari menit ke 14 sampai 27. Pada rentang waktu tersebut, perbedaan suhu fluida masuk dan keluar cukup signifikan dan menandakan bahwa penyerapan panas menjadi lebih ideal pada rentang waktu ini.

IV. KESIMPULAN

Proses rancang bangun *bed storage* menggunakan metode desain Pahl dan Beitz memberikan solusi penggunaan polimer termoplastik *polyacetal* sebagai material bodi *storage* membuat proses penyimpanan panas menjadi lebih lama karena nilai konduktivitas termal yang rendah. Penggunaan polimer termoplastik *polyacetal* sesuai dengan rencana komponen untuk temperatur rendah, unggul ditinjau dari ketahanan lelah, ketahanan melar dan ketahanan abrasi. Bahan ini juga lebih ringan daripada logam, unggul dalam ketahanan air, pelumasan diri dan menguntungkan dalam kemampuan produksi sehingga dapat digunakan pada aplikasi pemanasan pelumas kendaraan dan dapat meredam getaran yang timbul. Efisiensi perpindahan panas menyeluruh adalah 26,85% dengan fungsi efisiensi tinggi (> 30%) berada pada menit ke-14 sampai dengan 27, sehingga rencana

aplikasi bisa diterapkan. Proses perpindahan menggunakan *coil tube* tembaga memberikan keuntungan untuk memaksimalkan koefisien perpindahan panas menyeluruh sebesar 21,422 W/m²·°C. Penelitian lanjutan *bed storage* untuk *thermal management system* adalah pengujian pada lingkungan yang sebenarnya, yaitu pada kendaraan ringan serta analisis kelayakan ekonomisnya.

REFERENSI

- [1] H. Lund, "Energy storage and smart energy systems," *Int. J. Sustain. Energy Plan. Manag.*, vol. 11, pp. 3–14, 2016.
- [2] S. Narayanan, "Thermal battery for portable climate control," *Appl. Energy*, vol. 149, pp. 104–116, 2015.
- [3] R. Nivaskarthick, "Analysis of Thermal Energy Storage system using Paraffin Wax as Phase Change Material," *Int. Conf. Innov. Eng. Technol.*, no. July, pp. 38–47, 2016.
- [4] IEA ETSAP and IRENA, "Thermal Energy Storage-Technology Brief," no. January. 2013.
- [5] A. Gautam and R. P. Saini, "A review on technical, applications and economic aspect of packed bed solar thermal energy storage system," *J. Energy Storage*, vol. 27, no. August 2019, p. 101046, 2020.
- [6] D. Dong, "Thermal optimisation of metal hydride reactors for thermal energy storage applications," *Sustain. Energy Fuels*, vol. 1, no. 8, pp. 1820–1829, 2017.
- [7] Z. He, X. Wang, X. Du, M. Amjad, L. Yang, and C. Xu, "Experiments on comparative performance of water thermocline storage tank with and without encapsulated paraffin wax packed bed," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 147, pp. 188–197, 2019.
- [8] D. C. Adhitya, "Penambahan Pasir Vulkanik untuk Meningkatkan Sifat Termal Composite PCM sebagai Thermal Energy Storage," 2020.
- [9] A. E. Kabcel, M. Abdelgaied, and A. Eisa, "Effect of graphite mass concentrations in a mixture of graphite nanoparticles and paraffin wax as hybrid storage materials on performances of solar still," *Renew. Energy*, vol. 132, pp. 119–128, 2019.
- [10] S. Zhu, G. Yu, X. Li, W. Dai, and E. Luo, "Parametric study of a free-piston Stirling cryocooler capable of providing 350 W cooling power at 80 K," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 174, p. 115101, 2020.
- [11] A. Dinker, M. Agarwal, and G. D. Agarwal, "Heat storage materials, geometry and applications: A review," *Journal of the Energy Institute*. 2017.
- [12] S. Soprani, "Design and testing of a horizontal rock bed for high temperature thermal energy storage," *Appl. Energy*, vol. 251, no. November 2018, p. 113345, 2019.
- [13] H. Martin, *Heat Exchangers*. 1992.
- [14] S. Qian, J. Yu, and G. Yan, "A review of regenerative heat exchange methods for various

- cooling technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. October 2016, pp. 535–550, 2017.
- [15] T. Richter, J. H. Witt, J. W. Gesk, and A. Albers, "Identification of requirements of methods and processes for modeling objectives in predevelopment projects," *Procedia CIRP*, vol. 84, pp. 419–427, 2019.
- [16] J. Gausemeier and S. Moehring, "VDI 2206- A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 35, no. 2, pp. 785–790, 2002.
- [17] G. P. and W. Beitz, *Engineering Design A Systematic Approach*, 3rd ed. 2007.
- [18] T. Surdia and M. S. Met, "Pengetahuan Bahan Teknik," *Pt Pradnya Paramita*, p. 372, 1999.
- [19] J. W. J. M. S. Priest, *Product Development and Design for Manufacturing*, Second Edi. New York - BASEL: MARCEL DEKKER, INC, 2001.
- [20] A. Frazzica, M. Manzan, A. Sapienza, A. Freni, G. Toniato, and G. Restuccia, "Experimental testing of a hybrid sensible-latent heat storage system for domestic hot water applications," *Appl. Energy*, vol. 183, pp. 1157–1167, 2016.
- [21] S. Fischer and H. Drück, "Standards and certification schemes for solar thermal collectors, stores and systems - An overview about the latest developments," *Energy Procedia*, vol. 57, no. December, pp. 2867–2871, 2014.
- [22] D. I. N. En and D. I. N. En, "EN 12977-3:2018," no. July, 2018.
- [23] M. Liu, S. Riahi, R. Jacob, M. Belusko, and F. Bruno, "Design of sensible and latent heat thermal energy storage systems for concentrated solar power plants: Thermal performance analysis," *Renew. Energy*, 2020.
- [24] D. S. Patil, R. R. Arakrith, and P. V. Walke, "Thermoelectric materials and heat exchangers for power generation – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018.

Rancang Bangun Bed Storage untuk Thermal Energy Storage Berbasis Parafin dan Serbuk Besi

ORIGINALITY REPORT

7%

SIMILARITY INDEX

6%

INTERNET SOURCES

1%

PUBLICATIONS

1%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	www.scribd.com Internet Source	1%
2	docs.google.com Internet Source	1%
3	pt.scribd.com Internet Source	1%
4	Felipe Juscele. ">bi/i< de origem aviária>/b<", Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), 2021 Publication	1%
5	eprints.umm.ac.id Internet Source	1%
6	es.scribd.com Internet Source	<1%
7	Submitted to Politeknik Negeri Bandung Student Paper	<1%
8	docobook.com Internet Source	

<1 %

9

www.sciencegate.app

Internet Source

<1 %

10

ocw.unizar.es

Internet Source

<1 %

11

Submitted to Udayana University

Student Paper

<1 %

12

A.E. Kabeel, Mohamed Abdelgaied, Amr Eisa. "Effect of graphite mass concentrations in a mixture of graphite nanoparticles and paraffin wax as hybrid storage materials on performances of solar still", Renewable Energy, 2019

Publication

<1 %

13

Bashria A.A. Yousef, Khaled Elsaid, Mohammad Ali Abdelkareem. "Potential of nanoparticles in solar thermal energy storage", Thermal Science and Engineering Progress, 2021

Publication

<1 %

14

journal.institutpendidikan.ac.id

Internet Source

<1 %

15

www.mdpi.com

Internet Source

<1 %

www.researchgate.net

16

Internet Source

<1 %

17

Lillian Holmer, Jan Stenlid. "The importance of inoculum size for the competitive ability of wood decomposing fungi", FEMS Microbiology Ecology, 1993

Publication

<1 %

Exclude quotes Off

Exclude matches Off

Exclude bibliography On