

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUTAN .....	i
HALAMAN JUDUL .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
HALAMAN PERNYATAAN .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
INTISARI .....	vi
<i>ABSTRACT</i> .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvi
DAFTAR NOTASI .....	xvii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	6
1.3. Keaslian Penelitian .....	6
1.4. Tujuan Penelitian .....	7
1.5. Batasan Masalah .....	8
1.6. Manfaat Penelitian .....	8
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	9
2.1. Penggunaan <i>Paraffin</i> sebagai PCM .....	9
2.2. <i>Macroencapsulation</i> pada PCM .....	11
2.3. Penggunaan PCM pada PATS Sistem Aktif .....	13
2.4. Penggunaan PCM pada PATS Sistem Pasif .....	20
2.5. Aplikasi Pemodelan untuk LHTES .....	24
2.6. Perbandingan Unjuk Kerja PATS Dengan PCM dan Tanpa PCM .....	27
<b>BAB III LANDASAN TEORI</b> .....	30
3.1. Sistem <i>Thermal Energy Storage</i> .....	30
3.2. <i>Phase Change Material</i> (PCM) .....	34

3.3. Proses <i>Charging</i> dan <i>Discharging</i> .....	37
3.4. Mekanisme Perpindahan Kalor .....	38
3.5. Peningkatan Perpindahan Kalor pada LHTES .....	39
3.6. Penggolongan Sistem PATS .....	40
3.7. Efisiensi Kolektor Pelat Datar .....	42
3.8. Kapasitas Energi Tersimpan .....	43
3.9. Efisiensi Pengumpulan Akumulatif .....	43
3.10. Bilangan Stefan .....	44
3.11. <i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD) .....	44
3.12. Persamaan Atur .....	52
3.13. <i>User-Defined Function</i> .....	54
<b>BAB IV METODE PENELITIAN</b> .....	<b>56</b>
4.1. Kerangka Penelitian .....	56
4.2. Bahan Penelitian .....	57
4.3. Alat Penelitian .....	57
4.4. Prosedur Penelitian .....	66
<b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>72</b>
5.1. Eksperimen .....	72
5.1.1. Kalibrasi Termokopel dan Rotameter .....	72
5.1.2. Pengujian <i>Solar Simulator</i> .....	73
5.1.3. Temperatur <i>Inlet</i> dan <i>Outlet</i> Tangki .....	74
5.1.4. Distribusi Temperatur HTF .....	75
5.1.5. Distribusi Temperatur PCM .....	76
5.1.6. Penyimpanan Energi Termal .....	78
5.2. Simulasi .....	79
5.2.1. Model PATS-PCM .....	79
5.2.2. Hasil Simulasi .....	84
5.2.2.1. Temperatur <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> tangki .....	84
5.2.2.3. Distribusi temperatur HTF di dalam tangki .....	86
5.2.2.4. Distribusi temperatur PCM di dalam kapsul .....	86
5.2.2.5. <i>Liquid fraction</i> .....	91
5.2.2.6. Perpindahan kalor total di PCM .....	91

5.2.2.8. Energi termal akumulatif .....	93
5.3. Validasi .....	94
5.4. Prediksi energi termal akumulatif.....	97
5.4.1. Variasi <i>heat flux</i> .....	97
5.4.2. Variasi debit HTF .....	107
5.4.3. Variasi diameter kapsul.....	114
5.4.4. Variasi porositas tangki.....	125
5.5. Energi termal akumulatif PCM dan bilangan Stefan .....	135
<b>BAB VI PENUTUP</b> .....	<b>140</b>
6.1. Kesimpulan .....	140
6.2. Saran .....	141
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>142</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>150</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Skema PATS tipe aktif.....	2
Gambar 3.1. Klasifikasi sistem penyimpanan energi .....	30
Gambar 3.2. Berbagai tipe penyimpanan termal energi matahari .....	31
Gambar 3.3. Diagram temperatur-waktu pada pemanasan zat .....	32
Gambar 3.4. Klasifikasi PCM .....	35
Gambar 3.5. Skema temperatur sistem LHS .....	37
Gambar 3.6. Metode peningkatan perpindahan kalor pada sistem LHTES .....	40
Gambar 3.7. Penggolongan PATS .....	41
Gambar 3.8. Penggolongan kolektor matahari.....	42
Gambar 3.9. Proses diskret .....	46
Gambar 3.10. Model domain dan model fisik .....	46
Gambar 3.11. Proses diskret domain dan persamaan.....	47
Gambar 3.12. <i>Pressure-based solver</i> .....	48
Gambar 3.13. <i>Density-based solver</i> .....	49
Gambar 3.14. <i>Control volume</i> yang digunakan untuk ilustrasi diskret persamaan <i>scalar transport</i> .....	49
Gambar 4.1. Kerangka penelitian .....	56
Gambar 4.2. Skema alat eksperimen.....	58
Gambar 4.3. Posisi pemasangan termokopel HTF dan PCM .....	59
Gambar 4.4. Alat eksperimen .....	60
Gambar 4.5. Panel kolektor.....	60
Gambar 4.6. Tangki TES .....	61
Gambar 4.7. <i>Solar simulator</i> .....	61
Gambar 4.8. <i>Voltage regulator</i> .....	61
Gambar 4.9. Pompa.....	62
Gambar 4.10. Susunan kapsul.....	63
Gambar 4.11. <i>Data logger</i> temperatur .....	63
Gambar 4.12. Rotameter .....	63
Gambar 4.13. Skema sistem PATS-PCM tipe aktif.....	65

Gambar 4.14. Skema susunan kapsul PCM di dalam tangki .....	65
Gambar 4.15. Skema pemodelan PATS-PCM.....	66
Gambar 4.16. Diagram alir penelitian.....	67
Gambar 5.1. Posisi peletakan piranometer.....	73
Gambar 5.2. Kondisi temperatur HTF <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> tangki .....	74
Gambar 5.3. Beda temperatur HTF <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> tangki.....	75
Gambar 5.4. Evolusi temperatur rata-rata HTF .....	76
Gambar 5.5. Evolusi temperatur rata-rata PCM.....	77
Gambar 5.6. Perbedaan evolusi temperatur rata-rata HTF dan PCM .....	78
Gambar 5.7. Perolehan kalor pada tangki .....	79
Gambar 5.8. <i>Meshing</i> tangki .....	80
Gambar 5.9. Temperatur visual <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> hasil simulasi.....	84
Gambar 5.10. Perbedaan temperatur visual <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> hasil simulasi .....	85
Gambar 5.11. Evolusi visual temperatur HTF di tangki hasil simulasi .....	86
Gambar 5.12. Evolusi visual temperatur PCM di kapsul hasil simulasi.....	86
Gambar 5.13. Evolusi visual temperatur HTF dan PCM hasil simulasi .....	88
Gambar 5.14. Kontur temperatur PCM K7 arah radial.....	89
Gambar 5.15. Kontur fraksi cair PCM K7 arah radial .....	90
Gambar 5.16. <i>Liquid fraction</i> visual PCM hasil simulasi.....	91
Gambar 5.17. Perpindahan kalor visual pada PCM hasil simulasi .....	91
Gambar 5.18. Beda temperatur visual HTF dan PCM hasil simulasi .....	93
Gambar 5.19. Visual energi termal akumulatif hasil simulasi.....	94
Gambar 5.20. Evolusi temperatur HTF dan PCM dengan variasi jumlah <i>mesh</i> ...	96
Gambar 5.21. Evolusi temperatur dengan variasi <i>heat flux</i> .....	98
Gambar 5.22. Fraksi cair PCM dengan variasi <i>heat flux</i> .....	102
Gambar 5.23. Awal pelelehan PCM .....	104
Gambar 5.24. Evolusi pelelehan PCM akibat gaya apung.....	104
Gambar 5.25. Perilaku termal pada PCM dengan variasi <i>heat flux</i> .....	105
Gambar 5.26. Evolusi temperatur dengan variasi debit aliran.....	107
Gambar 5.27. Fraksi cair PCM dengan variasi debit aliran .....	111
Gambar 5.28. Perilaku termal pada PCM dengan variasi debit.....	113
Gambar 5.29. Evolusi temperatur dengan variasi diameter kapsul.....	115

Gambar 5.30. Susunan kapsul di dalam tangki dengan variasi diameter.....	116
Gambar 5.31. Konstruksi susunan kapsul di daerah saluran masuk .....	116
Gambar 5.32. Fraksi cair PCM dengan variasi diameter kapsul.....	122
Gambar 5.33. Perilaku termal pada PCM dengan variasi diameter kapsul.....	124
Gambar 5.34. Susunan kapsul di dalam tangki dengan variasi porositas .....	126
Gambar 5.35. Evolusi temperatur dengan variasi porositas tangki.....	126
Gambar 5.36. Fraksi cair PCM dengan variasi porositas tangki.....	132
Gambar 5.37. Perilaku termal pada PCM dengan porositas tangki .....	134
Gambar 5.38. Energi termal akumulatif dan bilangan Stefan.....	137

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Penelitian penggunaan PCM pada PATS sistem aktif.....	18
Tabel 2.2. Penelitian penggunaan PCM pada PATS sistem pasif .....	23
Tabel 2.3. Rangkuman penelitian disertasi .....	29
Tabel 3.1. Karakteristik pemilihan PCM untuk LHTES.....	34
Tabel 3.2. Perbandingan PCM organik dan inorganik.....	35
Tabel 3.3. Bidang sasaran aplikasi PCM .....	36
Tabel 4.1. Sifat termofisis RT52.....	57
Tabel 4.2. Spesifikasi <i>hardware</i> komputer .....	64
Tabel 4.3. Spesifikasi <i>software</i> komputer .....	64
Tabel 4.4. Variasi <i>running</i> simulasi .....	71
Tabel 5.1. Hasil kalibrasi termokopel .....	72
Tabel 5.2. Hasil pengukuran intensitas radiasi.....	73
Tabel 5.3. Kualitas <i>mesh</i> pada model PATS-PCM.....	82
Tabel 5.4. <i>Solution controls</i> untuk simulasi.....	83
Tabel 5.5. Skala residu simulasi.....	83
Tabel 5.6. Syarat awal dan syarat batas simulasi.....	84
Tabel 5.7. Harga perpindahan kalor maksimum .....	92
Tabel 5.8. Hasil $R^2$ tiap variasi jumlah <i>mesh</i> .....	94
Tabel 5.9. Perbandingan harga laju pemanasan rata-rata HTF dan PCM.....	98
Tabel 5.10. Perubahan kontur vektor kecepatan HTF di tengah tangki arah aksial untuk variasi <i>heat flux</i> .....	99
Tabel 5.11. Perubahan kontur temperatur HTF bagian tengah tangki arah aksial untuk variasi <i>heat flux</i> .....	100
Tabel 5.12. Perubahan kontur temperatur HTF dan PCM tengah tangki arah radial untuk variasi <i>heat flux</i> .....	101
Tabel 5.13. Perubahan kontur fraksi cair PCM tengah tangki arah radial untuk variasi <i>heat flux</i> .....	103
Tabel 5.14. Perubahan kontur vektor kecepatan HTF di tengah tangki arah aksial untuk variasi debit aliran .....	108

Tabel 5.15. Perubahan kontur temperatur HTF bagian tengah tangki arah aksial untuk variasi debit aliran .....	109
Tabel 5.16. Perubahan kontur temperatur HTF dan PCM tengah tangki arah radial untuk variasi debit aliran .....	110
Tabel 5.17. Perubahan kontur fraksi cair PCM tengah tangki arah radial untuk variasi debit aliran .....	112
Tabel 5.18. Ukuran variasi diameter pipa .....	114
Tabel 5.19. Perubahan kontur vektor kecepatan HTF di tengah tangki arah aksial untuk variasi diameter kapsul.....	117
Tabel 5.20. Perubahan kontur temperatur HTF bagian tengah tangki arah aksial untuk variasi diameter kapsul.....	119
Tabel 5.21. Perubahan kontur temperatur HTF dan PCM tengah tangki arah radial untuk variasi diameter kapsul.....	121
Tabel 5.22. Perubahan kontur fraksi cair PCM tengah tangki arah radial untuk variasi diameter kapsul.....	123
Tabel 5.23. Ukuran variasi porositas tangki .....	125
Tabel 5.24. Perubahan kontur vektor kecepatan HTF di tengah tangki arah aksial untuk variasi porositas tangki.....	128
Tabel 5.25. Perubahan kontur temperatur HTF bagian tengah tangki arah aksial untuk variasi porositas tangki.....	130
Tabel 5.26. Perubahan kontur temperatur HTF dan PCM tengah tangki arah radial untuk variasi porositas tangki.....	131
Tabel 5.27. Perubahan kontur fraksi cair PCM tengah tangki arah radial variasi untuk porositas tangki .....	133
Tabel 5.28. Rangkuman hasil variasi penelitian .....	136

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Spesifikasi <i>paraffin wax</i> RT52 .....	150
Lampiran 2. Kalibrasi <i>flowmeter</i> .....	151
Lampiran 3. UDF <i>code</i> menggunakan <i>compile C++ Compiler</i> .....	152
Lampiran 4. <i>Setup default</i> cek konvergensi .....	154
Lampiran 5. Perpindahan kalor total .....	155
Lampiran 6. Kalkulasi kecepatan aksial HTF di tangki .....	156
Lampiran 7. Perubahan temperatur dan <i>instantaneous heat stored</i> eksperimen. ....	157
Lampiran 8. Perubahan temperatur dan <i>instantaneous heat stored</i> simulasi.....	161
Lampiran 9. Validasi temperatur HTF hasil eksperimen dan simulasi.....	165
Lampiran 10. Validasi temperatur PCM hasil eksperimen dan simulasi.....	169
Lampiran 11. Distribusi temperatur HTF setiap variasi (°C).....	173
Lampiran 12. Distribusi temperatur PCM setiap variasi (°C).....	175
Lampiran 13. Distribusi fraksi cair PCM setiap variasi .....	177
Lampiran 14. Distribusi perpindahan kalor total setiap variasi (W).....	180
Lampiran 15. Distribusi energi termal akumulatif PCM setiap variasi (kJ) .....	182
Lampiran 16. Distribusi bilangan Stefan setiap variasi .....	184
Lampiran 17. Publikasi karya ilmiah .....	186

## DAFTAR NOTASI

$a_r$	: fraksi yang bereaksi
$A_c$	: luas permukaan kolektor ( $m^2$ )
$c_{ap}$	: kalor jenis rata-rata ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$c_{p,c}$	: 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 fasa gas ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$c_{p,l}$	: kalor jenis air fasa cair ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$c_{p,s}$	: kalor jenis air fasa padat ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$c_{p,w}$	: kalor jenis air ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$\Delta h_r$	: kalor endotermik selama reaksi ( $kJ/kg$ )
$E$	: kapasitas penyimpanan kalor (J)
$\eta$	: efisiensi pengumpulan kumulatif (%)
$\eta_c$	: efisiensi kolektor (%)
$I_c, I_T$	: radiasi matahari yang menimpa permukaan kolektor ( $W/m^2$ )
$L$	: kalor laten ( $kJ/kg$ )
$L_g$	: kalor laten fasa gas ( $kJ/kg$ )
$L_p$	: kalor laten fasa padat ( $kJ/kg$ )
$Q_c$	: kalor selama proses <i>charging</i> (kW)
$Q_d$	: kalor selama proses <i>discharging</i> (kW)
$Q_{kol}$	: kalor yang diserap kolektor (W)
$m$	: massa (kg)
$m_c$	: massa kapsul (kg)
$m_w$	: massa air (kg)
$m_p$	: massa PCM (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)

$\rho$	: massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )
$r_t$	: jari-jari ujung termokopel (m)
$S$	: radiasi matahari yang diserap kolektor ( $\text{W/m}^2$ )
$St_e$	: bilangan Stefan
$t$	: waktu (detik)
$T_a$	: temperatur lingkungan ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{c,i}$	: 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 ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{m,min}$	: temperatur leleh minimal PCM ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{p,i}$	: temperatur awal PCM ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{p,m}$	: temperatur leleh PCM ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{pm}$	: temperatur rata-rata plat absorber ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{p,f}$	: temperatur akhir PCM ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{w,in}$	: 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 ( $^{\circ}\text{C}$ )
$V$	: volume ( $\text{m}^3$ )