

**INVESTIGASI EKSPERIMENTAL PENYIMPANAN ENERGI
TERMAL PEMANAS AIR TENAGA SURYA
THERMOSYPHON YANG BERISI PCM: PROSES *CHARGING*
DAN *DISCHARGING* KONTINYU**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Program
Studi S-1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah
Yogyakarta**



Disusun Oleh:

ABDI GHOFAR

20130130183

**PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA
YOGYAKARTA**

2017

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi / tugas akhir berjudul “**Investigasi Eksperimental Penyimpanan Energi Termal Pemanas Air Tenaga Surya *Thermosyphon* yang Berisi PCM: Proses *Charging* dan *Discharging* kontinyu**” ini adalah asli hasil karya saya dan tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di Perguruan Tinggi dan sepengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau dipublikasikan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis disebutkan sumbernya dalam naskah dan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 26 Agustus 2017

Abdi Ghofar

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

Allah Swt & Rasulullah Saw

Yallah Engkaulah yang telah memberikan segalanya sehingga dapat menyelesaikan urusan-urusan semua ini.

Bapak dan Mami

Saya ucapkan terima kasih yang telah mendidik dan berjuang memberikan nasihat walaupun terkadang saya suka mengeluh.

Bapak Muhammad Nadjib, S.T., M.Eng.

Yang selalu mendidik dengan sabar, selalu mengingatkan agar betul-betul teliti dalam mengerjakan skripsi dan selalu memotivasi dengan kata

“ Self Correction” terima kasih Bapak.

Rekan-rekan Teknik Mesin 2013:

Gantosantosa .A, Lukman. H, Eko. S, Erjati. P, Imam. R, Hima dan Sigit serta yang lain tidak dapat saya sebut semua .

Sahabat SMA :

Rega Wibiyakto dan A. Mustaqim yang selalu memberikan motivasi kekinian .

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iv
INTISARI	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar belakang	1
1.2. Perumusan masalah.....	3
1.3. Batasan masalah	3
1.4. Tujuan penelitian.....	3
1.5. Manfaat penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	
2.1. Tinjauan Pustaka	
2.1.1. Penggunaan PCM pada PATS sistem <i>thermosyphon</i>	5
2.1.2. Penggunaan <i>paraffin</i> pada PATS sistem <i>thermosyphon</i>	5
2.2. Landasan Teori	
2.2.1. Radiasi matahari.....	7
2.2.2. Sistem PATS	9
2.2.3. <i>Phase change material</i> (PCM).....	13
2.2.4. <i>Sistem thermal energy storage</i> (TES)	14
2.2.5. Pengujian proses <i>charging</i> dan <i>discharging</i>	18
2.2.6. Mekanisme perpindahan kalor	20

2.2.7. Energi ekstraksi.....	21
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1. Bahan penelitian.....	22
3.2. Skema alat penelitian	23
3.3. Alat penelitian	24
3.4. Prosedur Penelitian.....	33
3.4.1. Diagram alir penelitian.....	33
3.4.2. Tahap pelaksanaan	35
3.4.3. Pengambilan data	35
3.4.4. Prosedur analisis data.....	35
3.4. Kesulitan Penelitian	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Hasil kalibrasi termokopel	37
4.2. Pengujian Proses <i>Charging</i>	38
4.2.1. Kondisi lingkungan	38
4.2.2. Distribusi temperatur HTF	40
4.2.3. Distribusi temperatur PCM	43
4.2.4. Kapasitas penyimpanan energi termal	46
4.2.5. Penyimpanan kalor sesaat	50
4.2.6. Energi kumulatif tersimpan.....	55
4.3. Pengujian Proses <i>Discharging</i> Kontinyu	58
4.3.1. Distribusi temperatur HTF	59
4.3.2. Distribusi temperatur PCM	62
4.3.3. Energi ekstraksi	64
4.4. Perbandingan Pengujian <i>Charging</i> dan <i>Discharging</i> Kontinyu	67
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	74
5.2. Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Cara radiasi mencapai bumi	8
Gambar 2.2 Sistem PATS	9
Gambar 2.3 PATS sistem (a) aktif langsung (b) aktif tidak langsung	10
Gambar 2.4 PATS thermosyphon	10
Gambar 2.5 (a) Flate plate collector (b) Evacuated tube solar collector.....	12
Gambar 2.6 Skema aliran air PATS	13
Gambar 2.7 Klasifikasi sistem penimpan energi.....	15
Gambar 2.8 Tipe penyimpanan energi termal.....	16
Gambar 2.9 Temperatur waktu proses pemanasan zat.....	18
Gambar 2.10 Skema variasi temperatur sistem LHS	19
Gambar 3.1 Skema PATS	23
Gambar 3.2 Letak termokopel HTF dan PCM.....	23
Gambar 3.3 Kolektor matahari.....	24
Gambar 3.4 Piranometer	24
Gambar 3.5 Sensor udara	25
Gambar 3.6 Anemometer	26
Gambar 3.7 Katup air.....	27
Gambar 3.8 Safety valve	27
Gambar 3.9 Tangki TES	28
Gambar 3.10 Kapsul PCM	29
Gambar 3.11 Rotameter air	29
Gambar 3.12 Termokopel	30
Gambar 3.13 Akusisi data.....	31
Gambar 3.14 Komputer.....	31
Gambar 3.15 Diagram alir penelitian.....	33
Gambar 3.16 Diagram alir penelitian lanjutan.....	34
Gambar 4.1. Radiasi matahari tanggal 24/11/2016.....	38
Gambar 4.2. Radiasi matahari tanggal 25/11/2016.....	39

Gambar 4.3. Radiasi matahari tanggal 17/12/2016.....	39
Gambar 4.4. Evolusi temperatur HTF charging tanggal 24/11/2016.....	41
Gambar 4.5. Evolusi temperatur HTF charging tanggal 25/11/2016.....	41
Gambar 4.6. Evolusi temperatur HTF charging tanggal 17/12/2016.....	42
Gambar 4.7. Evolusi temperatur PCM charging tanggal 24/11/2016.....	44
Gambar 4.8. Evolusi temperatur PCM charging tanggal 25/11/2016.....	44
Gambar 4.9. Evolusi temperatur PCM charging tanggal 17/12/2016.....	45
Gambar 4.10. Kapasitas penyimpanan energi termal tanggal 24/11/2016.....	49
Gambar 4.11. Kapasitas penyimpanan energi termal tanggal 25/11/2016.....	49
Gambar 4.12. Kapasitas penyimpanan energi termal tanggal 17/12/2016.....	49
Gambar 4.13. Penyimpanan kalor sesaat tanggal 24/11/2016	54
Gambar 4.14. Penyimpanan kalor sesaat tanggal 25/11/2016	54
Gambar 4.15. Penyimpanan kalor sesaat tanggal 17/12/2016	54
Gambar 4.16. Energi tersimpan kumulatif.....	57
Gambar 4.17. Evolusi temperatur HTF discharging tanggal 24/11/2016	59
Gambar 4.18. Evolusi temperatur HTF dscharging tanggal 25/11/2016	60
Gambar 4.19. Evolusi temperatur HTF discharging tanggal 17/12/2016	60
Gambar 4.20. Evolus temperatur PCM discharging tanggal 24/11/2016	62
Gambar 4.21. Evolusi temperatur PCM discharging tanggal 25/11/2016	62
Gambar 4.22. Evolusi temperatur PCM discharging tanggal 17/12/2016	63
Gambar 4.23. Ekstraksi energi discharging tanggal 24/11/2016	66
Gambar 4.24. Ekstraksi energi discharging tanggal 25/11/2016	66
Gambar 4.25. Ekstraksi energi discharging tanggal 17/12/2016	66
Gambar 4.26. Perbandingan evolusi temperatur HTF charging dan discharging tanggal 24/11/2016.....	68
Gambar 4.27. Perbandingan evolusi temperatur HTF charging dan discharging tanggal 25/11/2016.....	69
Gambar 4.28. Perbandingan evolusi temperatur HTF charging dan discharging tanggal 17/12/2016.....	70

Gambar 4.29. Perbandingan evolusi temperatur PCM charging dan discharging tanggal 24/11/2016.....	71
Gambar 4.30. Perbandingan evolusi temperatur PCM charging dan discharging tanggal 25/11/2016.....	72
Gambar 4.31. Perbandingan evolusi temperatur PCM charging dan discharging tanggal 17/12/2016.....	73

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Sifat fisik paraffin wax RT 52.....	22
Tabel 3.2. Spesifikasi kolektor matahari.....	24
Tabel 3.3. Spesifikasi piranometer.....	25
Tabel 3.4. Spesifikasi sensor udara.....	26
Tabel 3.5. Spesifikasi anemometer.....	26
Tabel 3.6. Spesifikasi safety valve.....	28
Tabel 3.7. Spesifikasi tangki TES.....	28
Tabel 3.8. Spesifikasi kapsul PCM.....	29
Tabel 3.9. Spesifikasi rotameter.....	30
Tabel 3.10. Spesifikasi termokopel.....	30
Tabel 3.11. Spesifikasi akuisisi data.....	31
Tabel 3.12. Spesifikasi komputer.....	32
Tabel 4.1. Kalibrasi termokopel HTF.....	37
Tabel 4.2. Kalibrasi termokopel PCM.....	37
Tabel 4.3. Waktu pengujian charging.....	41
Tabel 4.4. Perhitungan kumulatif.....	53
Tabel 4.5. Perbandingan kapasitas penyimpan energi termal dan akumulasi energi tersimpan.....	58
Tabel 4.6. Waktu pengujian discharging.....	59

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

a_r	: fraksi yang bereaksi
A	: luas permukaan perpindahan kalor (m^2)
A_c	: luas permukaan kolektor (m^2)
c_{ap}	: kalor jenis rata-rata ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$c_{p,ad}$: kalor jenis air dingin ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$c_{p,ap}$: kalor jenis air panas ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$c_{p,c}$: kalor jenis kapsul ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$c_{p,ch}$: kalor jenis air proses <i>charging</i> ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$c_{p,d}$: kalor jenis air proses <i>discharging</i> ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$c_{p,g}$: kalor jenis air fase gas ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$c_{p,l}$: kalor jenis air fase cair ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$c_{p,s}$: kalor jenis air fase padat ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
$c_{p,w}$: kalor jenis air ($kJ/kg \cdot ^\circ C$)
D_h	: diameter hidrolis (m)
D_k	: diameter luar kapsul (m)
Δh_r	: kalor endotermik selama reaksi (kJ/kg)
η	: efisiensi pengumpulan kumulatif (%)
η_c	: efisiensi kolektor (%)
h	: koefisien perpindahan kalor konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
I_c	: radiasi matahari yang menimpa permukaan kolektor (W/m^2)
k	: konduktivitas termal ($W/m \cdot ^\circ C$)
k_{pcm}	: konduktivitas termal PCM ($W/m \cdot ^\circ C$)
K	: kapsul
L	: kalor laten (kJ/kg)
L_g	: kalor laten fase gas (kJ/kg)
L_p	: kalor laten fase padat (kJ/kg)
L_{pcm}	: panjang kapsul PCM (m)
$L_{s,i}$: panjang sisi dalam selongsong (m)

Q_c	: kalor selama proses <i>charging</i> (kW)
Q_d	: kalor selama proses <i>discharging</i> (kW)
$Q_{incident}$: kalor yang menimpa kolektor (kW)
Q_{kol}	: kalor yang diserap kolektor (W)
Q_{kond}	: perpindahan kalor konduksi (W)
Q_{konv}	: perpindahan kalor konveksi (W)
Q_u	: kalor yang digunakan untuk memanaskan air (W)
Q_w	: energi yang terkandung dalam air (kJ)
M	: massa (kg)
m_c	: massa kapsul (kg)
m_w	: massa air (kg)
m_p	: massa PCM (kg)
m_d	: massa air dingin (kg)
m_p	: massa air panas (kg)
\dot{m}_{ch}	: laju aliran massa air proses <i>charging</i> (kg/detik)
\dot{m}_d	: laju aliran massa air proses <i>discharging</i> (kg/detik)
μ	: viskositas dinamik (kg/m.detik)
N_k	: jumlah kapsul
Nu	: bilangan Nusselt
ρ	: massa jenis (kg/m ³)
ρ_d	: massa jenis air dingin (kg/m ³)
ρ_p	: massa jenis air panas (kg/m ³)
Re	: bilangan Reynolds
r_k	: jari-jari dalam kapsul (m)
$r_{s,i}$: jari-jari dalam selongsong (m)
r_t	: jari-jari ujung termokopel (m)
Ste	: bilangan Stefan
t	: waktu (detik)
T	: termokopel
T_c	: temperatur air campuran (°C)

T_d	: temperatur air dingin ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{c,i}$: temperatur air awal proses <i>charging</i> ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{c,in}$: temperatur air masuk kolektor ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{c,o}$: temperatur air akhir proses <i>charging</i> ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{c,out}$: temperatur air keluar kolektor ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{d,i}$: temperatur air awal proses <i>discharging</i> ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{d,o}$: temperatur air akhir proses <i>discharging</i> ($^{\circ}\text{C}$)
T_f	: temperatur akhir ($^{\circ}\text{C}$)
T_i	: temperatur awal ($^{\circ}\text{C}$)
T_k	: temperatur permukaan kapsul ($^{\circ}\text{C}$)
T_{∞}	: temperatur lingkungan air panas ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{m,min}$: temperatur leleh minimal PCM ($^{\circ}\text{C}$)
T_p	: temperatur air panas ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{p,i}$: temperatur awal PCM ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{p,m}$: temperatur leleh PCM ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{p,f}$: temperatur akhir PCM ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{pcm, 1/2}$: temperatur pusat kapsul ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{w,in}$: temperatur HTF masuk tangki ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{w,out}$: temperatur HTF keluar tangki ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{w,1}$: temperatur HTF awal ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{w,2}$: temperatur HTF akhir ($^{\circ}\text{C}$)
v	: kecepatan aliran air (m/detik)
V	: volume (m^3)
V_c	: volume air campuran (liter)
V_p	: volume air panas (liter)
V_t	: volume tangki (m^3)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data temperatur PATS charging tanggal 24/11/2016.....	80
Lampiran 2. Olah data temperatur dan radiasi matahari tanggal 24/11/2016	82
Lampiran 3. Olah data tanggal 24/11/2016.....	83
Lampiran 4. Olah data tanggal 24/11/2016.....	84
Lampiran 5. Data temperatur PATS charging tanggal 25/11/2016.....	88
Lampiran 6. Olah data temperatur dan radiasi matahari tanggal 25/11/2016	90
Lampiran 7. Olah data 25/11/2016	92
Lampiran 8. Olah data 25/11/2016	93
Lampiran 9. Data temperatur PATS charging tanggal 17/12/2016.....	97
Lampiran 10. Olah data temperatur dan radiasi matahari tanggal 17/12/2016...	99
Lampiran 11. Olah data tanggal 17/12/2016.....	100
Lampiran 12. Olah data tanggal 17/12/2016.....	101
Lampiran 13. Data temperatur PATS discharging tanggal 24/11/2016.....	104
Lampiran 14. Olah data tanggal 24/11/2016.....	105
Lampiran 15. Olah data tanggal 24/11/2016.....	106
Lampiran 16. Data temperatur PATS discharging tanggal 25/11/2016.....	107
Lampiran 17. Olah data tanggal 25/11/2016.....	108
Lampiran 18. Olah data tanggal 25/11/2016.....	109
Lampiran 19. Data temperatur PATS discharging tanggal 17/12/2016.....	110
Lampiran 20. Olah data tanggal 17/12/2016.....	111
Lampiran 21. Olah data tanggal 17/12/2016.....	112