

## HALAMAN PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Arbi Rosadi  
NIM : 20150130140  
Jurusan : Teknik Mesin  
Universitas : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi ini yang berjudul “Simulasi CFD Pelelehan dan Pebekuan pada Tangki *Thermal Energy Storage* dengan Kapsul Berisi Campuran *Paraffin Wax* dan Serbuk Tembaga Fraksi Massa 10 % dengan Variasi Debit Air” adalah asli hasil karya saya dan tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi manapun, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau dipublikasikan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis disebutkan sumbernya di bagian naskah dan daftar pustaka tugas akhir ini.

Yogyakarta, 18 September 2019



20150130140

## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum Wr. Wb.*

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT., Atas berkat, rahmat serta hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan penelitian untuk Tugas Akhir Program Studi S-1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dengan judul “Simulasi CFD Pelelehan dan Pebekuan pada Tangki *Thermal Energy Storage* dengan Kapsul Berisi Campuran *Paraffin Wax* dan Serbuk Tembaga Fraksi Massa 10 % dengan Variasi Debit Air”.

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan atas bimbingan Bapak Tito Hadji Agung S.T., M.T. selaku pembimbing 1 (satu) dan Bapak Teddy Nurcahyadi, S.T., M.Eng. yang selalu menyediakan waktu untuk berdiskusi dan banyak memberikan inspirasi serta motivasi dalam pengerjaan penelitian ini. Atas hal tersebut penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Tito Hadji Agung S.T., M.T. dan Teddy Nurcahyadi, S.T., M.Eng. Semoga Allah SWT. menetapkannya sebagai kebaikan yang tiada putus.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bimbingan, bantuan, saran dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Berli Paripurna Kamiel, S.T., M.M., M.Eng.Sc., Ph.D., selaku ketua Program Studi S-1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta atas segala perhatiannya.
2. Bapak Tito Hadji Agung S.T., M.T selaku dosen pembimbing 1 (satu) dan bapak Teddy Nurcahyadi, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing 2 (dua) yang banyak memberikan arahan dan masukan serta ilmu-ilmu yang bermanfaat sehingga penulis dapat menyelesaikan karya ini.
3. Bapak Reli Adi Himarosa, S.T., M.Eng. sebagai dosen penguji Tugas Akhir yang telah memberikan dukungan dan masukan yang bersifat membangun.
4. Ayah dan Ibu tercinta yang tiada hentinya mencurahkan kasih sayang, perhatian serta diiringi dengan do'a yang selalu diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan karya ini dengan ridho-Nya.

5. Keluarga tersayang yang selalu memberikan dorongan semangat, keyakinan, bantuan serta motivasi kepada penulis sehingga penulis lebih semangat untuk menyelesaikan karya ini.
6. Seseorang yang namanya tertulis di lauhul mahfudz dan masih di rahasiakan oleh Allah SWT. sampai karya ini dapat terselesaikan. Terima kasih karena sudah menunggu dengan sabar sampai pada waktu yang ditentukan oleh Allah SWT.
7. Seluruh Dosen Pengajar dan staff di Program Studi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta atas semua ilmu pengetahuan yang telah diberikan kepada penulis.
8. Sahabat serta teman se-perjuangan Arbi rosadi serta Teman-teman semua baik satu kelas maupun beda kelas, baik satu angkatan ataupun beda angkatan karena kita semua tetap *Solidarity M Forever*.
9. Pihak-pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu penulis menyelesaikan karya ini.

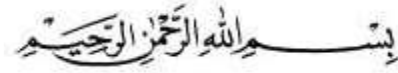
Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan karya ini yang disebabkan karena keterbatasan yang ada baik dari diri penulis, peralatan ataupun metode yang digunakan. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun supaya penulisan karya ini lebih baik lagi di masa yang akan datang. Semoga bermanfaat!!!

*Wassalamu'alaikum Wr.Wb.*

Yogyakarta, 18 September 2019

Penulis

## MOTTO



“Sesungguhnya Allah menyuruh kamu menyampaikan amanat kepada yang berhak menerimanya, dan (menyuruh kamu) apabila menetapkan hukum di antara manusia supaya kamu menetapkan dengan adil. Sesungguhnya Allah memberi pengajaran yang sebaik-baiknya kepadamu. Sesungguhnya Allah adalah Maha

Mendengar lagi Maha Melihat..”

(QS. An-nisa : 58)

“Sabar dalam mengatasi kesulitan dan bertindak bijaksana dalam mengatasinya adalah sesuatu yang utama.”

”Sahabat paling baik adalah percaya pada diri sendiri, musuh yang paling besar adalah kebimbangan dan pengiring yang paling setia adalah kerendahan hati.”

## DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI .....	iii
INTISARI.....	iv
ABSTRACT .....	v
KATA PENGANTAR .....	vi
MOTTO .....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Asumsi dan Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
BAB II LANDASAN TEORI.....	5
2.1. Tinjauan Pustaka .....	5
2.2. Dasar Teori.....	14
2.2.1. Definisi <i>Thermal Energy Storage</i> (TES).....	14
2.2.2. <i>Phase Change Material</i> (PCM).....	17
2.2.3. Konduksi.....	17
2.2.4. Konveksi alami .....	18
2.2.5. Radiasi .....	18
2.2.6. <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD) .....	19
2.2.7. <i>Software</i> ANSYS Fluent 18.0.....	20
2.2.8. Proses Simulasi ANSYS Fluent.....	22
2.2.9. Asumsi Pendekatan (Boussinesq).....	33

2.2.10. <i>User Define Function (UDF)</i> .....	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1. Alat Penelitian .....	35
3.2. Skema Penelitian Eksperimen .....	36
3.3. Prosedur Penelitian.....	37
3.3.1. Variasi Penelitian.....	37
3.3.2. Diagram Alir Penelitian .....	37
3.3.3. Langkah Penelitian .....	40
BAB VI PEMBAHASAN.....	61
4.1. Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen.....	61
4.2. Perbandingan Evolusi Temperatur HTF.....	61
4.2.1. Proses <i>Charging</i> .....	63
4.2.1. Proses <i>Discharging</i> secara kontinyu.....	66
4.3. Perbandingan Evolusi Temperatur PCM.....	70
4.4. Perbandingan Laju Penyerapan dan Pelepasan Kalor.....	78
4.4.1. Laju Penyerapan Kalor pada Proses <i>Charging</i> .....	78
4.4.2. Laju pelepasan kalor pada proses <i>discharging</i> .....	80
4.5. Perbandingan Laju Kenaikan dan Penurunan Temperatur .....	81
4.5.1. Laju Kenaikan Temperatur Pada Proses <i>Charging</i> .....	81
4.5.2. Laju Penurunan Temperatur Pada Proses <i>Discharging</i> .....	82
4.6. Pelelehan dan Pembekuan Campuran PCM .....	84
BAB V PENUTUP.....	89
5.1. Kesimpulan.....	89
5.2. Saran .....	91
DAFTAR PUSTAKA .....	92
LAMPIRAN.....	96

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kontur Pelelehan PCM pada Arah Radial ( Nazarrudin R, 2018) .....	6
Gambar 2.2. Perbandingan Kontur Pelelehan Simulasi dengan Eksperimen (Rosler dkk, 2011) .....	7
Gambar 2.3. Volume dari Storage untuk Penyimpanan (1800 kWh) (Levebvre dan Tezel, 2017) .....	15
Gambar 2.4. Logo ANSYS Fluent"®" .....	21
Gambar 2.5. <i>Preview</i> ANSYS Fluent .....	21
Gambar 2.6. <i>Preview Post-processing</i> ANSYS Fluent.....	21
Gambar 2.7. Bentuk Sel 2 Dimensi.....	23
Gambar 2.8. Bentuk Sel 3 Dimensi.....	23
Gambar 2.9. <i>Periodic Boundary Condition</i> .....	27
Gambar 2.10. <i>Periodic Repeats</i> .....	28
Gambar 2.11. <i>Coupled Wall</i> .....	28
Gambar 2.12. <i>Matching</i> .....	29
Gambar 2.13. <i>Mapped</i> .....	29
Gambar 3.1. Logo Software ANSYS Fluent 18.0.....	35
Gambar 3.2. Skema Penelitian Eksperimen.....	36
Gambar 3.3. Diagram Alir Penelitian .....	37
Gambar 3.4. Dimensi geometri .....	41
Gambar 3.5. Posisi Letak Termokopel.....	42
Gambar 3.6. Hasil Geometri Arah Aksil.....	43
Gambar 3.7. Hasil Geometri Arah Isometric .....	43
Gambar 3.8. Hasil Pembuatan <i>Meshing</i> .....	44
Gambar 3.9. Kualitas <i>Mesh</i> pada ANSYS Fluent .....	45
Gambar 3.10. Pemberian Nama pada Setiap <i>Zone</i> .....	46
Gambar 3.11. Tampilan Fluent Launcher 18.0 .....	46
Gambar 3.12. Panel <i>General</i> .....	47
Gambar 3.13. Panel <i>Models</i> .....	48
Gambar 3.14. <i>Mushy Zone Parameter</i> pada <i>Solidification/Melting</i> .....	48

Gambar 3.15. Panel Properti Material.....	48
Gambar 3.16. Properti <i>Phase Change Material</i> (PCM).....	49
Gambar 3.17. <i>Cell Zone Conditions</i> .....	54
Gambar 3.18. <i>Boundary Conditions</i> pada <i>Inlet</i> .....	55
Gambar 3.19. <i>Panel Mesh Interface</i> .....	56
Gambar 3.20. Panel pada <i>Methods</i> .....	57
Gambar 3.21. Nilai <i>Under Relaxation Faktor</i> (URF).....	58
Gambar 3.22. <i>Report Difinitions</i> .....	58
Gambar 3.23. <i>Solution Initialization</i> .....	59
Gambar 3.24. Temperatur Awal Simulasi.....	59
Gambar 3.25. Panel Penentuan <i>Calculation</i> .....	60
Gambar 3.26. <i>Contour Mass Fraction</i> pada PCM.....	60
Gambar 4.1. Penempatan Posisi Termokopel .....	62
Gambar 4.2. Grafik Evolusi Temperatur HTF pada Proses <i>Charging</i> (a) Variasi 0,6 LPM (b) Variasi 0,9 LPM.....	64
Gambar 4.3. <i>Contour</i> Temperatur HTF pada Proses <i>Charging</i> (a) Arah Aksial (b) Arah Radial .....	66
Gambar 4.4. Grafik Evolusi Temperatur HTF pada Proses <i>Discharging</i> (a) Variasi 1.5 LPM (b) Variasi 2.5 LPM .....	68
Gambar 4.5. <i>Contour</i> Temperatur HTF pada Proses <i>Discharging</i> Secara Kontinyu (a) Arah Aksial (b) Arah Radial.....	69
Gambar 4.6. Grafik Evolusi Temperatur PCM pada Proses <i>Charging</i> (a) 0,6 LPM (b) 0,9 LPM.....	71
Gambar 4.7. <i>Contour</i> Evolusi Temperatur Campuran PCM pada Proses <i>Charging</i> (a) Arah Aksial (b) Arah Radial.....	73
Gambar 4.8. <i>Contour</i> Evolusi Temperatur PCM di Pipa No. 27 pada Proses <i>Charging</i> (a) Arah Aksial (b) Arah Radial.....	74
Gambar 4.9. Grafik Evolusi Temperatur PCM pada Proses <i>Discharging</i> Secara Kontinyu (a) 1,5 LPM (b) 2,5 LPM.....	76
Gambar 4.10. <i>Contour</i> Evolusi Temperatur PCM pada Proses <i>Discharging</i> Secara Kontinyu (a) Arah Aksial (b) Arah Radial .....	77



Gambar 4.11. Contour evolusi temperatur PCM di pipa No. 27 pada Proses <i>Discharging</i> secara kontinyu (a) Arah aksial (b) Arah radial .....	78
Gambar 4.12. <i>Contour Liquid Fraction</i> pada Proses <i>Charging</i> (A) Arah Aksial (B) Arah Radial .....	85
Gambar 4.13. <i>Contour Liquid Fraction</i> Campuran PCM No. 27 pada Proses <i>Charging</i> (a) Arah Aksial (b) Arah Radial.....	86
Gambar 4.14. <i>Contour Liquid Fraction</i> pada Proses <i>Discharging</i> (a) Arah Aksial (b) Arah Radial .....	87
Gambar 4.15. Contour Liquid Fraction Campuran PCM No. 27 pada Proses <i>Discharging</i> (a) Arah Aksial (b) Arah Radial .....	88

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Ringkasan Tinjauan Pustaka .....	10
Tabel 2.1. Ringkasan Tinjauan Pustaka (lanjutan).....	11
Tabel 2.1. Ringkasan Tinjauan Pustaka (lanjutan).....	12
Tabel 2.1. Ringkasan Tinjauan Pustaka (lanjutan).....	13
Tabel 3.1. Spesifikasi Perangkat Komputer.....	35
Tabel 3.2. Hasil Kualitas <i>Mesh</i> .....	45
Tabel 3.3. Klasifikasi Jenis Zona .....	49
Tabel 3.4. Nilai Properti PCM .....	53
Tabel 3.5. Parameter Kondisi Batas .....	55
Tabel 4.1. Pembagian Kelompok pada Posisi Termokopel di HTF.....	61
Tabel 4.2. Perbandingan Waktu Simulasi dan Eksperimen pada Proses <i>Charging</i> .....	64
Tabel 4.3. Perbandingan Laju Kenaikan Temperatur Air pada Proses <i>Charging</i> .	65
Tabel 4.4. Hasil Perbandingan Pengujian Discharging Secara Kontinyu .....	67
Tabel 4.5. Perbandingan Laju Penurunan Temperatur Air pada Proses <i>Discharging</i> secara Kontinyu .....	68
Tabel 4.6. Pembagian Kelompok pada Termokopel di PCM .....	70
Tabel 4.7. Perbandingan Laju Kenaikan Temperatur Campuran PCM pada Proses <i>Charging</i> .....	72
Tabel 4.8. Perbandingan Laju Penurunan Temperatur Campuran PCM pada Proses <i>Discharging</i> secara Kontinyu.....	76
Tabel 4.9. Data Laju Penyerapan Kalor pada Proses <i>Charging</i> 0,6 LPM .....	79
Tabel 4.10. Data Laju Penyerapan Kalor pada Proses <i>Charging</i> 0,9 LPM.....	79
Tabel 4.11. Data Laju Pelepasan Kalor pada Proses <i>Discharging</i> 1.5 LPM.....	80
Tabel 4.12. Data Laju Pelepasan Kalor pada Proses <i>Discharging</i> 2.5 LPM .....	81
Tabel 4.13. Data Laju Kenaikan Temperatur pada Proses <i>Charging</i> 0,6 LPM....	82
Tabel 4.14. Data Laju Kenaikan Temperatur pada Proses <i>Charging</i> 0,9 LPM ...	82
Tabel 4.15. Data Laju Penurunan Temperatur pada Proses <i>Disharging</i> 1,5 LPM	83
Tabel 4.16. Data Laju Penurunan Temperatur pada Proses <i>Disharging</i> 2,5 LPM	83

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I. Hasil DSC Paraffin Wax dengan Serbuk Tembaga Fraksi Massa 10% .....	96
Lampiran II. UDF Densitas Campuran Paraffin Wax dengan Serbuk Tembaga Fraksi Massa 10%.....	97
Lampiran III. Hasil Kalibrasi pada Rotameter 0.1 mLPM - 1 LPM.....	98
Lampiran IV. Hasil Kalibrasi pada Rotameter 1 LPM – 3 LPM .....	99
Lampiran V. Profil Temperatur inlet charging variasi 0.6 LPM .....	100
Lampiran VI. Profil Temperatur inlet charging variasi 0.9 LPM .....	101

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

CFD	: <i>Computational Fluid Dynamics</i>
GUI	: <i>Graphic User Interface</i>
HTF	: <i>Heat Transfer Fluid</i>
LES	: <i>Large Eddy Simulation</i>
LHS	: <i>Latent Heat Storage</i>
LPM	: <i>Liter Per Menit</i>
PCM	: <i>Phase Change Material</i>
PISO	: <i>Pressure Implicit with Splitting of Operators</i>
QUICK	: <i>Quadratic Upwind Interpolation</i>
RSM	: <i>Reynold Stress</i>
SHS	: <i>Sensible Heat Storage</i>
SIMPLE	: <i>Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation</i>
SIMPLEC	: <i>Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation Consistent</i>
SWH	: <i>Solar Water Heater</i>
TES	: <i>Thermal Energy Storage</i>
UDF	: <i>User Define Function</i>
URF	: <i>Under Relaxation Factor</i>
$C_p$	: Kalor jenis (J/kg.K)
$C_{ap}$	: Kalor jenis rata-rata material penyimpanan (J/kg.°C)
$C_{p,g}$	: Kalor jenis material fase gas (J/kg°C)
$C_{p,l}$	: Kalor jenis material fase cair (J/kg°C)
$C_{p,pw}$	: Kalor jenis paraffin wax (J/kg.K)
$C_{p,Cu}$	: Kalor jenis tembaga (J/kg.K)
k	: Konduktivitas termal (W/m.K)
$k_{pw}$	: Konduktivitas termal <i>paraffin wax</i> (W/m.K)
$k_{Cu}$	: Konduktivitas termal tembaga (W/m.K)
T	: Temperatur (K)
$\Delta T$	: Perubahan temperatur (K)

$T_w$	: Temperatur dinding (K)
$T_{ref}$	: <i>Reference</i> temperatur (K)
$T_i$	: Temperatur akhir ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_f$	: Temperatur awal ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\rho$	: Densitas ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_l$	: Densitas <i>liquid</i> ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_s$	: Densitas <i>solid</i> ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_s$	: Densitas bola ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$q$	: Laju perpindahan kalor (W)
$p$	: <i>Static pressure</i> (Pa)
$\bar{\tau}$	: <i>Stress tensor</i> (Pa)
$t$	: Waktu (s)
$\vec{v}$	: Kecepatan (m/s)
$l$	: Unit tensor
$\vec{F}$	: Gaya eksternal (N)
$\vec{g}$	: Gaya gravitasi (N)
$\nabla$	: <i>Nabla</i>
$\mu$	: Viskositas (Pa.s)
$H$	: <i>Enthalpy</i> (J/kg)
$h$	: Koefisien konveksi ( $\text{W}/\text{m}^2, \text{K}$ )
$h_{ref}$	: <i>Reference enthalpy</i> (J/kg)
$\Delta h_r$	: Kalor endotermik (kJ/mol)
$\Delta H$	: <i>Latent heat</i> (J/kg)
$\Delta x$	: Tebal (m)
$\alpha_r$	: Fraksi yang bereaksi (mol)
$S$	: <i>Source term</i> ( $\text{W}/\text{m}^3$ )
$A$	: Luas penampang ( $\text{m}^2$ )
$V$	: Volumne benda ( $\text{m}^3$ )
$\gamma$	: <i>Liquid fraction</i>
$g$	: Percepatan gravitasi ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$r$	: Jari-jari bola (m)
$v$	: Kecepatan bola (m/s)
%Pw	: Fraksi massa <i>paraffin wax</i>
%Cu	: Fraksi massa serbuk tembaga
$\sigma$	: Konstanta Stefan-Boltzmann ( $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )
$e$	: Emisivitas permukaan benda
$m$	: Massa (kg)
$L$	: Kalor laten perubahan padat-cair (J/kg)
$L_g$	: Kalor laten cair-gas (J/kg)