

TUGAS AKHIR - TM234802

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN
MATERIAL *FILLER* SERBUK SILIKA RASIO 0.35 DAN
0.4 PADA *PHASE CHANGE MATERIAL* KOMPOSIT
DENGAN KETEBALAN 3 MM, 6 MM, DAN 9 MM SAAT
PROSES *DISCHARGING***

M. DAFFA NUR ROHMAN HADI

NRP 5007201192

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, ST, M.Sc., IPM, AEng

NIP 198208192012121003

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



TUGAS AKHIR - TM234802

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN MATERIAL *FILLER* SERBUK SILIKA RASIO 0.35 DAN 0.4 PADA *PHASE CHANGE MATERIAL* KOMPOSIT DENGAN KETEBALAN 3 MM, 6 MM, DAN 9 MM SAAT PROSES *DISCHARGING*

M. DAFFA NUR ROHMAN HADI

NRP 5007201192

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng

NIP 198208192012121003

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



FINAL PROJECT - TM234802

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF ADDING SILICA POWDER FILLER MATERIAL WITH RATIO 0.35 AND 0.4 ON PHASE CHANGE COMPOSITE MATERIAL WITH THICKNESS OF 3 MM, 6 MM, AND 9 MM DURING DISCHARGING PROCESS

M. DAFFA NUR ROHMAN HADI

NRP 5007201192

Advisor

Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng

NIP 198208192012121003

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Departement Of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial technology and System Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN MATERIAL *FILLER* SERBUK SILIKA RASIO 0.35 DAN 0.4 PADA *PHASE CHANGE MATERIAL* KOMPOSIT DENGAN KETEBALAN 3 MM, 6 MM, DAN 9 MM SAAT PROSES *DISCHARGING*

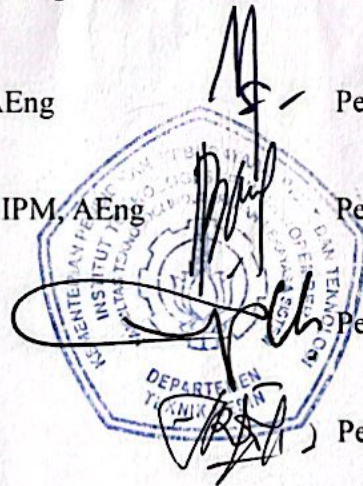
TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **M. DAFFA NUR ROHMAN HADI**
NRP. 5007201192

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng Pembimbing
2. Prof. Dr. Ir. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T., IPM, AEng Penguji
3. Prof. Dr. Ir. Prabowo, Meng, IPU, AEng Penguji
4. Tri Vicca Kusumadewi, S.T., MSc Penguji



SURABAYA
AGUSTUS, 2024

APPROVAL SHEET

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF ADDING SILICA POWDER FILLER MATERIAL WITH RATIO 0.35 AND 0.4 ON PHASE CHANGE COMPOSITE MATERIAL WITH THICKNESS OF 3 MM, 6 MM, AND 9 MM DURING DISCHARGING PROCESS

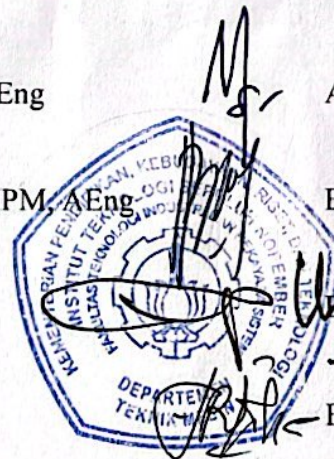
FINAL PROJECT

*Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree S.T at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember*

By : M. DAFFA NUR ROHMAN HADI
NRP. 5007201192

Approved by Final Project Examination Team :

1. Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng Advisor
2. Prof. Dr. Ir. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T., IPM, AEng Examiner
3. Prof. Dr. Ir. Prabowo, Meng, IPU, AEng Examiner
4. Tri Vicca Kusumadewi, S.T., MSc Examiner



SURABAYA
AGUSTUS, 2024

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama mahasiswa / NRP : M. Daffa Nur Rohman Hadi / 5007201192
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Ir. Is. Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM /
198208192012121003

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "*STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN MATERIAL FILLER SERBUK SILIKA RASIO 0.35 DAN 0.4 PADA PHASE CHANGE MATERIAL KOMPOSIT DENGAN KETEBALAN 3 MM, 6 MM, DAN 9 MM SAAT PROSES DISCHARGING*" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 1 Agustus 2024

Mengetahui
Dosen Pembimbing



Dr. Ir. Is. Bunyamin Suryo, S.T.,
M.Sc., IPM, AEng.
NIP. 198208192012121003

Mahasiswa



M. Daffa Nur Rohman Hadi
NRP. 5007201192

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below :

Name of student / NRP : M. Daffa Nur Rohman Hadi / 5007201192
Departement : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Dr. Ir. Is. Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng /
198208192012121003

hereby declare that the Final Project with title of "*EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF ADDING SILICA POWDER FILLER MATERIAL WITH RATIO 0.35 AND 0.4 ON PHASE CHANGE COMPOSITE MATERIAL WITH THICKNESS OF 3 MM, 6 MM, AND 9 MM DURING DISCHARGING PROCESS*" is the result of my own work is original, and written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with the statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 1 August 2024

Acknowledged
Advisor



Dr. Ir. Is. Bunyamin Suryo, S.T.,
M.Sc., IPM, AEng.
NIP. 198208192012121003

Student



M. Daffa Nur Rohman Hadi
NRP. 5007201192

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN MATERIAL *FILLER*
SERBUK SILIKA RASIO 0.35 DAN 0.4 PADA *PHASE CHANGE MATERIAL*
KOMPOSIT DENGAN KETEBALAN 3 MM, 6 MM, DAN 9 MM SAAT PROSES
*DISCHARGING***

Nama Mahasiswa : M. Daffa Nur Rohman Hadi
NRP : 5007201192
Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng

Abstrak

Baterai litium-ion merupakan salah satu alternatif dalam penyimpanan energi untuk mengurangi ketergantungan atas cadangan energi yang semakin hari semakin menipis. Namun, pengoperasian baterai yang berada di luar suhu operasi yang optimal akan menyebabkan *overheating* pada baterai. Kenaikan temperatur pada baterai litium-ion dapat menyebabkan peningkatan kinerja hingga menimbulkan risiko berbahaya sehingga dibutuhkan sistem manajemen termal pada baterai untuk mengatasi masalah tersebut. Salah satu metode dalam sistem manajemen termal pada baterai (BTMS) yaitu menggunakan PCM (*Phase Change Material*). Salah satu teknik untuk meningkatkan transfer panas pada PCM adalah dengan menambahkan material *filler* dengan konduktivitas termal yang cukup tinggi untuk membentuk PCM komposit. Sehingga pada penelitian tugas akhir ini, penulis akan menganalisis tentang pengaruh variasi rasio *filler* serbuk silika pada PCM komposit terhadap peningkatan temperatur pada permukaan baterai litium-ion. Pada penelitian tugas akhir ini, variasi rasio material *filler* serbuk silika dan komposisi *paraffin wax* yang digunakan adalah *natural convection*, PCM murni, PCM komposit dengan rasio 0.35 dan 0.4. Selanjutnya untuk variasi ketebalan PCM komposit terdapat ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm. Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan pemilihan *paraffin wax* dan serbuk silika dengan rasio 0.4 dan ketebalan 9 mm mampu mendinginkan baterai litium-ion pada *discharging* 1C hingga 5C lebih baik dibandingkan dengan variasi PCM komposit lainnya, yaitu mampu meredam temperatur sebesar 5.575°C dari temperatur maksimal pada *natural convection* pada *discharging* 1C dan mampu meredam temperatur sebesar 12.475°C dari temperatur maksimal pada *natural convection* pada *discharging* 2C. Kemudian, mampu meredam temperatur sebesar 22.425°C dari temperatur maksimal pada *natural convection* pada *discharging* 3C serta pada *discharging* 4C mampu meredam temperatur sebesar 28.275°C dari temperatur maksimal pada *natural convection* pada *discharging* 4C mampu meredam temperatur sebesar 34.358°C dari temperatur maksimal pada *natural convection*. Sehingga pemilihan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 merupakan metode efektif untuk meningkatkan kinerja PCM komposit dalam menurunkan temperatur permukaan baterai. Kenaikan temperatur paling rendah pada setiap variasi ketebalan dan *discharging rate* adalah variasi ketebalan 9 mm, yang berarti bahwa ketebalan 9 mm merupakan ketebalan dengan tingkat kelelahan yang paling rendah dan paling aman apabila penelitian dilakukan pada C-rate 1C – 5C.

Kata Kunci : *Baterai Litium-Ion, Heat Generation, PCM, Serbuk Silika*

Halaman ini sengaja dikosongkan

***EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF ADDING SILICA POWDER FILLER
MATERIAL WITH RATIO 0.35 AND 0.4 ON PHASE CHANGE COMPOSITE
MATERIAL WITH THICKNESS OF 3 MM, 6 MM, AND 9 MM DURING
DISCHARGING PROCESS***

Student Name : M. Daffa Nur Rohman Hadi
NRP : 5007201192
Department : Mechanical Engineering ITS
Advisor : Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng

Abstract

Litium-ion batteries are one of the alternatives in energy storage to reduce dependence on energy reserves that are depleting day by day. However, operating the battery beyond the optimal operating temperature will cause overheating of the battery. The increase in temperature in litium-ion batteries can cause a decrease in performance to pose a dangerous risk so that a thermal management system is needed on the battery to solve the problem. One method in the battery thermal management system (BTMS) is using PCM (Phase Change Material). One technique to improve heat transfer in PCM is to add filler material with high enough thermal conductivity to form a composite PCM. So in this final project research, the author will analyse the effect of variations in the ratio of silica powder filler in composite PCM on the increase in temperature on the surface of litium-ion batteries. In this final project research, variations in the ratio of silica powder filler material and paraffin wax composition used are natural convection, Pure PCM, composite PCM with a ratio of 0.35 and 0.4. Furthermore, for the variation of composite PCM thickness, there are thicknesses of 3 mm, 6 mm, and 9 mm. Based on the experimental results that have been carried out, it is found that the selection of paraffin wax and silica powder with a ratio of 0.4 and a thickness of 9 mm is able to cool the litium-ion battery at 1C to 5C discharging better than other variations of composite PCM, which is able to reduce the temperature by 5.575°C from the maximum temperature in natural convection at 1C discharging and able to reduce the temperature by 12.475°C from the maximum temperature in natural convection at 2C discharging. Then, it is able to reduce the temperature by 22.425°C from the maximum temperature in natural convection at 3C discharging and at 4C discharging it is able to reduce the temperature by 28.275°C from the maximum temperature in natural convection. Likewise, discharging 5C is able to reduce the temperature by 34.358°C from the maximum temperature in natural convection. So that the selection of silica powder composite PCM with a ratio of 0.4 is an effective method to improve the performance of composite PCM in reducing battery surface temperature. The lowest temperature increase in each thickness variation and discharging rate is the 9 mm thickness variation, which means that the 9 mm thickness is the thickness with the lowest and safest melting rate when the research is conducted at a C-rate of 1C - 5C.

Keyword : *Litium-Ion Battery, Heat Generation, PCM, Silica Powder*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas Rahmat dan karunia-Nya penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran sehingga dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENAMBAHAN MATERIAL *FILLER* SERBUK SILIKA RASIO 0.35 DAN 0.4 PADA *PHASE CHANGE MATERIAL* KOMPOSIT DENGAN KETEBALAN 3 MM, 6 MM, DAN 9 MM SAAT PROSES *DISCHARGING*”.

Adapun maksud dan tujuan penulisan tugas akhir ini adalah untuk memenuhi tanggung jawab sebagai mahasiswa departemen Teknik Mesin dan untuk memenuhi syarat kelulusan pada mata kuliah tugas akhir di departemen Teknik Mesin ITS. Dalam penulisan dan penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari partisipasi, dukungan dan bimbingan dari banyak pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, yaitu Ibu Hermin Hartutik dan Bapak Nurhadi Adnan yang telah memberikan doa restu, bimbingan, semangat, inspirasi dan dukungan penuh selama penulis menempuh jenjang perkuliahan S1.
2. Bapak Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng.. sebagai dosen pembimbing tugas akhir yang telah sabar membimbing dan mengarahkan penulis dan memberikan banyak kesempatan selama proses pembimbingan, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan segala kelebihan dan kekurangannya.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T., IPM, AEng, Bapak Prof. Dr. Ir. Prabowo, Meng, IPU, AEng dan Ibu Tri Vicca Kusumadewi, S.T., M.Sc. sebagai dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan kritik dan masukan untuk pengembangan tugas akhir penulis.
4. Bapak Dr. Ir. Witantyo, MEng.Sc sebagai dosen wali penulis yang selalu memberikan motivasi dan mengarahkan penulis selama menempuh jenjang perkuliahan S1.
5. Anggota lab kompor, Agung Mulyo Husodo, Ganang Ismail, Nasrullah Akmal Rabbani, Raynandha Ardhi Pratama, Michael J.P. Siregar, Nasya Arimbi, Pramana Khairi Putra, dan Joenatan Stevanno yang telah menemani penulis selama pengerjaan laporan tugas akhir.
6. Teman-teman angkatan M63 yang telah menemani penulis dalam setiap kondisi selama menempuh pendidikan di Teknik Mesin ITS.
7. Dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu atas bantuannya baik secara langsung atau tidak langsung sehingga penulisan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna karena masih banyak kelemahan dan kekurangan di dalam-nya. Karena itu penulis terbuka menerima kritik dan saran untuk menyempurnakan tugas akhir ini sehingga menghasilkan ilmu yang lebih bermanfaat dan hal – hal yang positif untuk sekitar.

Surabaya, 1 Agustus 2024

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
STATEMENT OF ORIGINALITY	iv
Abstrak	v
Abstract	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II LANDASAN TEORI	5
2.1 Baterai Litium-Ion	5
2.1.1 Komponen Baterai Litium-Ion	5
2.1.2 Karakteristik Baterai Litium-Ion	6
2.2 Sistem Manajemen Termal pada Baterai	7
2.3 Metode Pendinginan pada Baterai Litium-Ion	7
2.3.1 Metode Air Cooling	7
2.3.2 Metode Liquid Cooling	8
2.4 Phase Change Material	8
2.4.1 PCM Organik	9
2.4.2 PCM Anorganik	9
2.4.3 Eutektika	9
2.5 Serbuk Silika	10
2.6 Heat Generation pada Baterai Litium-Ion	10
2.7 <i>Thermal Conductivity</i>	11
2.8 Perhitungan Massa Jenis dan Karakteristik Termal PCM Komposit	12
2.9 Perpindahan Panas	13
2.9.1 Konduksi	13
2.9.2 Konveksi	14
2.9.3 Tahanan Termal pada Silinder	14
2.9.4 <i>Overall Heat Transfer Coefficient</i>	15
2.10 <i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i>	17
2.11 Penelitian Terdahulu	17
2.11.1 <i>Enhancement of Thermal Conductivity of PCM Using Filler Graphite Powder Materials</i> (Bharadwaj Reddy et al., 2018)	17
2.11.2 <i>Study on Thermal Runaway Risk Prevention of Lithium-Ion Battery with Composite Phase Change Materials</i> (Zhang et al., 2023)	19
2.11.3 <i>Thermal Management System Using Phase Change Material for Lithium Ion Battery</i> (Grimonia et al., 2021)	21

2.11.4	<i>Experimental Study of a Passive Thermal Management System Using Expanded Graphite/Polyethylene Glycol Composite for Lithium-Ion Batteries</i> (Xia et al., 2023)	22
BAB III	METODOLOGI	25
3.1	<i>Flowchart</i> Penelitian	25
3.2	Studi Literatur	26
3.3	Perumusan Masalah	27
3.4	Pengumpulan Data	27
3.4.1	Data Variasi Eksperimen	27
3.4.2	Data Variasi Simulasi	27
3.4.3	Data Spesifikasi Baterai Litium-Ion	27
3.4.4	Data Spesifikasi <i>Phase Change Material</i>	28
3.4.5	Data Spesifikasi Serbuk Silika	28
3.5	Desain Eksperimen	28
3.5.1	Alat dan Bahan	29
3.5.2	Pembuatan Modul Paket Baterai	32
3.5.3	Perakitan Modul Baterai	35
3.6	Set-Up Pengujian	36
3.6.1	Skema Peralatan Pengujian	36
3.6.2	Prosedur Percobaan	37
3.7	Analisis Data Hasil Percobaan	40
3.8	<i>Pre-Processing</i> Simulasi	40
3.8.1	Permodelan Baterai	40
3.8.2	<i>Meshing</i> Model Baterai	41
3.8.3	<i>Set-Up</i> Simulasi	43
3.9	Penarikan Kesimpulan	45
3.10	Penutup	45
BAB IV	ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	47
4.1	Hasil Pengujian Temperatur pada Baterai	47
4.1.1	Pengujian Baterai dengan Sistem Natural Convection dan PCM Murni	47
4.1.2	Pengujian Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 1C	47
4.1.3	Pengujian Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 2C	47
4.1.4	Pengujian Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 3C	47
4.1.5	Pengujian Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 4C	47
4.1.6	Pengujian Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 5C	47
4.2	Pengaruh Variasi Ketebalan PCM Komposit terhadap Kenaikan Temperatur Baterai	47
4.2.1	Analisis pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 3 mm	47
4.2.2	Analisis pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 6 mm	49
4.2.3	Analisis pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 9 mm	51
4.3	Pengaruh Variasi Rasio Material <i>Filler</i> pada PCM Komposit terhadap Kenaikan Temperatur Baterai	52
4.3.1	Analisis pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 1C	52
4.3.2	Analisis pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 2C	54
4.3.3	Analisis pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 3C	55
4.3.4	Analisis pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 4C	57
4.3.5	Analisis pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 5C	58
4.4	Pengaruh Penambahan PCM dan Rasio Material <i>Filler</i> terhadap Kenaikan Temperatur Baterai	60

4.4.1	Analisis pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 1C pada Ketebalan PCM Komposit 3 mm	60
4.4.2	Analisis pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 5C pada Ketebalan PCM Komposit 9 mm	62
4.5	Pengaruh <i>Discharging Rate</i> terhadap <i>Heat Generation</i> pada Baterai	64
4.5.1	Analisis <i>Heat Generation</i>	64
4.6	Simulasi CFD.....	64
4.6.1	Analisis Hasil Simulasi PCM Murni 6 mm dengan <i>Discharge Rate</i> 4C.....	64
4.6.2	Analisis Hasil Simulasi PCM Murni 9 mm dengan <i>Discharge Rate</i> 4C.....	66
4.6.3	Analisis Hasil Simulasi PCM Komposit 6 mm dan 9 mm Rasio 0.35	67
4.6.4	Analisis Hasil Simulasi PCM Komposit 6 mm dan 9 mm Rasio 0.4	70
4.6.5	Analisis Liquid Fraction pada 5C PCM Murni 6 mm	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		75
5.1	Kesimpulan	75
5.2	Saran	76
DAFTAR PUSTAKA		77
LAMPIRAN		79
BIODATA PENULIS		125

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Komponen Sel dan Aliran Ion Litium pada Sel Baterai	5
Gambar 2.2 Komponen Sel Litium-Ion Prismatik	6
Gambar 2.3 Kimiawi Litium-Ion	6
Gambar 2.4 Kelebihan dan Kekurangan Teknik Pendinginan pada sel Li-Ion	7
Gambar 2.5 Skema Air Cooling.....	8
Gambar 2.6 Pelat pada Skema Liquid Cooling.....	8
Gambar 2.7 Klasifikasi PCM Berdasarkan Komposisi Material	9
Gambar 2.8 Perpindahan Panas pada Dinding Silinder dan Rangkaian Termal.....	14
Gambar 2.9 Perpindahan Panas pada Dinding Silinder Komposit dan Rangkaian Termal....	16
Gambar 2.10 Proses dalam Eksperimen Penambahan Serbuk Grafit	18
Gambar 2.11 Waktu Leleh dan Waktu Pematatan terhadap Kandungan <i>Paraffin</i>	18
Gambar 2.12 Nilai Konduktivitas Termal terhadap Variasi Komposisi <i>Paraffin Wax</i>	19
Gambar 2.13 Proses Pembuatan PCM Komposit	19
Gambar 2.14 Skema Alat Eksperimen.....	20
Gambar 2.15 Rasio Komposisi PCM Komposit	20
Gambar 2.16 Grafik Perbandingan Konduktivitas Termal pada PCM Komposit	20
Gambar 2.17 Gambar Geometri dari (a) Non-PCM (b) PCM 3 mm (c) PCM 6 mm dan (d) PCM 9 mm	21
Gambar 2.18 Grafik Temperatur Permukaan Baterai	22
Gambar 2.19 Komposisi CPCM	22
Gambar 2.20 Setup dan Proses Eksperimen	23
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	26
Gambar 3.2 Desain Cetakan Baterai dan PCM (a) 3 mm, (b) 6 mm, (c) 9 mm.....	33
Gambar 3.3 Desain 3D Holder Baterai	33
Gambar 3.4 Rangkaian Modul Baterai	35
Gambar 3.5 Skema Peralatan Pengujian	36
Gambar 3.6 Alat Pengujian yang Telah Dirangkai (a) Rangkaian <i>Battery Tester</i> , Styrofoam Box, dan Komputer (b) Rangkaian Alat Pengujian Baterai dalam Styrofoam Box	36
Gambar 3.7 Pemasangan <i>Thermocouple</i> dan Kabel <i>Battery Tester</i> pada Baterai	38
Gambar 3.8 Tampilan Software <i>Battery Tester</i>	38
Gambar 3.9 Permodelan Geometri Baterai pada (a) PCM Murni 6 mm (b) PCM Murni 9 mm	41
Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Temperatur terhadap Waktu pada Ketebalan 3 mm	48
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Temperatur terhadap Waktu pada Ketebalan 6 mm	49
Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Temperatur terhadap Waktu pada Ketebalan 9 mm	51
Gambar 4.4 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Kondisi Discharging 1C.....	53
Gambar 4.5 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Kondisi <i>Discharging</i> 2C	54
Gambar 4.6 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Kondisi <i>Discharging</i> 3C	56
Gambar 4.7 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Kondisi <i>Discharging</i> 4C	57
Gambar 4.8 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Kondisi <i>Discharging</i> 5C	59
Gambar 4.9 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Ketebalan 3 mm pada Kondisi <i>Discharging</i> 1C	60
Gambar 4.10 Grafik Laju Peningkatan Temperatur pada Ketebalan 3 mm pada Kondisi <i>Discharging</i> 1C	61
Gambar 4.11 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Ketebalan 9 mm pada Kondisi Discharging 5C.....	62

Gambar 4.12	Grafik Laju Peningkatan Temperatur pada Ketebalan 9 mm pada Kondisi <i>Discharging 5C</i>	63
Gambar 4.14	Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada PCM Murni 6 mm dengan <i>Discharge Rate 4C</i>	65
Gambar 4.15	Gambar <i>Contour</i> Temperatur dari Baterai Litium-Ion pada PCM Murni Ketebalan 6 mm dengan <i>Discharge Rate 4C</i>	65
Gambar 4.16	Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada PCM Murni 9 mm dengan <i>Discharge Rate 4C</i>	66
Gambar 4.17	Gambar <i>Contour</i> Temperatur dari Baterai Litium-Ion pada PCM Murni Ketebalan 9 mm dengan <i>Discharge Rate 4C</i>	67
Gambar 4.18	Grafik Perbandingan Temperatur PCM Komposit 6 mm Rasio 0.35.....	67
Gambar 4.19	Kontur Temperatur dan <i>Liquid Fraction</i> PCM Komposit 6 mm Rasio 0.35 ...	68
Gambar 4.21	Grafik Perbandingan Temperatur PCM Komposit 9 mm Rasio 0.35.....	69
Gambar 4.22	Kontur Temperatur dan <i>Liquid Fraction</i> PCM Komposit 9 mm Rasio 0.35 ...	69
Gambar 4.23	Kontur <i>Liquid Fraction</i> PCM Komposit 9 mm Rasio 0.35.....	70
Gambar 4.24	Grafik Perbandingan Temperatur PCM Komposit 6 mm Rasio 0.4.....	70
Gambar 4.25	Kontur Temperatur dan <i>Liquid Fraction</i> PCM Komposit 6 mm Rasio 0.4	71
Gambar 4.26	Kontur Temperatur dan <i>Liquid Fraction</i> PCM Komposit 6 mm Rasio 0.4	71
Gambar 4.27	Grafik Perbandingan Temperatur PCM Komposit 9 mm Rasio 0.4.....	72
Gambar 4.28	Kontur Temperatur dan <i>Liquid Fraction</i> PCM Komposit 9 mm Rasio 0.4	72
Gambar 4.29	Kontur Temperatur PCM Komposit 9 mm Rasio 0.4.....	73
Gambar 4.30	Grafik <i>Liquid Fraction</i> pada 5C PCM Murni 6 mm.....	73
Gambar 4.31	Kontur Temperatur dan <i>Liquid Fraction</i> 5C PCM Murni 6 mm.....	74

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Variasi Ketebalan Modul dan Rasio Material <i>Filler</i>	27
Tabel 3.2 Variasi <i>Discharge Rate</i>	27
Tabel 3.3 Spesifikasi Baterai Litium-Ion.....	27
Tabel 3.4 Spesifikasi <i>Phase Change Material</i>	28
Tabel 3.5 Spesifikasi Serbuk Silika	28
Tabel 3.6 Alat dan Bahan yang digunakan dalam Penelitian	29
Tabel 3.7 Massa <i>Paraffin Wax</i> berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM	34
Tabel 3.8 Massa <i>Paraffin Wax</i> dan Serbuk Silika berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM	34
Tabel 3.9 Parameter Input dalam Proses <i>Discharging</i> Baterai	39
Tabel 3.10 Hasil Pengukuran Waktu Kerja untuk Setiap Modul	40
Tabel 3.11 Parameter Model yang digunakan	43
Tabel 3.12 Kondisi Fase dari <i>Cellzone</i>	44
Tabel 3.14 <i>Setting</i> dari <i>Boundary Conditions</i> dalam Simulasi	44
Tabel 3.15 <i>Setting</i> dari <i>Solution Methods</i> dalam Simulasi	44
Tabel 3.16 Parameter Iterasi dan <i>Time Steps</i> dalam Simulasi	45

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Krisis energi merupakan suatu kondisi yang banyak dialami di berbagai negara dan cukup menjadi permasalahan yang serius. Setiap tahun, cadangan energi semakin menipis akibat dari upaya setiap negara untuk memenuhi kebutuhan energinya sendiri. Hal ini terjadi karena populasi manusia yang terus meningkat, yang mengakibatkan peningkatan konsumsi energi. Berdasarkan hal tersebut, kendaraan listrik dapat menjadi salah satu jalan keluar atas masalah tersebut (Sudjoko, 2021).

Pada kendaraan listrik terdapat baterai yang digunakan sebagai pemasok energi ke seluruh komponen kelistrikan pada kendaraan listrik. Salah satu jenis baterai yang paling umum digunakan sebagai sumber tenaga pada kendaraan listrik adalah baterai litium-ion. Baterai litium-ion menjadi salah satu penyimpanan energi yang cukup baik karena memiliki kepadatan energinya yang tinggi, kepadatan daya, tidak memiliki *memory effect*, jarak tempuh yang jauh dan kemampuan akselerasi yang cepat (Zhao et al., 2015). Baterai Li-ion mempunyai suhu operasi yang optimal berkisar antara 25-50°C. Untuk mencapai kecepatan yang lebih tinggi, waktu pengisian yang lebih cepat, ataupun *charging/discharging* yang cepat akan memberikan tantangan pada kinerja pada daya baterai dan sistem manajemen baterai (Behi et al., 2020). Peningkatan kebutuhan energi dan daya yang lebih tinggi untuk kendaraan listrik atau aplikasi penyimpanan energi berskala besar dapat menyebabkan kekhawatiran hingga menimbulkan risiko keselamatan. Kondisi operasi yang dilakukan di luar batas, seperti suhu lingkungan yang tinggi, korsleting, dan pengisian daya yang berlebihan dapat menyebabkan *overheating* pada baterai. *Overheating* pada baterai Li-ion dapat terjadi karena akumulasi panas yang cepat di dalam baterai dan menyebabkan peningkatan kinerja baterai. Panas yang berlebihan dapat menyebabkan risiko kebakaran hingga ledakan. (Peng & Jiang, 2016). Pengoperasian di luar kisaran suhu tersebut dapat berdampak pada kinerja pengisian dan pengosongan baterai litium. Oleh karena itu, sistem manajemen termal baterai yang sesuai sangat penting untuk kinerja dan keamanan paket baterai (Yi et al., 2022).

Sistem manajemen termal yang baik dapat mengontrol suhu baterai dan meminimalkan gradien suhu dalam kemasan baterai. Secara umum, sistem manajemen termal pada baterai dibagi menjadi internal dan eksternal. Pada sistem manajemen termal secara internal, biasanya dilakukan dengan memodifikasi desain elektroda untuk mengurangi panas yang terjadi selama reaksi elektrokimia. Sedangkan pada sistem manajemen termal secara eksternal, dilakukan dengan menambah material atau sejenis sistem pendingin tanpa mengubah komponen dalam baterai (Zhao et al., 2015). *Battery Thermal Management System (BTMS)* berfungsi untuk menyerap atau mentransfer panas yang dihasilkan oleh baterai keluar dari modul melalui suatu media. Terdapat berbagai metode dalam manajemen termal baterai, yaitu *air cooling*, *liquid cooling*, dan *Phase Change Material (PCM)* (Yi et al., 2022). Sistem manajemen termal pada baterai meliputi *air cooling* dan *liquid cooling* memang dapat memberikan pendinginan pada baterai yang efisien. Namun, sistem ini tergolong rumit dan mahal dari segi investasi dan *maintenance* dikarenakan menggunakan banyak perangkat lain (Sun et al., 2019).

Phase Change Material merupakan suatu bahan yang dapat menyimpan atau menyerap energi panas yang dihasilkan dari baterai, dimana melebur menjadi cairan dan mengeluarkan panas ke sekitarnya. Hal ini membuat PCM dapat menjadi alternatif yang menjanjikan untuk media pendingin pada manajemen termal baterai karena kemampuannya dalam menyerap panas. Sistem manajemen termal pada baterai berbasis PCM lebih mudah dalam perawatannya dan memerlukan biaya yang lebih rendah (Sun et al., 2019). Penggunaan PCM dapat

menurunkan suhu dan memungkinkan distribusi suhu yang lebih seragam di dalam baterai (Ianniciello et al., 2018).

PCM yang paling umum digunakan dalam sistem manajemen termal pada baterai, yaitu *paraffin*. *Paraffin* memiliki konduktivitas termal yang rendah sehingga menunjukkan laju transfer panas yang rendah dalam PCM. Oleh karena itu, untuk mengatasi keterbatasan ini dapat dilakukan dengan menambahkan material *filler* berkonduktivitas tinggi, seperti serbuk grafit, serbuk aluminium, serbuk kaca, ataupun serbuk tembaga. Seperti pada penelitian yang dilakukan Reddy, P., dkk (2018), penambahan serbuk grafit pada campuran *paraffin* dengan komposisi 70% *paraffin* dapat meningkatkan nilai konduktivitas termal hingga 7,1 W/mK.

Berdasarkan uraian dari beberapa literatur, efektifitas pembuangan panas menggunakan metode PCM pada baterai litium-ion dipengaruhi oleh material yang ditambahkan dan disisipkan pada PCM untuk meningkatkan kinerja PCM. Hal ini menunjukkan, bahwa sangat penting untuk mempelajari secara detail bagaimana bahan-bahan *filler* pada PCM komposit mempengaruhi laju pemanasan permukaan baterai litium-ion. Sehingga, dalam penelitian tugas akhir ini, penulis akan menganalisis pengaruh variasi material *filler* serbuk silika dan nilai ketebalan pada PCM komposit terhadap peningkatan temperatur pada permukaan baterai litium-ion selama proses *discharging*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat dituliskan rumusan masalah untuk penelitian tugas akhir adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi rasio *filler* serbuk silika pada PCM komposit terhadap kenaikan temperatur pada permukaan baterai litium-ion ketika proses *discharging*?
2. Bagaimana pengaruh perbedaan ketebalan dari PCM komposit yang digunakan terhadap kenaikan temperatur pada permukaan baterai litium-ion ketika proses *discharging*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang dan permasalahan maka tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi rasio *filler* serbuk silika pada PCM komposit terhadap kenaikan temperatur pada permukaan baterai litium-ion ketika proses *discharging*
3. Mengetahui pengaruh perbedaan ketebalan dari PCM komposit yang digunakan terhadap kenaikan temperatur pada permukaan baterai litium-ion ketika proses *discharging*

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan lebih terfokuskan, maka diperlukan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian menggunakan baterai Li-Ion VRK IMR18650 dengan kapasitas 3000 mAh berbentuk silinder
2. Modul baterai dalam campuran PCM komposit akan dibuat dengan geometri yang sama
3. Penelitian akan difokuskan pada peningkatan temperatur yang terjadi pada permukaan baterai litium-ion
4. Perpindahan panas yang akan dipertimbangkan hanya yang terjadi melalui konduksi dan konveksi.
5. Efek perubahan volume pada PCM saat eksperimen diabaikan
6. Studi eksperimen dilakukan dalam *styrofoam box* sehingga pengaruh lingkungan di luar *styrofoam box* dapat diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian di atas, manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

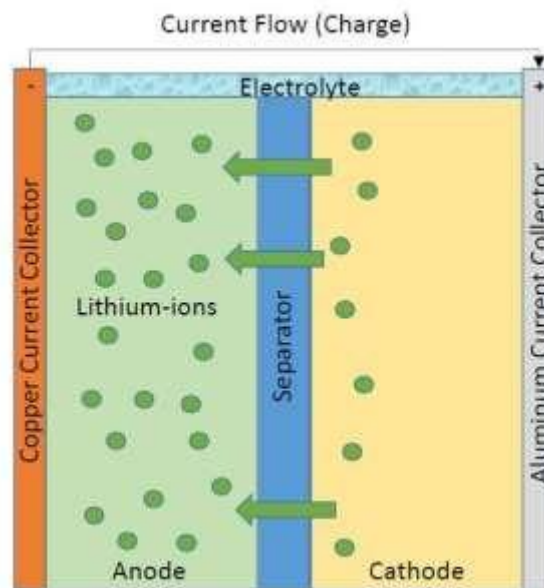
1. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi baterai litium-Ion yang lebih efektif dan aman
2. Menemukan kinerja optimal dari PCM komposit dalam membuang panas pada baterai litium-ion, sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk pengembangan desain pendinginan baterai lebih baik di masa depan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Baterai Litium-Ion

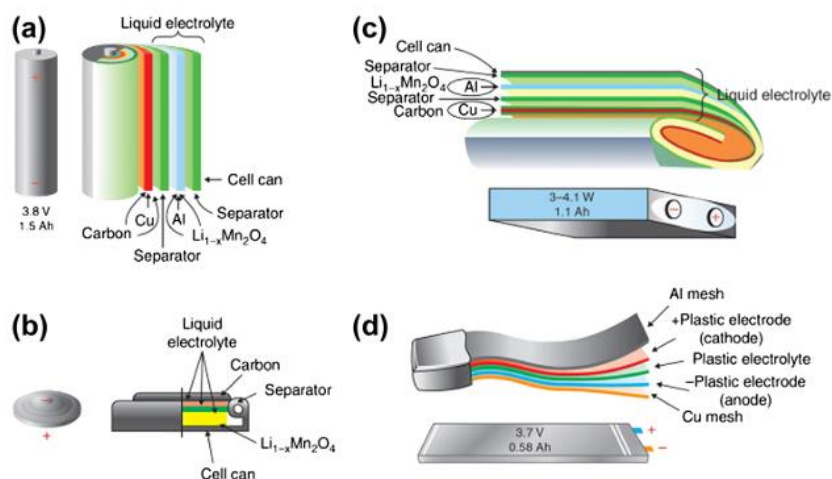
Secara teori, baterai litium adalah baterai yang digerakkan oleh ion litium. Baterai litium-ion merupakan salah satu jenis baterai dengan sumber arus sekunder yang dapat diisi ulang. litium-ion menjadi baterai yang paling banyak dipilih untuk digunakan pada peralatan elektronik karena memiliki densitas energi yang lebih besar daripada baterai lain di pasaran. Baterai litium-ion bekerja seperti pada jenis baterai lainnya, Dimana pada proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) terjadi ketika ion-ion litium bergerak dari satu elektroda ke elektroda lainnya melalui elektrolit. Pada saat proses *charging*, diawali dengan ion-ion litium yang semula berada pada katoda akan berpindah ke anoda melalui elektrolit. Sedangkan, pada proses *discharging* ditandai dengan ion-ion litium yang semula berada pada anoda akan kembali ke katoda melalui elektrolit.



Gambar 2.1 Komponen Sel dan Aliran Ion Litium pada Sel Baterai
(Warner, 2015)

2.1.1 Komponen Baterai Litium-Ion

Baterai litium-ion memiliki komponen yang relatif sedikit di dalamnya karena hanya terdapat sekitar lima komponen utama dan jika disusun dalam daftar bahan untuk sebuah sel mungkin hanya memiliki antara 10 hingga 20 item. Terlepas dari faktor bentuk, komponen utama sel pada baterai ini adalah katoda, yang merupakan sebuah aluminium foil dalam banyak desain yang dilapisi dengan bahan aktif katoda. Komponen kedua yaitu anoda, yang merupakan foil tembaga yang dilapisi dengan bahan aktif anoda. Kedua foil yang dilapisi ini dipisahkan melalui penggunaan bahan pemisah yang paling sering dibuat dari beberapa jenis plastic polipropilena (PP) atau polietilena (PE). Komponen ini membentuk gulungan jeli atau *jellyroll*, yang kemudian dimasukkan ke dalam wadah atau rumah. Wadah ini dapat berupa kaleng logam, selungkup plastik, atau kantong jenis foil logam. Dalam rakitan ini kemudian disuntikkan cairan elektrolitik dan seluruh rakitan kemudian ditutup rapat dan siap untuk melanjutkan ke tahap pembuatan sel berikutnya.



Gambar 2.2 Komponen Sel Litium-Ion Prismatik (Warner, 2015)

2.1.2 Karakteristik Baterai Litium-Ion

Baterai litium-ion selain memiliki voltase dan densitas energi yang lebih tinggi, juga memiliki tingkat *self-discharge* yang lebih rendah. Hal ini berarti bahwa kapasitas alamnya akan berkurang seiring waktu ketika baterai berada dalam penyimpanan lebih sedikit dibandingkan dengan bahan kimia lainnya dengan banyak bahan kimia litium-ion yang hanya kehilangan 1-5% per bulan. Bahan kimia pada baterai litium-ion cenderung memiliki siklus hidup yang jauh lebih baik daripada bahan kimia lainnya. litium-ion dapat mencapai ribuan siklus pengosongan penuh sebelum mencapai *end of life* (EOL) selama siklus 100% *depth of discharge* (DOD). Performa baterai litium-ion telah mengalami peningkatan yang signifikan sehingga membuatnya banyak digunakan sebagai teknologi baterai *rechargeable* baru yang memiliki banyak kelebihan.

	Lithium Iron Phosphate	Lithium Manganese Oxide	Lithium Titanate	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Nickel Cobalt Aluminum	Lithium Nickel Manganese Cobalt
Cathode chemistry descriptor	LFP	LMO	LTO	LCO	NCA	NMC
Specific energy (Wh/kg)	80-130	105-120	70	120-150	80-220	140-180
Energy density (Wh/L)	220-250	250-265	130	250-450	210-600	325
Specific power (W/kg)	1400-2400	1000	750	600	1500-1900	500-3000
Power density (W/L)	4500	2000	1400	1200-3000	4000-5000	6500
Volts (per cell) (V)	3.2-3.3	3.8	2.2-2.3	3.6-3.8	3.6	3.6-3.7
Cycle life	1000-2000	>500	>4000	>700	>1000	1000-4000
Self-discharge (% per month)	<1%	5%	2-10%	1-5%	2-10%	1%
Cost (per kWh)	\$400-\$1200	\$400-\$900	\$600-\$2000	\$250-\$450	\$600-\$1000	\$500-\$900
Operating temperature range (°C)	-20 to +60	-20 to +60	-40 to +55	-20 to +60	-20 to +60	-20 to +55

Gambar 2.3 Kimiawi Litium-Ion (Warner, 2015)

2.2 Sistem Manajemen Termal pada Baterai

Sistem Manajemen Termal pada Baterai atau *Battery Pack Thermal Management System* (BTMS) merupakan sebuah sistem kendali pada baterai yang tersusun dari satu atau lebih pengontrol elektronik yang berfungsi untuk mengatur agar proses *charging* dan *discharging* terjadi dengan baik, juga mengawasi suhu dan tegangan pada baterai dan menghubungkannya ke sistem pada kendaraan listrik, menyeimbangkan reaksi pada sel, dan juga berfungsi untuk keamanan pada baterai (Warner, 2015). Saat ini, sistem manajemen termal eksternal adalah yang paling banyak digunakan. Namun, masalah utama dengan sistem tersebut adalah penerapannya yang rumit, biaya, kurangnya keandalan, dan sistem tersebut terus-menerus mengonsumsi energi untuk memastikan manajemen termal baterai. Sistem manajemen termal melalui penggunaan PCM merupakan alternatif untuk mencapai manajemen termal pasif dan untuk memastikan bahwa suhu baterai tetap dalam kisaran yang diinginkan (Ianniciello et al., 2018).

2.3 Metode Pendinginan pada Baterai Litium-Ion

Terdapat empat teknik utama untuk mendinginkan baterai, diantaranya yaitu pendinginan udara (*air cooling*), pendinginan cairan (*liquid cooling*), *Boiling*, dan *PCM systems* (Landini et al., 2019). Teknik pendinginan terbagi menjadi teknik pendinginan yang memanfaatkan sistem manajemen termal aktif dan yang memanfaatkan sistem manajemen termal pasif. Manajemen termal aktif melibatkan penggunaan beberapa media, seperti udara atau cairan yang dipaksa melalui kemasan dan melewati sel dan elektronik untuk mengurangi suhu. Manfaatnya, sistem ini relatif efektif dalam merespons perubahan suhu yang cepat. Sedangkan manajemen termal pasif merupakan proses mengelola suhu sel dan kemasan tanpa memaksa udara, cairan, atau media pendingin lainnya ke dalam kemasan. Pada manajemen termal pasif dapat melalui penggunaan bahan pengubah fase (PCM). Saat sel baterai memanaskan, PCM menyerap panas dan menyebarkannya ke seluruh PCM. Manfaat terbesar dari manajemen termal pasif adalah biayanya, karena tidak ada perangkat keras tambahan yang diperlukan untuk mendinginkan sistem dan biayanya akan lebih rendah daripada sistem manajemen termal berpendingin udara atau berpendingin cairan (Warner, 2015).

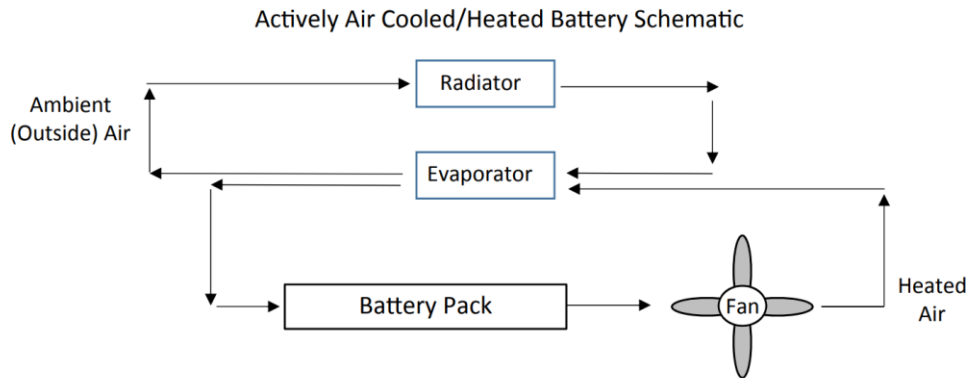
	Advantages	Disadvantages
Air cooling	Low cost Simple design Highly commercialised	Low h (i.e. low η and high volumes) High T gradients Noise issues
Liquid cooling	Good h (i.e. high η and low volumes) Medium T gradients Highly commercialised	Safety issues (leakages) Complex design High costs, weights and maintenance
HPS	High h (i.e. high η and low volumes) High operating life	High costs Non commercialised
Boiling	High h T uniformity	Non commercialised Complex operation
PCM	High thermal energy density T uniformity	Low thermal conductivity (low powers) Potential liquid leakage due to volume expansion

Gambar 2.4 Kelebihan dan Kekurangan Teknik Pendinginan pada sel Li-Ion (Landini et al., 2019)

2.3.1 Metode Air Cooling

Pendinginan udara atau Air Cooling adalah teknik dalam sistem manajemen termal yang banyak digunakan dengan karakteristik desain sederhana, biaya rendah, tetapi juga kinerja termal yang rendah karena sifat termo-fisik udara pada kondisi operasi dan ketidakseragaman suhu sel yang tinggi. Namun, hal tersebut dapat diperbaiki diantaranya

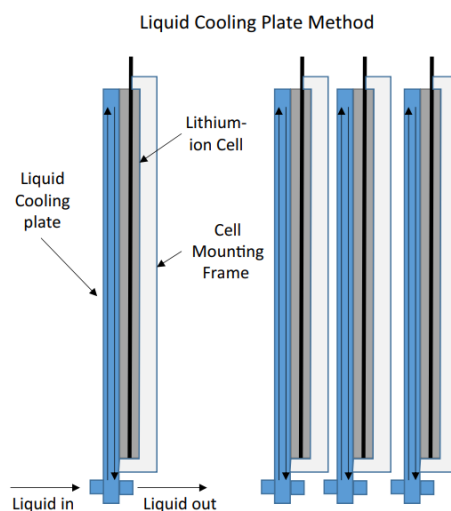
dengan cara meningkatkan laju aliran udara, mengoptimalkan tata letak baterai dengan memanfaatkan penggunaan ruang yang luas antar sel sehingga dapat meningkatkan turbulensi aliran udara dan mengarah pada energi yang lebih rendah, kemudian jalur aliran udara yang memungkinkan keseragaman suhu yang lebih baik, integrasi struktur logam atau busa konduktif tinggi atau sirip (fin) untuk meningkatkan konduktivitas panas yang setara dengan aliran udara (Landini et al., 2019).



Gambar 2.5 Skema Air Cooling
(Warner, 2015)

2.3.2 Metode Liquid Cooling

Terdapat dua sistem yang utama dari pendingin cairan atau liquid cooling, yaitu sistem pendingin cairan aktif dan juga sistem pendingin pasif. Namun, karena sistem pendingin cairan pasif tidak menjamin kinerja yang lebih tinggi dibandingkan dengan konvensi tekanan udara, hanya pendingin cairan aktif yang digunakan karena efek menguntungkan dari koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi ($350-400 \text{ W/m}^2\text{K}$ dibandingkan dengan $5-25 \text{ W/m}^2\text{K}$ pada pendingin udara) (Landini et al., 2019). Manfaat dari sistem pendingin cair adalah media yang cukup efektif untuk memindahkan panas dengan cepat dari sel (Warner, 2015).

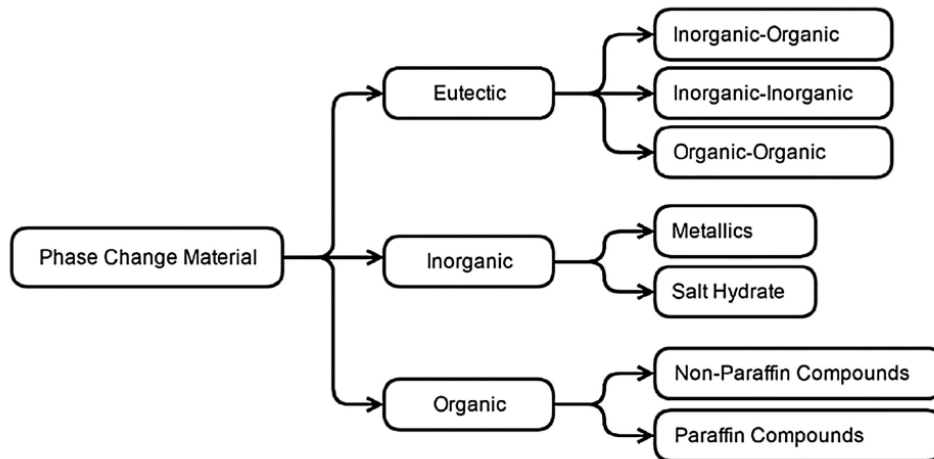


Gambar 2.6 Pelat pada Skema Liquid Cooling
(Warner, 2015)

2.4 Phase Change Material

PCM adalah bahan yang mampu menyimpan energi panas secara reversible baik dalam bentuk sensible maupun laten dan kemudian melepaskannya dengan proses sebaliknya. Ketika

suhu pada sel baterai naik, PCM menyerap dan menyimpan energi terlebih dahulu dalam bentuk yang sensible, dan kemudian dalam bentuk laten ketika mencapai suhu perubahan fasa. Ketika suhu menurun di bawah suhu perubahan fasa, PCM akan kembali ke fase awal dan akan melepaskan energi yang tersimpan dalam proses tersebut (Ianniciello et al., 2018). Ada tiga kategori dalam PCM, yaitu PCM organik, PCM anorganik, dan eutektik.



Gambar 2.7 Klasifikasi PCM Berdasarkan Komposisi Material (Landini et al., 2019)

2.4.1 PCM Organik

Senyawa organik umumnya adalah senyawa yang mengandung karbon. Dalam hal ini, di antara PCM organik terdapat material *paraffin* dan *non-paraffin*. Suhu fusi dan panas laten fusi pada *paraffin* meningkat dengan panjang rantai karbon. Kisaran suhu fusi antara 5,5°C dan 76°C dan umumnya perubahan fasanya tidak bersifat iso-termal. *Paraffin* bersifat stabil (tidak ada degradasi seiring dengan waktu) pada kisaran ratusan derajat, inert, dan tidak korosif. Namun, *paraffin* mudah terbakar dan memiliki konduktivitas termal yang buruk yang menyebabkan gradien termal yang tinggi selama pengisian dan pengosongan. Jenis PCM Organik lainnya *non-paraffin*, diantaranya yaitu ester, asam lemak, alkohol, glikol, dan lain sebagainya. Pada umumnya, PCM organik menunjukkan perubahan fase dari fase padat ke fase cair. Perubahan fase ini ditandai dengan modifikasi pada kisi kristal material. PCM tersebut memiliki keuntungan karena tidak memerlukan wadah karena tidak terkena kebocoran dan variasi volumenya rendah (Ianniciello et al., 2018).

2.4.2 PCM Anorganik

Senyawa anorganik umumnya memiliki satu atau lebih atom logam. Salt hydrates atau garam yang dihidrasi merupakan salah satu PCM anorganik. Secara umum, pada suhu perubahan fase, larutan menjadi jenuh dan mulai mengkristal. Senyawa tersebut memiliki konduktivitas termal dan panas laten yang baik, ekspansi termal yang rendah, tidak mudah terbakar, dan tidak beracun. Namun, korosif dan reversibilitas perubahan fasa sulit dipertahankan dalam jangka panjang. Logam juga merupakan PCM anorganik dengan konduktivitas termal yang baik tetapi dengan kepadatan yang tinggi. Material ini tidak begitu populer karena berat dan suhu perubahan fasanya tinggi (Ianniciello et al., 2018).

2.4.3 Eutektika

Eutektika adalah campuran spesifik dari kategori sebelumnya yang menghambat fusi isothermal dan kristalisasi. Teknik ini memungkinkan untuk mendapatkan PCM dengan

sifat yang berbeda dari bahan murni (Ianniciello et al., 2018). Campuran eutektik adalah campuran dari dua atau lebih PCM yang pada komposisi tertentu akan meleleh pada suhu tunggal (Landini et al., 2019).

2.5 Serbuk Silika

Secara kimiawi, bahan silikat yang paling sederhana adalah silicon dioksida atau silika (SiO_2). Silika dapat dibuat sebagai padatan non-kristal atau kaca yang memiliki tingkat keacakan atom yang tinggi, yang merupakan karakteristik cairan. Bahan atau material tersebut disebut *fused silica* atau *vitreous silica*. Gelas anorganik umum yang digunakan pada wadah, jendela, dan sebagainya adalah *silica glass* atau kaca silika yang telah ditambahkan oksida lain. Kaca silika memiliki karakteristik yaitu ketahanan terhadap suhu tinggi dan transparansi optik, menjadikan kaca silika sebuah material yang mudah untuk dimanfaatkan (Callister & Rethwisch, 2010).

2.6 Heat Generation pada Baterai Litium-Ion

Pada baterai Li-ion, terdapat dua sumber panas utama, yaitu panas yang dilepaskan oleh efek Joule (berasal dari resistensi terhadap transfer muatan dalam akumulator) dan panas yang dilepaskan oleh reaksi elektro-kimia. Terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi *heat generation*, diantaranya yaitu *solicitation* (arus pengisian dan pengosongan baterai) karena untuk permintaan yang tinggi, efek Joule sangat dominan dan suhunya tinggi. Kemudian terdapat *state of charge* (SOC) atau status pengisian daya, yang berhubungan dengan kuantitas energi yang tersisa di dalam baterai, dan *depth of discharge* (DOD) yang berhubungan dengan kuantitas energi yang dilepaskan dari baterai, yang diberikan dalam bentuk persentase kapasitas. Keduanya terkait dengan fenomena elektro-kimia dan difusi ion litium. Selain itu, suhu di dalam baterai juga mempengaruhi pembangkitan panas karena ketika suhu baterai tinggi, maka reaksi elektrokimia akan terstimulasi dan resistansi internal menurun. Selanjutnya, kimiawi dari akumulator karena sifat material memiliki pengaruh besar pada sumber panas (Ianniciello et al., 2018). Temperatur baterai ditentukan oleh Q_{gen} yang terdiri dari panas hasil reaksi *reversible heat* (Q_{rev}) dengan *irreversible heat* (Q_{irr}). Tegangan selanjutnya, panas yang dihasilkan dari adanya pertukaran arus dalam resistensi Q_j dapat dihitung menggunakan persamaan Bernardi seperti berikut.

$$Q = Q_{irr} - Q_{rev} \quad (2.1)$$

$$Q_{irr} = I(OCV - U) \quad (2.2)$$

$$= I^2 R_e \quad (2.3)$$

Dimana:

Q : Total *heat generation* (W)

Q_{irr} : *Irreversible heat generation* (W)

Q_{rev} : *Reversible heat generation* (W)

I : *Discharge current* (A)

OCV : *Open circuit voltage* (Volt)

U : *Nominal voltage* (Volt)

R_e : Resistensi Dalam

Panas yang dihasilkan dari reaksi elektrokimia dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.1) berikut.

$$Q_{rev} = T \Delta S \left(\frac{I}{nF} \right) \quad (2.4)$$

$$= I \left[T \left(\frac{dOCV}{dT} \right) \right] \quad (2.5)$$

Dimana:

Q_{rev} : Reversible heat generation
 T : Temperatur (K)
 ΔS : Perubahan entropi (J/s.K)
 I : Discharge current (A)
 n : number of the flow electron
 F : Konstanta Faraday (9658,5 C/mol)
 $\frac{dOCV}{dT}$: Koefisien entropi

Sehingga Q dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$Q = I(OCV - U) - I \cdot \left[T \cdot \left(\frac{dOCV}{dT} \right) \right] \quad (2.6)$$

Dimana:

I : Discharge current (A)
 OCV : Open circuit voltage (Volt)
 U : Nominal voltage (Volt)
 T : Temperatur (K)
 $\frac{dOCV}{dT}$: Koefisien entropi

Untuk mencari *heat generation* pada baterai litium-ion, nilai dari resistensi dalam dan koefisien entropi harus ditentukan. Penelitian *Hybrid Pulse Power Characterization* (HPCC) dari Jiaqiang telah telah mengembangkan fungsi resistensi dalam dan koefisien entropi. Berdasarkan penelitian tersebut, *heat generation* per unit baterai untuk suatu volume baterai dapat dilakukan perhitungan secara volumetric yaitu sebagai berikut.

$$Q_b = \frac{Q}{V_b} \quad (2.7)$$

$$Q_b = \frac{1}{V_b} \left[I (OCV - U) - I \cdot \left(T \cdot \frac{dOCV}{dT} \right) \right] \quad (2.8)$$

Dimana:

V_b : Volume baterai

2.7 Thermal Conductivity

Konduktivitas termal merupakan kemampuan dari suatu material dalam menghantarkan panas Nilainya menentukan seberapa cepat panas dapat berpindah melalui suatu material. PCM dengan material *paraffin* mempunyai kelemahan, yaitu konduktivitas nya yang rendah daripada jenis PCM yang lainnya. Oleh karena itu diperlukannya tambahan material filler yang memiliki konduktivitas tinggi dalam PCM agar kinerjanya dapat optimal dalam menghantarkan panas. Konduktivitas thermal pada PCM komposit meningkat seiring dengan peningkatan ratio massa material filler terhadap massa PCM. Namun saat sudah mencapai nilai optimalnya, jika material filler semakin ditambahkan lagi, maka konduktivitas thermal akan berhenti meningkat karena adanya aglomerasi nanopartikel (Lin et al., 2018).

Total nilai konduktivitas termal antara campuran PCM dan material filler dapat ditentukan secara analitis dengan menggunakan persamaan Neilsen, yang dirumuskan sebagai berikut.

$$\phi = \frac{\frac{m_{filler}}{\rho_{filler}}}{\frac{m_{filler}}{\rho_{filler}} + \frac{m_{paraffin}}{\rho_{paraffin}}} \quad (2.9)$$

$$K = \frac{(1+A \cdot B \cdot \phi)}{(1-B \cdot \psi \cdot \phi)} \quad (2.10)$$

$$B = \frac{\frac{k_f}{k_p} - 1}{\frac{k_f}{k_p} + A} \quad (2.11)$$

$$\psi = 1 + \frac{(1-\phi_m)\phi}{\phi_m^2} \quad (2.12)$$

Dimana:

- K : *Thermal conductivity* dari komposit (W/mK)
 k_p : *Thermal conductivity* dari *paraffin wax* (W/mK)
 k_f : *Thermal conductivity* dari *filler material* (W/mK)
 ϕ : *Volume fraction* dari *filler material*
 ϕ_m : Ukuran serbuk dari *filler material* (m)
 ψ : Konstanta berdasarkan *volume fraction* dari *filler material*
 m_{filler} : Massa material *filler* (kg)
 ρ_{filler} : Nilai massa jenis material *filler* (kg/m³)
 $m_{paraffin}$: Massa *paraffin wax* (kg)
 $\rho_{paraffin}$: Nilai massa jenis *paraffin wax* (kg/m³)
 A : Konstanta yang menentukan bentuk dari material *filler*
 B : Konstanta yang didapatkan berdasarkan *thermal conductivity* dari material *filler* dan matriks

2.8 Perhitungan Massa Jenis dan Karakteristik Termal PCM Komposit

Karakteristik termal dari PCM komposit dapat diketahui dengan menghitung nilai kalor laten, specific heat, dan thermal diffusivity nya. Ketiga nilai tersebut dapat dihitung berdasarkan perhitungan volume fraction dari PCM komposit. Volume fraction dari PCM dengan material filler dapat menentukan seberapa besar panas yang dapat diserap oleh PCM. Nilai volume fraction dapat digunakan untuk menentukan massa jenis PCM komposit, yang ditentukan dengan persamaan berikut (Nomura et al., 2015).

$$\rho_{comp} = \phi \rho_{filler} + (1 - \phi) \rho_{paraffin} \quad (2.13)$$

Dimana:

- ρ_{comp} : Densitas PCM komposit (kg/m³)
 ϕ : *Volume fraction filler*
 ρ_{filler} : Densitas material *filler* (kg/m³)
 $\rho_{paraffin}$: Densitas *paraffin wax* (kg/m³)

Untuk menghitung *specific heat* PCM komposit ($C_{p\ comp}$) melalui pengukuran secara langsung dapat menggunakan persamaan berikut.

$$C_{p\ comp} = \frac{\phi(C_{p\ filler} \cdot \rho_{filler}) + (1-\phi)(C_{p\ paraffin} \cdot \rho_{paraffin})}{\rho_{comp}} \quad (2.14)$$

Dimana:

- $C_{p\ comp}$: *Specific heat* PCM komposit (J/kg.K)
 $C_{p\ filler}$: *Specific heat* material *filler* (J/kg.K)
 $C_{p\ paraffin}$: *Specific heat* *paraffin wax* (J/kg.K)

φ : Volume fraction filler
 ρ_{comp} : Densitas PCM komposit (kg/m³)

Selanjutnya, untuk menghitung nilai kalor laten PCM komposit (L_{comp}) dapat menggunakan persamaan berikut.

$$L_{comp} = \frac{(1-\varphi)(\rho_{filler} \cdot L_{paraffin})}{\rho_{comp}} \quad (2.15)$$

Dimana:

L_{comp} : Nilai kalor laten PCM komposit (J/kg)
 φ : Volume fraction filler
 ρ_{filler} : Nilai Massa Jenis material filler (kg/m³)
 $L_{paraffin}$: Nilai kalor laten paraffin wax (J/kg)

Thermal diffusivity merupakan perbandingan kemampuan suatu material dalam melepas/mentransfer/mendifusikan panas terhadap kemampuan material dalam menyimpan panas (specific heat). Performa dari PCM komposit dalam menurunkan peningkatan temperatur baterai dapat ditentukan secara teoritis dengan menghitung nilai *thermal diffusivity* nya. Nilai dari *thermal diffusivity* dari PCM komposit (α_{comp}) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$\alpha_{comp} = \frac{k_{comp}}{\rho_{comp} \cdot c_{p\ comp}} \quad (2.16)$$

Dimana:

α_{comp} : Thermal diffusivity (m²/s)
 k_{comp} : Thermal conductivity dari komposit (W/m.K)
 ρ_{comp} : Densitas PCM komposit (kg/m³)
 $c_{p\ comp}$: Specific heat PCM komposit (J/kg.K)

2.9 Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan energi panas yang berpindah karena adanya perbedaan suhu spasial. Ketika ada perbedaan suhu dalam suatu media atau di antara media, maka perpindahan panas umumnya terjadi. Terdapat tiga macam cara perpindahan panas, di antaranya yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Istilah konduksi merujuk pada perpindahan panas yang akan melewati media tersebut. Sedangkan konveksi mengacu pada perpindahan panas yang akan terjadi antara permukaan dan fluida yang bergerak ketika berada pada suhu yang berbeda. Radiasi sendiri merujuk pada perpindahan panas yang terjadi tidak melalui media perantara (Bergman et al., 2011).

2.9.1 Konduksi

Proses mengalirnya panas dari area dengan suhu yang tinggi ke area yang memiliki suhu lebih rendah dalam satu medium (padat, cair, maupun gas) atau antara dua medium yang bersinggungan secara langsung merupakan definisi dari konduksi. Pada aliran panas konduksi, perpindahan energi terjadi karena adanya hubungan molekul secara langsung tanpa perpindahan molekul yang cukup besar (Supu et al., 2016). Untuk menghitung laju perpindahan panas secara konduksi dihitung menggunakan persamaan *fourier* yang dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$Q_k = -kA \frac{\Delta T}{x} \quad (2.17)$$

Dimana:

Q_k : Laju perpindahan panas (Watt)

A : Luas perpindahan panas (m^2)
 ΔT : Gradien suhu pada penampang (K)

2.9.2 Konveksi

Konveksi merupakan proses perpindahan panas yang terjadi dengan cara panas akan mengalir secara konduksi dari permukaan ke partikel-partikel fluida yang berbatasan. Perpindahan energi tersebut akan menaikkan suhu dan energi partikel fluida dan kemudian partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang memiliki suhu lebih rendah di dalam fluida (Supu et al., 2016). Untuk menghitung perpindahan panas secara konveksi dinyatakan dalam persamaan berikut.

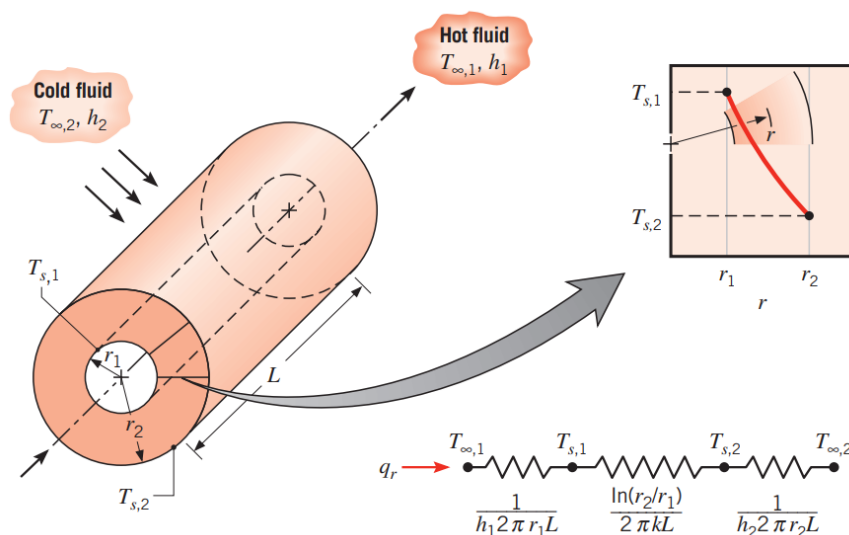
$$q = hA(T_w - T_f) \quad (2.18)$$

Dimana:

q : Laju perpindahan panas ($Watt$)
 A : Luas perpindahan panas (m^2)
 T_w : Temperatur dinding (K)
 T_f : Temperatur fluida (K)
 h : Koefisien perpindahan panas (W/m^2)

2.9.3 Tahanan Termal pada Silinder

Sistem silinder dan sistem berbentuk *spherical* seringkali hanya mengalami gradien suhu dengan arah radial. Oleh karena itu dapat dianggap sebagai sistem *one dimensial*. Sistem silinder dapat dianalisis menggunakan standar metode, yang dimulai dengan bentuk persamaan kalor yang sesuai, atau metode alternatif, yang dimulai dengan hukum Fourier yang sesuai. Untuk menganalisis thermal pada baterai dengan bentuk PCM silinder, pengukuran thermal yang menggunakan metode standar (Bergman et al., 2011).



Gambar 2.8 Perpindahan Panas pada Dinding Silinder dan Rangkaian Termal (Bergman et al., 2011)

Gambar 2.8 merupakan persebaran/distribusi panas pada silinder berongga dengan permukaan konduktif. Untuk kondisi *steady-state* tanpa adanya *heat generation*/pembangkitan panas, bentuk persamaan panas yang sesuai adalah sebagai berikut.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (kr \frac{dT}{dr}) = 0 \quad (2.19)$$

Dimana:

- r : Jarak radial dari pusat silinder (r)
- k : Konduktivitas termal material dinding silinder (K)
- T : Suhu pada jarak radial r (K)

Persamaan (2.10) dapat dihubungkan dengan *Fourier's Law* dari persamaan (2.8), sehingga dapat dibentuk persamaan laju perpindahan panas sebagai berikut.

$$q_r = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2.20)$$

Dimana:

- qr : Laju perpindahan panas dalam arah radial (Watt)
- $2\pi rL$: Area permukaan silinder yang normal arah terhadap perpindahan panas
- L : Tinggi silinder (m)

Dengan *boundary condition* $T_{s,1}$ (temperatur pada jari-jari dalam), $T_{s,2}$ (temperatur pada jari-jari luar), maka dapat dibentuk persamaan akhir dari laju perpindahan panas pada silinder, yaitu sebagai berikut.

$$q_r = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{R_{t,cond}} \quad (2.21)$$

Dimana:

- $T_{s,1}$: Temperatur pada jari-jari dalam (K)
- $T_{s,2}$: Temperatur pada jari-jari luar (K)
- $R_{t,cond}$: Tahanan Termal (K/W)

Tahanan termal dapat didefinisikan sebagai rasio energi dan laju perpindahan panas. Rumus tahanan termal pada silinder ditulis pada persamaan berikut.

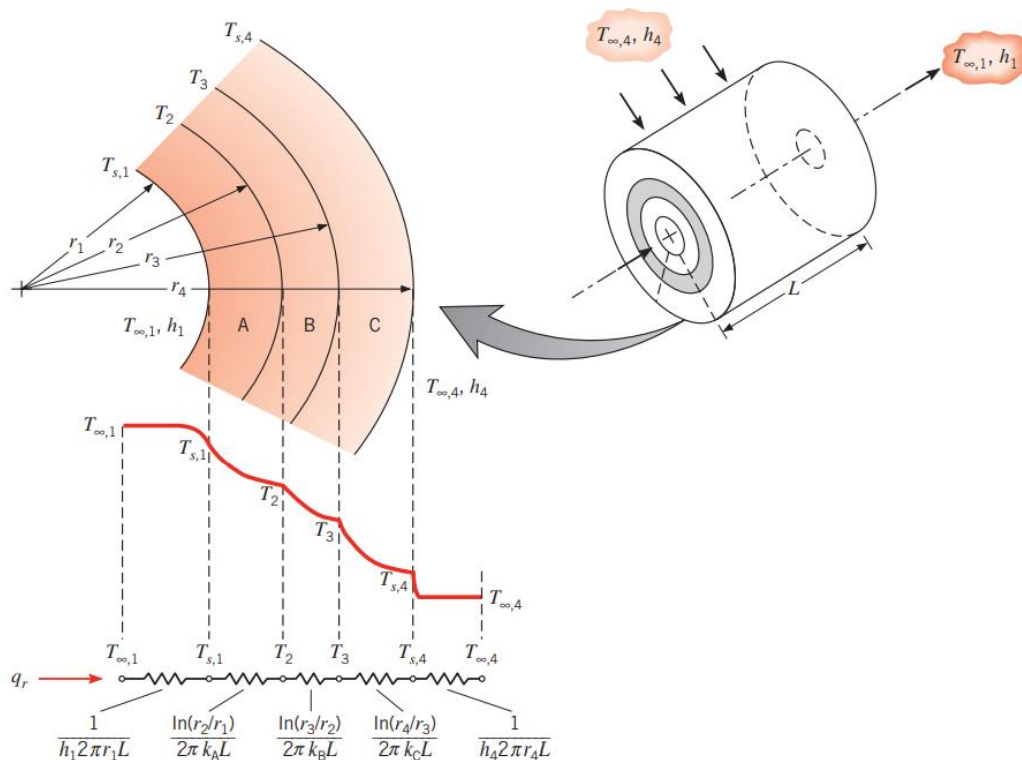
$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (2.22)$$

Dimana:

- r_1 : Jari-jari dalam dinding silinder (K)
- r_2 : Jari-jari luar dinding silinder (K)

2.9.4 Overall Heat Transfer Coefficient

Overall heat transfer coefficient berhubungan dengan total tahanan termal. Pada sistem komposit atau perpindahan panas pada material yang berbeda-beda terdapat perbedaan distribusi temperatur pada masing-masing material sehingga digunakan *overall temperature distribution*. Laju perpindahan panas dapat dihubungkan dengan perbedaan temperatur dan tahanan termal. Gambaran rangkaian tahanan termal pada dinding komposit dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 Perpindahan Panas pada Dinding Silinder Komposit dan Rangkaian Termal (Bergman et al., 2011)

Perhitungan tahanan termal total untuk silinder komposit melibatkan penjumlahan resistensi dari masing-masing lapisan dan dituliskan pada persamaan (2.14) berikut.

$$R_{t,cond} = \frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L} + \frac{1}{2\pi r_4 L h_4} \quad (2.23)$$

Dimana:

- h_1 : Koefisien perpindahan panas pada permukaan dalam silinder ($W/m^2.K$)
- h_4 : Koefisien perpindahan panas pada permukaan luar silinder ($W/m^2.K$)
- r_1 : Jari-jari dalam silinder (m)
- r_2, r_3, r_4 : Jari-jari pada batas-batas lapisan silinder komposit (m)
- k_A, k_B, k_C : Konduktivitas termal untuk masing-masing lapisan komposit (W/mK)
- L : Tinggi silinder (m)

Berdasarkan persamaan (2.15), maka laju perpindahan panas untuk silinder komposit adalah sebagai berikut.

$$q_r = \frac{T_{s,1} - T_{s,4}}{R_{tot}} \quad (2.24)$$

Dimana:

- $T_{s,1}$: Temperatur pada suhu permukaan dalam (K)
- $T_{s,4}$: Temperatur pada suhu permukaan luar (K)
- R_{tot} : Tahanan termal total (K/W)

Koefisien perpindahan panas keseluruhan (*overall heat transfer coefficient*) didefinisikan berdasarkan area dalam $A_1 = 2\pi \cdot r_1 \cdot L$, yaitu sebagai berikut .

$$U = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_1} + \frac{r_1}{k_A} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{r_1}{k_B} \ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right) + \frac{r_1}{k_C} \ln \left(\frac{r_4}{r_3} \right) + \frac{r_1}{r_4 h_4} \right]} \quad (2.25)$$

2.10 *Computational Fluid Dynamic (CFD)*

Terdapat dua pendekatan fundamental untuk melakukan desain dan analisa dari suatu sistem teknis yang melibatkan aliran fluida yaitu secara eksperimen dan matematis. Pendekatan secara matematis dilakukan dengan metode *computational fluid dynamics* yang merupakan solusi penyelesaian dari persamaan aliran fluida menggunakan komputer. Metode CFD menggunakan persamaan kekekalan massa, kekekalan energi, dan kekekalan momentum untuk menghasilkan data prediksi yang dibutuhkan seperti tekanan, kecepatan ataupun temperatur. Objek yang akan disimulasikan nantinya akan dibagi menjadi bagian – bagian kecil yang disebut dengan kontrol volume. Di setiap kontrol volume ini akan dilakukan perhitungan matematis (Jamshed, 2015).

Ada 3 tahap utama dalam melakukan simulasi CFD, yaitu:

1. *Pre Processing*

Domain yang akan dihitung atau dikomputasi harus dipilih terlebih dahulu. Domain yang telah dipilih akan dibagi menjadi element – elemen kecil kontrol volume. Setelah itu dilakukan penentuan kondisi batas di setiap permukaan dari domain. Tahapan selanjutnya adalah penentuan tipe fluida beserta sifatnya (suhu, densitas, kecepatan , dan lain-lain).

2. *Solving*

Terdapat beberapa teknik utama dalam mencari solusi numerik yaitu finite difference, finite element dan spectral method. Secara garis besar metode numerik yang menjadi dasar dari solver melakukan hal-hal sebagai berikut

- Aproksimasi dari variabel aliran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi-fungsi sederhana
- Diskritisasi dengan melakukan substitusi dari aproksimasi tersebut ke persamaan persamaan atur aliran dan dilanjutkan dengan manipulasi matematis
- Solusi dari persamaan aljabar dengan metode iteratif

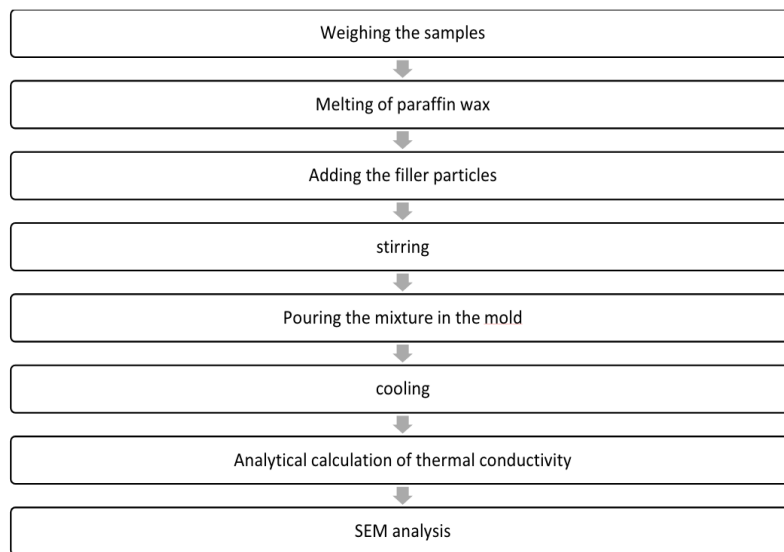
3. *Post Processing*

Ketika solusi dinyatakan konvergen, variabel aliran seperti kecepatan dan tekanan dapat di analisa dalam bentuk grafik. Selain itu, beberapa *software* CFD dilengkapi dengan kemampuan grafis yang dibutuhkan untuk menampilkan hasil termasuk kemampuan visual yang lain seperti animasi sehingga sering disebut *colourful fluid dynamics*.

2.11 **Penelitian Terdahulu**

2.11.1 *Enhancement of Thermal Conductivity of PCM Using Filler Graphite Powder Materials (Bharadwaj Reddy et al., 2018)*

Penelitian yang dilakukan oleh Bharadwaj Reddy et al (2018) ini membahas tentang peningkatan nilai konduktivitas termal dari PCM karena adanya penambahan material *filler* serbuk grafit. Analisis secara SEM dilakukan untuk melihat interaksi antara *paraffin wax* dan material *filler*. Berdasarkan hasil penelitian ini didapatkan bahwa penambahan material *filler* mampu meningkatkan nilai konduktivitas termal dari PCM komposit.



Gambar 2.10 Proses dalam Eksperimen Penambahan Serbuk Grafit (Bharadwaj Reddy et al., 2018)

Berdasarkan penelitian ini, mula-mula lilin *paraffin* atau *paraffin wax* dilelehkan hingga mencapai titik lelehnya yaitu 60°C . Serbuk grafit kemudian ditambahkan secara perlahan-lahan sambil campuran terus diaduk. Campuran dimasukkan ke dalam cetakan dan didinginkan untuk menjadi komposit. Waktu yang dibutuhkan untuk melelehkan lilin *paraffin* dan memadatkannya dicatat untuk setiap komposisi. Persamaan Nielsen digunakan untuk menghitung nilai konduktivitas termal pada PCM komposit. Berbagai hasil diperoleh untuk waktu leleh dan waktu pemadatan komposit yang dapat dilihat pada Gambar 2.10 berikut.

Volume fraction	Heating time in seconds	Solidification time in seconds
100% paraffin wax	913	1773
90% paraffin wax	829	1320
80% paraffin wax	775	1170
70% paraffin wax	676	963
60% paraffin wax	630	890
50% paraffin wax	542	724

Gambar 2.11 Waktu Leleh dan Waktu Pemadatan terhadap Kandungan *Paraffin* (Bharadwaj Reddy et al., 2018)

Terdapat tren peningkatan *heating time* dan *solidification time* seiring meningkatnya kandungan serbuk grafit dalam *paraffin*. Hal tersebut menunjukkan semakin cepat sistem dapat dipanaskan, maka semakin efisien sistem tersebut dalam mengelola panas dan menjaga suhu baterai dalam kisaran yang aman. Setelah dilakukan perhitungan konduktivitas termal pada komposit menggunakan persamaan Nielsen, maka didapatkan hasil perbandingan konduktivitas termal dengan variasi kandungan *paraffin* yang dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut.

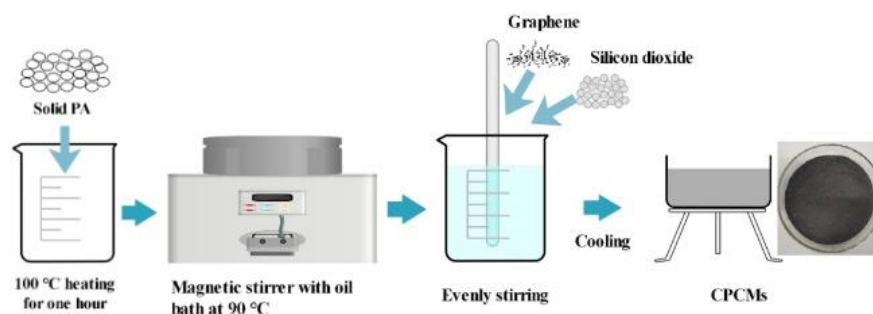
Volume fraction	Thermal Conductivity W/mk
100% paraffin wax	0.4
90% paraffin wax	0.534
80% paraffin wax	1.19
70% paraffin wax	2.77
60% paraffin wax	7.1

Gambar 2.12 Nilai Konduktivitas Termal terhadap Variasi Komposisi *Paraffin Wax* (Bharadwaj Reddy et al., 2018)

Jika diamati berdasarkan hasil perbandingan konduktivitas termal di atas, terjadi peningkatan yang signifikan dalam konduktivitas termal dari konsentrasi lilin *paraffin* 70% ke 60%. Lebih lanjutnya dengan menambahkan partikel pengisi atau *filler*, konduktivitas lilin *paraffin* meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa menggunakan material *filler* dengan konduktivitas termal yang tinggi efektif untuk meningkatkan konduktivitas termal pada PCM. Berdasarkan hasil eksperimen, didapatkan nilai konduktivitas termal tertinggi diperoleh pada lilin *paraffin* dengan komposisi 60% dan nilainya didapatkan sebesar 7.1 W/mk (Bharadwaj Reddy et al., 2018).

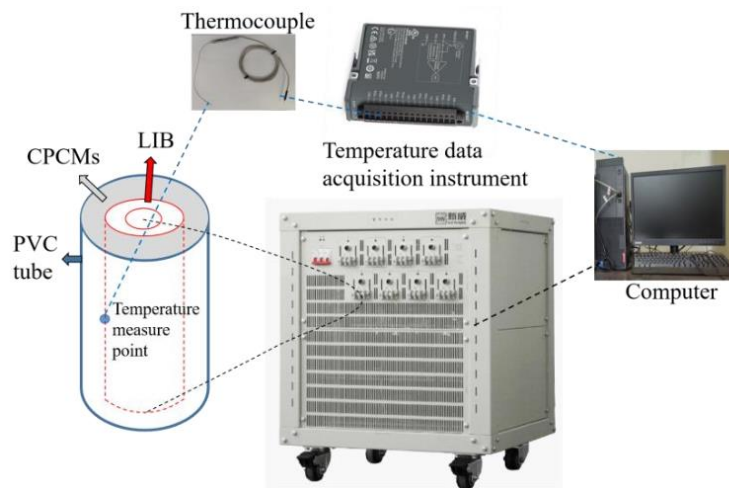
2.11.2 Study on Thermal Runaway Risk Prevention of Lithium-Ion Battery with Composite Phase Change Materials (Zhang et al., 2023)

Penelitian yang dilakukan oleh Zhang et al (2023) ini meneliti tentang penggunaan PCM komposit sebagai pencegahan risiko pelarian termal baterai litium-ion. Studi ini melakukan eksperimen pendinginan pada baterai litium-ion menggunakan PCM komposit campuran *paraffin*, serbuk *graphene*, dan serbuk silika. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa campuran *paraffin*, serbuk *graphene*, dan serbuk silika dapat meningkatkan nilai konduktivitas termal PCM komposit. Untuk proses persiapan pembuatan komposit ini dapat dilihat pada Gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.13 Proses Pembuatan PCM Komposit (Zhang et al., 2023)

Pada eksperimen ini, serbuk *graphene* serta *silicone dioxide* digunakan sebagai pengisi konduktif termal untuk meningkatkan konduktivitas termal. Proses pembuatan PCM komposit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12, *paraffin* dipanaskan hingga pada suhu 100°C selama 60 menit, lalu ditempatkan di atas pengaduk magnetik pada suhu 90°C. Kemudian serbuk *graphene* dan *silicon dioxide* ditambahkan dan diaduk secara merata sepenuhnya. Setelah didinginkan selama 24 jam, maka akan diperoleh material PCM komposit dengan ketiga bahan tersebut.



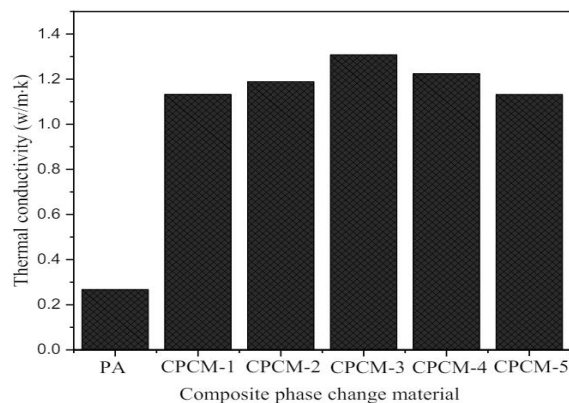
Gambar 2.14 Skema Alat Eksperimen (Zhang et al., 2023)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13, sistem eksperimen baterai ini terdiri dari, sistem pengujian baterai (BTS), dan sistem instrument akuisisi data. Struktur baterai disusun dalam *PVC tube* dan permukaan tengah baterai litium-ion ditempelkan sensor *thermocouple* untuk mengukur suhu baterai. Kemudian PCM komposit akan diisi di sekeliling baterai.

Samples	Graphene	Silicon Dioxide
CPCM-1	0%	15%
CPCM-2	5%	10%
CPCM-3	7.5%	7.5%
CPCM-4	10%	5%
CPCM-5	15%	0%

Gambar 2.15 Rasio Komposisi PCM Komposit (Zhang et al., 2023)

Melalui metode persiapan di atas, rasio komposisi dan penamaan dari PCM komposit disajikan dalam Gambar 2.14 di atas. Variasi komposisi serbuk silika yang digunakan dalam eksperimen ini yaitu, 15%, 10%, 7.5%, 5%, dan 0%.

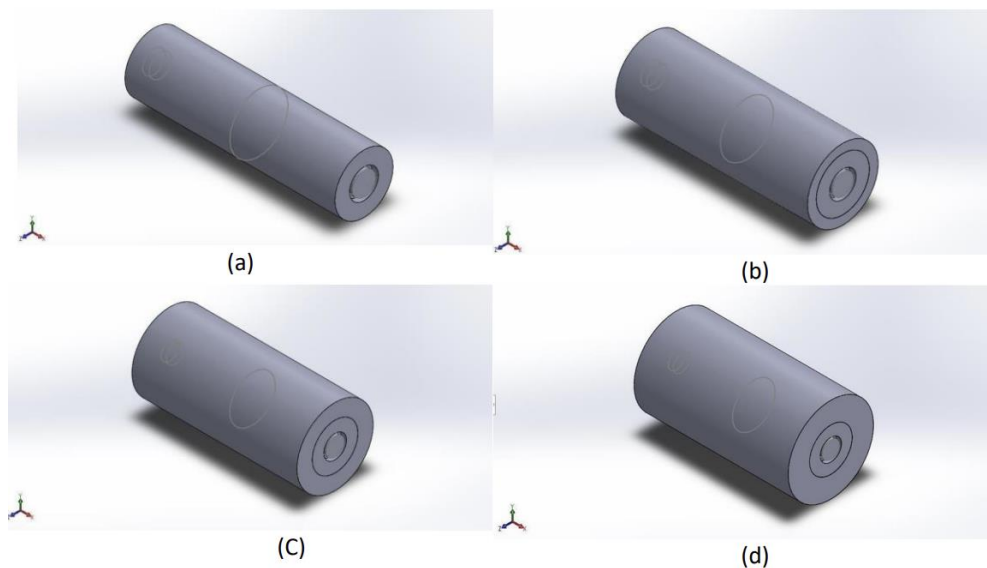


Gambar 2.16 Grafik Perbandingan Konduktivitas Termal pada PCM Komposit (Zhang et al., 2023)

Hasil eksperimen menunjukkan PCM komposit memiliki konduktivitas termal yang berbeda dibandingkan dengan PCM *paraffin* murni tanpa komposit. Jika dibandingkan dengan *paraffin* murni, konduktivitas termal dari CPCM-1 dengan penambahan serbuk silika dan CPCM-5 dengan penambahan serbuk *graphene* didapatkan masing-masing sebesar 1.132 W/mK dan 1.131 W/mK. Konduktivitas termal yang terbesar didapatkan pada CPCM-3 ketika rasio massa serbuk *graphene* dan serbuk silika adalah 1:1, yang mencapai 1,307 W/mK. Berdasarkan hasil konduktivitas termal PCM komposit, penambahan material *filler* konduktif termal dapat membantu meningkatkan sistem perpindahan panas permukaan PCM komposit, sehingga meningkatkan konduktivitas termal. PCM komposit memiliki efek pendinginan yang signifikan terhadap pengelolaan termal baterai litium-ion dan suhu permukaan baterai serta laju kenaikan suhu berkurang secara efektif.

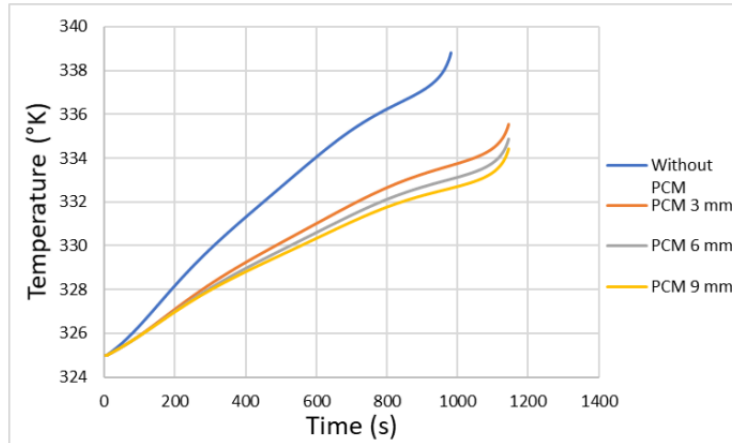
2.11.3 Thermal Management System Using Phase Change Material for Lithium Ion Battery (Grimonia et al., 2021)

Pada artikel ini membahas pengaruh variasi ketebalan pada sistem manajemen termal menggunakan PCM untuk baterai litium-ion. Salah satu tujuan dari diadakan studi numerik dalam artikel ini adalah menemukan jenis kriteria ketebalan PCM terbaik untuk sistem pendinginan baterai litium-ion. Variasi ketebalan yang digunakan dalam artikel ini adalah 3 mm, 6 mm, dan 9 mm. Simulasi dilakukan dengan menguji baterai tanpa PCM dan menggunakan ketiga ketebalan PCM tersebut seperti gambar di bawah.



Gambar 2.17 Gambar Geometri dari (a) Non-PCM (b) PCM 3 mm (c) PCM 6 mm dan (d) PCM 9 mm (Grimonia et al., 2021)

Berdasarkan penelitian ini, penggunaan variasi ketebalan berpengaruh secara signifikan terhadap peningkatan temperatur dari baterai. Namun, PCM tidak mampu menjaga temperatur baterai di bawah suhu pengoperasian yang direkomendasikan. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya juga, ditunjukkan bahwa kinerja peningkatan temperatur lebih baik ketika PCM berada dalam kondisi temperatur lingkungan yang ekstrem.



Gambar 2.18 Grafik Temperatur Permukaan Baterai (Grimonia et al., 2021)

Berdasarkan pada Gambar 2.17 menunjukkan bahwa PCM yang memiliki ketebalan 9 mm mampu mendinginkan temperatur baterai secara lebih optimal pada pengujian *discharge* 3.5C. Semakin meningkatnya massa dan volume dari PCM, maka semakin meningkat juga nilai panas yang diserap oleh PCM dari baterai. Berdasarkan artikel ini, kriteria PCM yang baik adalah yang memiliki titik leleh, densitas, dan konduktivitas termal yang tinggi.

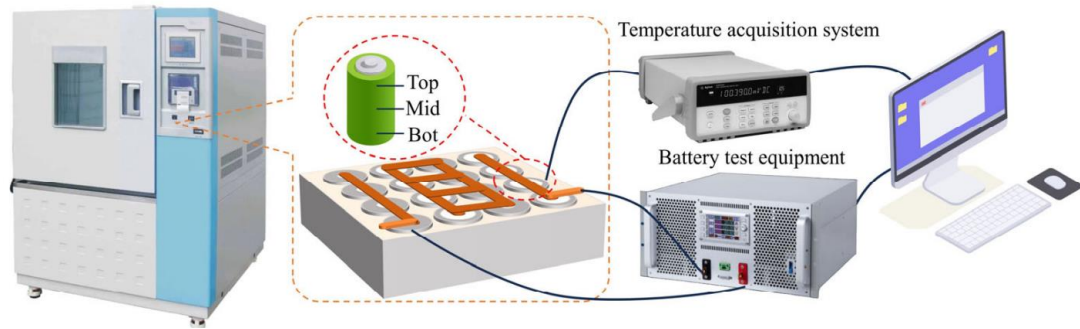
2.11.4 *Experimental Study of a Passive Thermal Management System Using Expanded Graphite/Polyethylene Glycol Composite for Lithium-Ion Batteries* (Xia et al., 2023)

Artikel ini membahas mengenai efektivitas PCM komposit dalam menurunkan temperatur kedua baterai secara efektif dan meminimalkan perbedaan temperatur pada masing-masing baterai litium-ion pada *discharge rate* yang meningkat secara bertahap dari 1C hingga 3C. Artikel ini membahas tentang pengaruh penggunaan *expanded graphite* untuk baterai litium-ion. Pada eksperimen ini, terdapat 3 variasi rasio *expanded graphite*, yaitu 1%, 3%, 5%, dan 9%.

Samples	PCM Percentage	EG Percentage
PCM-1	99%	1%
PCM-3	97%	3%
PCM-5	95%	5%
PCM-8	92%	8%

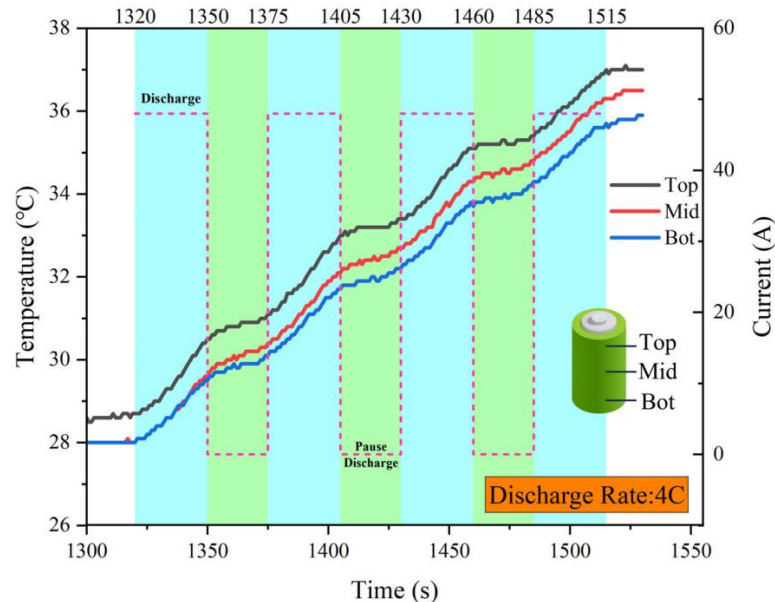
Gambar 2.19 Komposisi CPCM (Xia et al., 2023)

Battery pack yang digunakan dalam eksperimen kali ini menggunakan pola *arrangement* 4 x 4. Pada eksperimen percobaan ini, data temperatur baterai ketika pengujian diambil pada tiga titik menggunakan *thermocouple*, yaitu titik atas, tengah, dan bawah baterai. Untuk mengetahui setup yang digunakan pada eksperimen ini, dapat dilihat pada Gambar 2.19 berikut.



Gambar 2.20 Setup dan Proses Eksperimen
(Xia et al., 2023)

Pengujian temperatur baterai kali ini disesuaikan dengan kondisi testing baterai CPCM. Penggunaan keseharian dari kendaraan listrik pada umumnya menggunakan *discharge rate* maksimal tidak lebih dari 4C sehingga eksperimen dilakukan pengujian pada 4C dengan kondisi dinamik. Pengujian ini menghasilkan hubungan antara kenaikan temperatur pada posisi *thermocouple* yang berbeda pada permukaan baterai. Hubungan tersebut terdapat pada gambar pada grafik di bawah ini.



Gambar 2.21 Perbandingan Temperatur Baterai pada Kondisi Discharging 4C
(Xia et al., 2023)

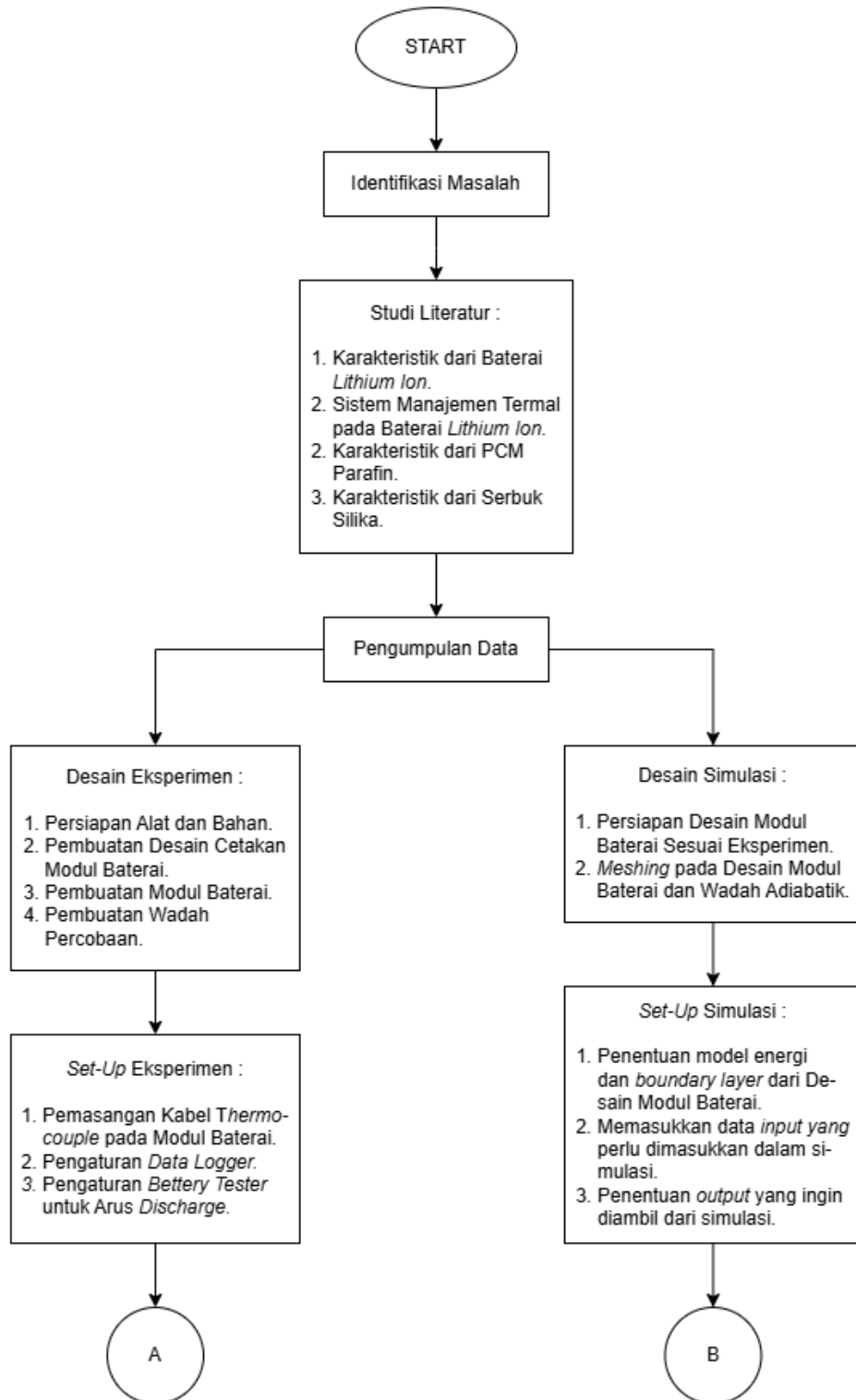
Berdasarkan hasil percobaan menggunakan *discharge rate* sebesar 4C, diketahui temperatur maksimal pada *thermocouple* pada posisi atas, tengah, dan bawah masing-masing adalah 37°C, 36.5°C, dan 35.9°C. Perbedaan temperatur maksimum antara bagian atas, tengah, dan bawah hanya berjarak sekitar 1.1°C. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa selama pengujian dengan *rapid discharge*, suhu pada bagian atas baterai selalu lebih besar dibandingkan pada tengah dan bawah.

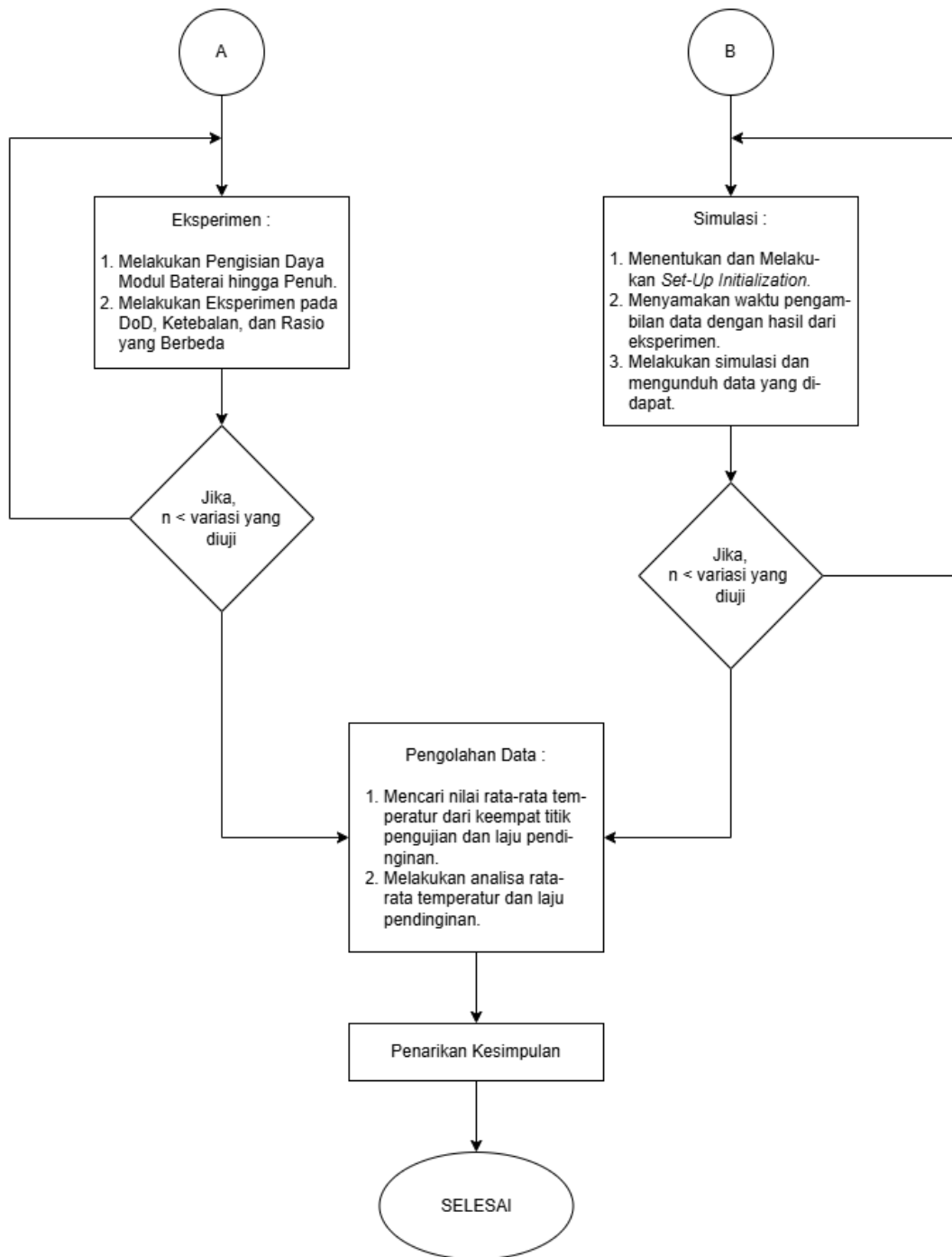
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI

3.1 *Flowchart* Penelitian

Adapun eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini digambarkan dalam bentuk *flowchart* yang dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.





Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

3.2 Studi Literatur

Pada tahapan awal dari penelitian, penulis melakukan studi literatur untuk mengumpulkan informasi yang berhubungan dengan topik penelitian dalam tugas akhir. Pada tahap ini, studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan jurnal, buku, dan artikel yang berhubungan dengan topik penelitian dalam tugas akhir yang dilakukan oleh penulis. Setelah melakukan studi literatur, didapatkan beberapa informasi yang membahas tentang sistem manajemen termal pada baterai, karakteristik baterai litium-ion, serta karakteristik dan jenis-jenis PCM.

3.3 Perumusan Masalah

Pada tahapan ini, penulis akan merumuskan masalah yang ditemukan dari studi literatur dalam penelitian. Tahapan ini bertujuan untuk memfokuskan tujuan penelitian dan membantu peneliti untuk dapat memecahkan masalah secara jelas dan terinci melalui pengumpulan dan analisis data. Perumusan masalah yang baik akan menghasilkan penelitian yang relevan dan bermanfaat.

3.4 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa spesifikasi baterai litium-ion tipe 18650 yang meliputi dimensi baterai, kapasitas baterai (Ah), temperatur operasional, *operating cell voltage*, *nominal voltage*, arus baterai, densitas, *specific heat*, dan konduktivitas termal dari baterai, *paraffin wax*, dan serbuk silika.

3.4.1 Data Variasi Eksperimen

Dalam studi eksperimen ini, ada tiga variasi yang digunakan dalam pengujian baterai litium-ion VRK 18650, yaitu rasio material *filler*, ketebalan modul, dan *discharge rate*. Variasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan 3.2 berikut.

Tabel 3.1 Variasi Ketebalan Modul dan Rasio Material *Filler*

Rasio PCM	Ketebalan		
0.35	3 mm	6 mm	9 mm
0.4	3 mm	6 mm	9 mm

Tabel 3.2 Variasi *Discharge Rate*

No.	<i>Discharge Rate</i> (C)	Arus (A)
1.	1	3
2.	2	6
3.	3	9
4.	4	12
5.	5	15

Selain itu, dilakukan juga pengujian eksperimen pada sistem *natural convection* serta PCM murni dengan ketebalan 3, 6, dan 9 mm.

3.4.2 Data Variasi Simulasi

Pada studi numerik, terdapat dua variasi yang digunakan untuk pengujian secara simulasi, yaitu 4C dengan PCM murni ketebalan 6 mm dan 9 mm, PCM komposit 6 mm rasio 0.35 dan 0.4, PCM komposit 9 mm 0.35 dan 0.4, serta 5C dengan PCM murni 6 mm

3.4.3 Data Spesifikasi Baterai Litium-Ion

Pada penelitian tugas akhir ini, penulis menggunakan baterai litium-ion jenis VRK IMR18650. Data spesifikasi baterai litium-ion VRK IMR18650 dapat ditunjukkan pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Spesifikasi Baterai Litium-Ion

Besaran	Keterangan	Data
D	Diameter	0.018 m
H	Tinggi	0.065 m

Besaran	Keterangan	Data
m	Massa	0.060 kg
ρ	Densitas	2880 kg/m ³
C_p	<i>Specific Heat</i>	1000 J/kg.K
k	Konduktivitas Termal	3 W/m.K
I_m	<i>Max Discharge Current</i>	15 A
I_t	Kapasitas Baterai	3000 mAh
V	Nominal <i>Voltage</i>	3.7 Volt
E	<i>Open Circuit Voltage</i>	4.2 Volt
T_b	Temperatur Operasional Baterai	-10°C – 60°C

3.4.4 Data Spesifikasi *Phase Change Material*

Berdasarkan jurnal ilmiah yang dipublikasikan Bharadwaj Reddy et al. pada tahun 2018 tentang penambahan partikel pengisi berupa serbuk grafit untuk meningkatkan konduktivitas termal dari *paraffin wax* sebagai PCM komposit, diperoleh data spesifikasi *paraffin wax* sebagai *Phase Change Material* yang ditunjukkan dalam Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Spesifikasi *Phase Change Material*

Besaran	Keterangan	Data
ρ_{solid}	Densitas solid	910 kg/m ³
ρ_{liquid}	Densitas liquid	790 kg/m ³
k_s	Konduktivitas Termal Solid	0.24 W/m.K
k_l	Konduktivitas Termal Liquid	0.22 W/m.K
$C_{p-solid}$	<i>Specific Heat</i> (Solid)	2000 J/Kg.K
$C_{p-liquid}$	<i>Specific Heat</i> (Liquid)	2150 J/kg.K
$T_{solidus}$	Temperatur Solid	40.6°C (313.6K)
$T_{melting}$	Temperatur Melting	44.7°C (317.7K)
L	Kalor Laten	190000 J/kg

3.4.5 Data Spesifikasi Serbuk Silika

Berdasarkan jurnal ilmiah yang dipublikasikan (Prasetyo, 2023) tentang studi eksperimental pengaruh variasi material *filler* pada PCM komposit terhadap laju pemanasan pada permukaan baterai litium-ion, diperoleh data spesifikasi serbuk kaca seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.5 Spesifikasi Serbuk Silika

Besaran	Keterangan	Data
ρ	Densitas	2800 kg/m ³
C_p	<i>Specific Heat</i>	1200 J/kgK
k	Konduktivitas Termal	1.5 W/mK
T_m	Temperatur Leleh	820°C





3.5 Desain Eksperimen


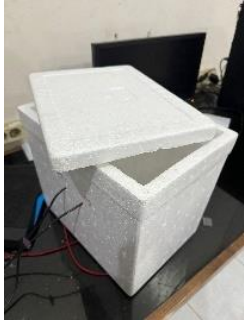


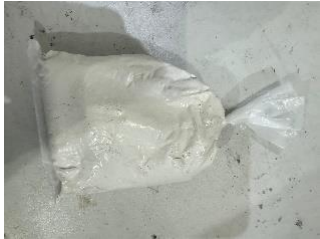
Sebelum melakukan eksperimen, terlebih dahulu dilakukan persiapan dan pembuatan modul paket baterai yang akan dianalisis.





3.5.1 Alat dan Bahan


Pada percobaan ini diperlukan beberapa peralatan untuk menunjang proses berlangsungnya percobaan yang akan dilakukan. Berikut peralatan dan bahan yang diperlukan akan disajikan dalam Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3.6 Alat dan Bahan yang digunakan dalam Penelitian

No	Nama Alat dan Bahan	Keterangan	Gambar
1.	Baterai Litium-Ion VRK 18650	Sebagai objek yang akan digunakan untuk meneliti keandalan PCM komposit dalam menurunkan laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai litium-ion	
2.	ZKETECH EBC-A40L Battery Tester	Sebagai alat untuk melakukan pengisian (<i>charging</i>) dan pengosongan (<i>discharging</i>) daya pada baterai litium-ion	
3.	Anbai AT4808 Multi Channel Data Logger	Digunakan untuk membaca dan menampilkan data suhu yang direkam oleh sensor suhu <i>thermocouple</i>	
4.	Flashdisk	Digunakan untuk menyimpan data suhu temperatur baterai melalui <i>Multi Channel Data Logger</i> dalam bentuk microsoft excel	

No	Nama Alat dan Bahan	Keterangan	Gambar
5.	Kompor dan Gas	Digunakan untuk memanaskan <i>paraffin wax</i> dan serbuk silika	
6.	<i>Styrofoam Box</i>	Digunakan untuk menjaga temperatur di sekitar baterai agar tetap <i>adiabatic</i>	
7.	Avometer	Digunakan untuk melihat tegangan baterai dan arus yang mengalir pada modul baterai	
8.	Solder	Digunakan untuk merangkai dan menyambungkan antar sel baterai dengan kabel	
9.	Serbuk Silika	Digunakan sebagai material <i>filler</i> untuk membuat PCM komposit	

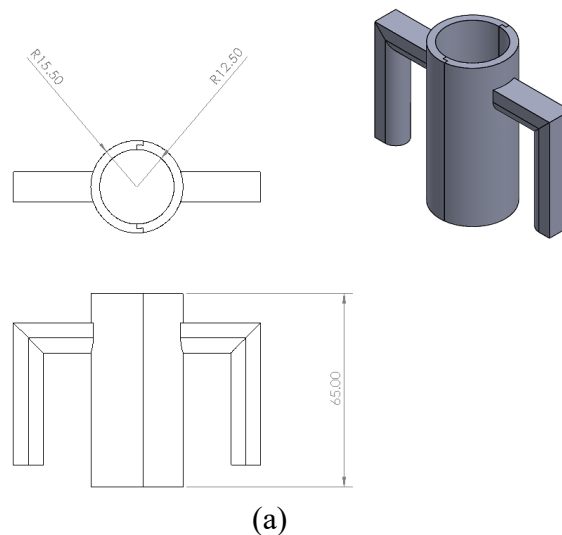
No	Nama Alat dan Bahan	Keterangan	Gambar
10.	<i>Paraffin Wax</i>	Digunakan sebagai material berubah fase (PCM) untuk mengisi celah antar sel baterai dengan PCM komposit	
11.	Akrilik	Digunakan sebagai material untuk menahan baterai yang terletak di dalam sterofom box	
12.	<i>Thermogun</i>	Digunakan sebagai alat pembantu dalam mengukur temperatur baterai dan PCM	
13.	Timbangan Digital	Digunakan untuk menimbang massa dari <i>paraffin wax</i> dan material <i>filler</i>	

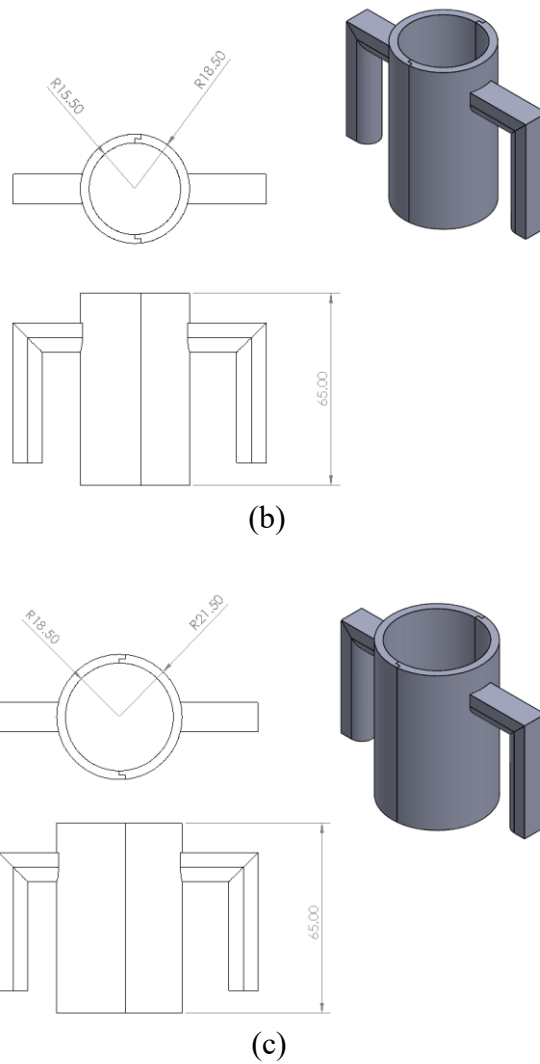
No	Nama Alat dan Bahan	Keterangan	Gambar
14.	Laptop/PC	Digunakan untuk pengolahan data temperatur dari <i>Multi Channel Data Logger</i>	

3.5.2 Pembuatan Modul Paket Baterai

A. Desain Cetakan Baterai dan PCM

Tahap ini merupakan perancangan cetakan PCM (Phase Change Material) agar PCM dapat menempel dengan baik pada permukaan baterai. PCM digunakan sebagai bahan untuk sistem pendinginan baterai sehingga dapat mengoptimalkan penyerapan dan pelepasan panas selama pengujian. Cetakan PCM dibuat menggunakan teknologi 3D printing dan dirancang untuk tiga ketebalan PCM yang berbeda, yaitu 3 mm, 6 mm, dan 9 mm. Hal ini bertujuan untuk menyesuaikan ketebalan PCM dengan kebutuhan uji coba dan karakteristik termal yang diinginkan. Setiap cetakan dilengkapi dengan penahan baterai yang berfungsi untuk menjaga posisi baterai tetap berada di tengah-tengah cetakan sehingga distribusi PCM menjadi merata di seluruh permukaan baterai. Desain cetakan baterai dan PCM ditunjukkan pada Gambar 3.2 berikut.

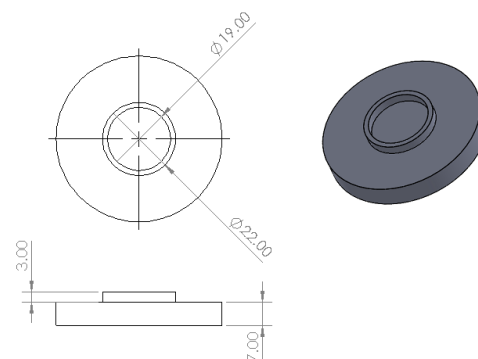




Gambar 3.2 Desain Cetakan Baterai dan PCM (a) 3 mm, (b) 6 mm, (c) 9 mm

B. Desain Holder Baterai

Holder atau dudukan baterai merupakan sebuah komponen yang digunakan untuk meletakkan setiap sel baterai saat akan membentuk cetakan PCM. Holder baterai dibuat dengan diameter menyesuaikan diameter baterai yaitu 19 mm. Material untuk holder baterai dapat dibuat dari material 3D print. Desain dari bentuk holder baterai ditunjukkan dalam Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Desain 3D Holder Baterai

D. Pembuatan PCM Komposit

Langkah-langkah pembuatan PCM komposit dengan material *paraffin wax* murni serta campuran *paraffin wax* dan serbuk silika adalah sebagai berikut.

a. *Paraffin Wax* Murni

1. Bahan baku *paraffin wax* murni dipersiapkan
2. Massa *paraffin wax* ditimbang sesuai dengan ketebalan cetakan baterai dan PCM (Tabel 3.5)
3. *Paraffin wax* dipanaskan menggunakan kompor sampai temperatur 60°C hingga benar-benar mencair
4. *Paraffin wax* yang sudah mencair dituangkan ke cetakan baterai dan PCM

Massa dari *paraffin wax* yang dituangkan ke dalam cetakan baterai dan PCM ditunjukkan oleh Tabel 3.7 berikut.

Tabel 3.7 Massa *Paraffin Wax* berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM

Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM (mm)	Massa <i>Paraffin Wax</i> (gram)
3	11.7
6	26.8
9	45.2

b. Campuran *Paraffin Wax* Murni dan Serbuk Silika

1. Bahan baku yang terdiri dari *paraffin wax* dan serbuk silika dipersiapkan
2. Massa *paraffin wax* dan serbuk silika ditimbang sesuai dengan ketebalan cetakan baterai dan PCM serta rasio *filler*, yaitu 0.35 dan 0.4
3. *Paraffin wax* dipanaskan menggunakan kompor sampai temperatur 60°C hingga benar-benar mencair
4. Serbuk silika dituangkan ke dalam panci yang berisi *paraffin wax* yang sudah mencair
5. *Paraffin wax* dicampurkan dengan serbuk silika dan diaduk hingga tercampur
6. Campuran *paraffin wax* dan serbuk silika dituangkan ke dalam cetakan baterai dan PCM

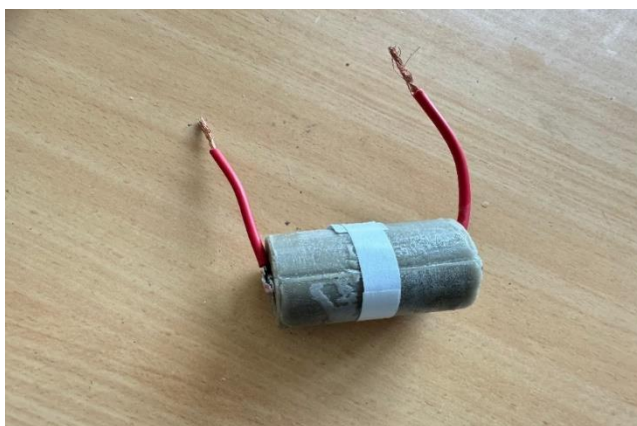
Massa dari *paraffin wax* dan serbuk silika yang dituangkan ke dalam cetakan baterai dan PCM ditunjukkan oleh Tabel 3.8 berikut.

Tabel 3.8 Massa *Paraffin Wax* dan Serbuk Silika berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM

Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM (mm)	Rasio Filler	Massa Serbuk Grafit (gram)	Massa <i>Paraffin Wax</i> (gram)
3	0.35	5.4	9.9
	0.4	6.4	9.6
6	0.35	12.3	22.8
	0.4	14.7	21.9
9	0.35	20.7	38.4
	0.4	24.7	37.1

3.5.3 Perakitan Modul Baterai

Setelah baterai dan PCM komposit dicetak, maka baterai dan PCM komposit disolder di dua kutubnya, yaitu kutub positif (+) dan kutub negatif (-). Setelah disolder, maka modul baterai akan diberi label sesuai dengan variasi rasio *filler* dan ketebalan PCM-nya. Tampilan dari modul baterai dapat ditunjukkan pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Rangkaian Modul Baterai

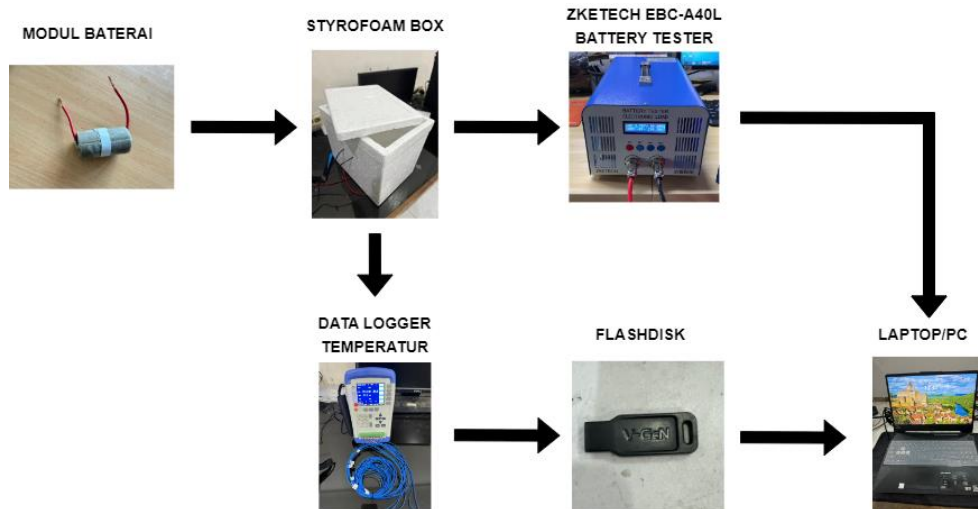
Modul paket baterai terdiri dari lima jenis modul baterai yang terdiri dari:

1. Modul baterai tanpa PCM *paraffin wax*
2. Modul baterai dengan PCM *paraffin wax* dengan ketebalan 3 mm
3. Modul baterai dengan PCM *paraffin wax* dengan ketebalan 6 mm
4. Modul baterai dengan PCM *paraffin wax* dengan ketebalan 9 mm
5. Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.35 dengan ketebalan 3 mm
6. Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.35 dengan ketebalan 6 mm
7. Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.35 dengan ketebalan 9 mm
8. Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 dengan ketebalan 3 mm
9. Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 dengan ketebalan 6 mm
10. Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 dengan ketebalan 6 mm

3.6 Set-Up Pengujian

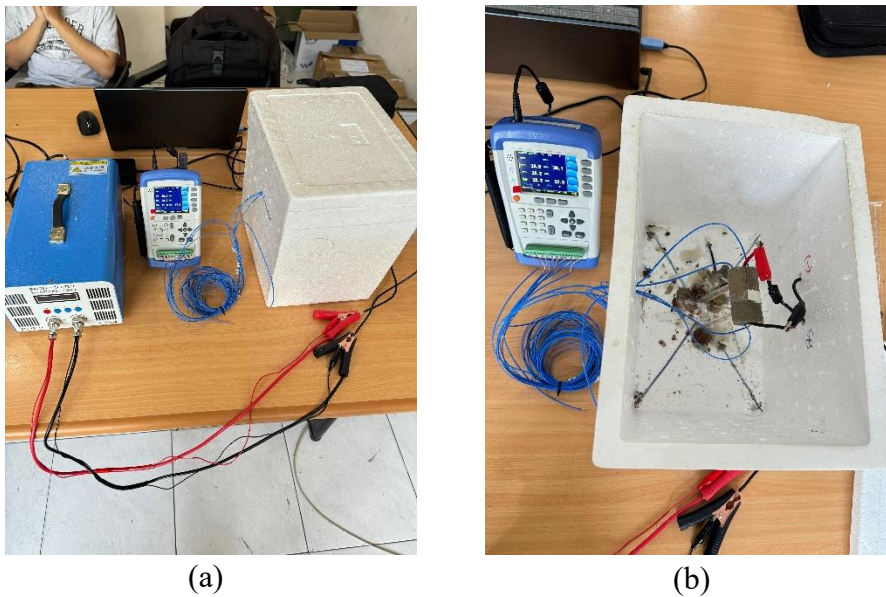
3.6.1 Skema Peralatan Pengujian

Adapun skema pengujian yang akan dilakukan digambarkan dalam Gambar 3.5 di bawah ini.



Gambar 3.5 Skema Peralatan Pengujian

Berdasarkan skema pengujian tersebut, set up pengujian baterai yang telah dirangkai dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Alat Pengujian yang Telah Dirangkai (a) Rangkaian *Battery Tester*, Styrofoam Box, dan Komputer (b) Rangkaian Alat Pengujian Baterai dalam Styrofoam Box

Modul baterai dihubungkan dengan ZKETECH EBC-A40L *Battery Tester* yang sudah terhubung dengan aliran listrik. Sensor *thermocouple* yang akan digunakan untuk mengukur temperatur pada permukaan atas dan bawah baterai dipasang sedemikian hingga setiap satu sel baterai terdapat 4 sensor. Sensor-sensor tersebut dihubungkan dengan *Multi Channel Data Logger*. Fungsi *Multi Channel Data Logger* adalah sebagai penyimpanan dan perekaman data temperatur yang terbaca pada sensor *thermocouple*

untuk seterusnya data dikirimkan ke *flashdisk* dalam bentuk microsoft excel. Kemudian data pada microsoft excel akan diolah menggunakan PC/Laptop.

3.6.2 Prosedur Percobaan

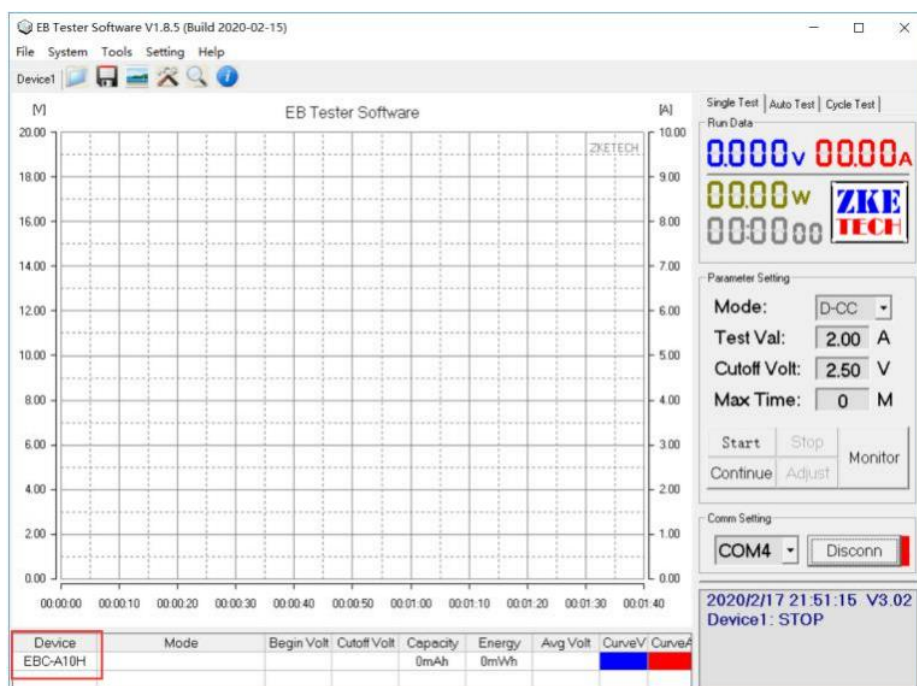
Berikut tahapan-tahapan yang dilakukan untuk melakukan percobaan:

1. Modul paket baterai dipersiapkan antara lain:
 - 1) Modul baterai tanpa PCM *paraffin wax*
 - 2) Modul baterai dengan PCM *paraffin wax* dengan ketebalan 3 mm
 - 3) Modul baterai dengan PCM *paraffin wax* dengan ketebalan 6 mm
 - 4) Modul baterai dengan PCM *paraffin wax* dengan ketebalan 9 mm
 - 5) Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.35 dengan ketebalan 3 mm
 - 6) Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.35 dengan ketebalan 6 mm
 - 7) Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.35 dengan ketebalan 9 mm
 - 8) Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 dengan ketebalan 3 mm
 - 9) Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 dengan ketebalan 6 mm
 - 10) Modul baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 dengan ketebalan 9 mm
2. Holder akrilik dimasukkan ke dalam Styrofoam box dan diletakkan tepat di posisi tengah box
3. Modul baterai diletakkan di atas holder akrilik
4. Sensor suhu *thermocouple* dari *Multi Channel Data Logger* sebanyak 4 *channel* dipasang pada masing-masing kutub positif (+) dan negative (-). Pemasangan dilakukan pada dua di bagian atas baterai dan dua di bagian bawah baterai, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7
5. Kabel *battery tester* dihubungkan dengan modul baterai sesuai dengan kutub baterai. Instalasi *thermocouple* dan kabel *battery tester* dapat dilihat pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Pemasangan *Thermocouple* dan Kabel *Battery Tester* pada Baterai

6. Temperatur *housing* (Styrofoam box) dan temperatur lingkungan (sekitar 31°C) diukur sebagai referensi.
7. Software *battery tester* yang sudah diinstall kemudian diatur sesuai dengan variasi *discharge rate*, yaitu 3A; 6A; 9A; 12A; dan 15A, lalu *Cutoff Voltage* sebesar 2.5 V dan *Max Time* diatur *default*.



Gambar 3.8 Tampilan Software *Battery Tester*

Tabel 3.9 Parameter Input dalam Proses *Discharging* Baterai

Parameter	Nilai	Dimensi
<i>Discharge rate</i>	1 (3)	C (A)
	2 (6)	
	3 (9)	
	4 (12)	
	5 (15)	
<i>Cutoff Voltage</i>	2.5	V
<i>Maximum Time</i>	0	s

8. *Flashdisk* dihubungkan pada *Multi Channel Data Logger*.
9. Interval pengukuran temperatur pada *Multi Channel Data Logger* diatur menjadi setiap 10 detik
10. Percobaan dimulai ketika temperatur permukaan baterai mencapai temperatur lingkungan dan percobaan diakhiri ketika kapasitas baterai sudah kosong.
11. Proses *discharge* dimulai melalui software *battery tester* dan nilai suhu yang terbaca pada permukaan baterai pada modul paket baterai tanpa PCM *Paraffin Wax* (Modul (1)) diamati hingga kapasitas baterai kosong.
12. Proses *discharge* dimulai melalui software *battery tester* dan nilai suhu yang terbaca pada permukaan baterai pada modul paket baterai dengan PCM *Paraffin Wax* dengan ketebalan 3 mm (Modul (2)) diamati hingga kapasitas baterai kosong.
13. Proses *discharge* dimulai melalui software *battery tester* dan nilai suhu yang terbaca pada permukaan baterai pada modul paket baterai dengan PCM *Paraffin Wax* dengan ketebalan 6 mm (Modul (3)) diamati hingga kapasitas baterai kosong.
14. Proses *discharge* dimulai melalui software *battery tester* dan nilai suhu yang terbaca pada permukaan baterai pada modul paket baterai dengan PCM *Paraffin Wax* dengan ketebalan 9 mm (Modul (4)) diamati hingga kapasitas baterai kosong.
15. Proses *discharge* dimulai melalui software *battery tester* dan nilai suhu yang terbaca pada permukaan baterai pada modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan variasi rasio 0.35 dengan ketebalan 3 mm (Modul (5)) diamati hingga kapasitas baterai kosong.
16. Proses *discharge* dimulai melalui software *battery tester* dan nilai suhu yang terbaca pada permukaan baterai pada modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan variasi rasio 0.35 dengan ketebalan 6 mm (Modul (6)) diamati hingga kapasitas baterai kosong.
17. Proses *discharge* dimulai melalui software *battery tester* dan nilai suhu yang terbaca pada permukaan baterai pada modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan variasi rasio 0.35 dengan ketebalan 9 mm (Modul (7)) diamati hingga kapasitas baterai kosong.
18. Proses *discharge* dimulai melalui software *battery tester* dan nilai suhu yang terbaca pada permukaan baterai pada modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan variasi rasio 0.4 dengan ketebalan 3 mm (Modul (8)) diamati hingga kapasitas baterai kosong.
19. Proses *discharge* dimulai melalui software *battery tester* dan nilai suhu yang terbaca pada permukaan baterai pada modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan variasi rasio 0.4 dengan ketebalan 6 mm (Modul (9)) diamati hingga kapasitas baterai kosong.
20. Proses *discharge* dimulai melalui software *battery tester* dan nilai suhu yang terbaca pada permukaan baterai pada modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk

silika dengan variasi rasio 0.4 dengan ketebalan 9 mm (Modul (10)) diamati hingga kapasitas baterai kosong.

21. Data hasil pengamatan temperatur dicatat pada tabel hasil pengamatan.
22. Analisis data dan penarikan kesimpulan dilakukan.

3.7 Analisis Data Hasil Percobaan

Proses analisis data dilakukan setelah semua data dari hasil eksperimen telah didapatkan. Proses ini dilaksanakan berdasarkan pada teori-teori yang telah didapatkan pada tahap studi literatur. Pada bagian ini akan dibahas mengenai pengaruh variasi penambahan rasio material pada PCM komposit yang diistilahkan material *filler* dan hubungannya terhadap laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai litium-ion. Pada tahap ini, data yang didapatkan meliputi waktu yang diperlukan dari baterai litium-ion untuk mengosongkan kapasitasnya yang disebut sebagai waktu kerja. Selain itu, didapatkan juga data temperatur baterai pada saat proses *discharging* sampai dengan kapasitas baterai kosong. Waktu kerja yang teramati untuk masing-masing modul paket baterai akan dicatat dalam tabel hasil pengamatan seperti Tabel 3.10 di bawah.

Tabel 3.10 Hasil Pengukuran Waktu Kerja untuk Setiap Modul

Waktu (s)	Temperatur (°C)				Temperatur Rata-Rata (°C)
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	

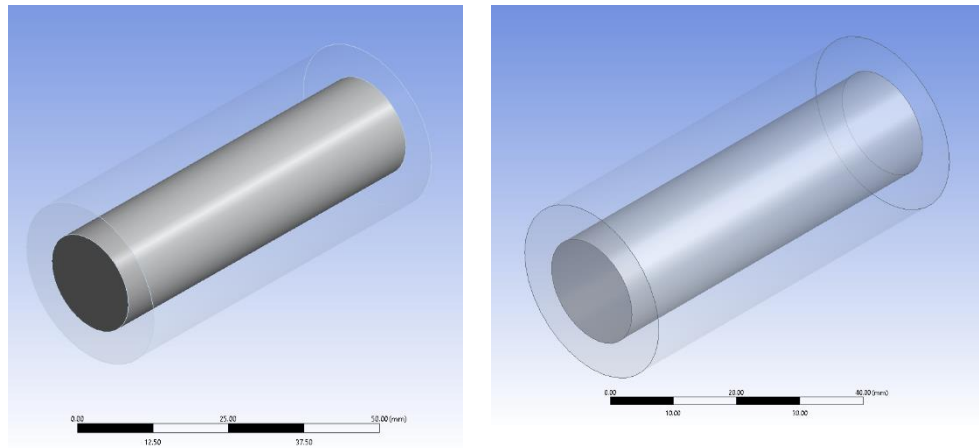
Pada penelitian ini, data yang diperoleh dari hasil pengukuran temperatur sel baterai akan dilakukan analisis berupa pengaruh variasi ketebalan dan rasio penambahan material *filler* pada PCM komposit terhadap laju peningkatan temperatur pada permukaan baterai litium-ion VRK 18650.

3.8 Pre-Processing Simulasi

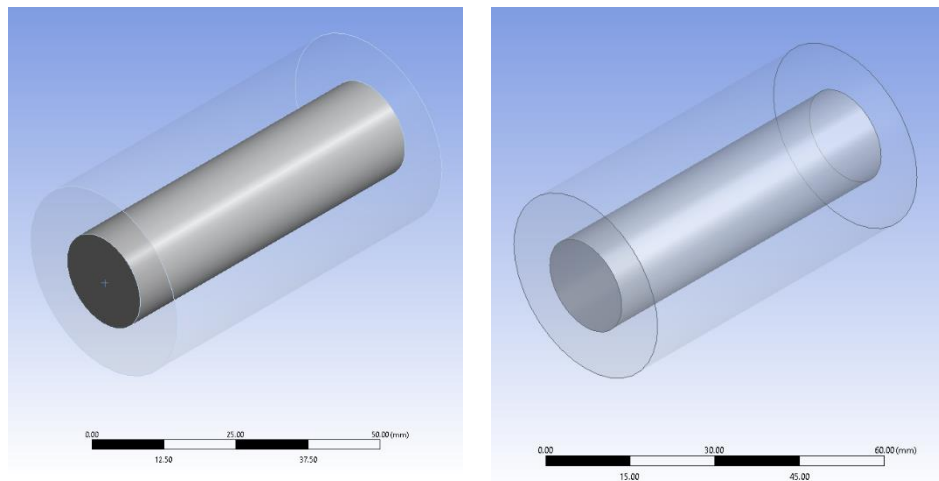
Sebelum memulai proses simulasi analisis termal untuk baterai litium-ion dengan PCM dilakukan, perlu dibuat geometri serta perlakuan *meshing* untuk simulasi. Permodelan geometri untuk modul baterai dilakukan dengan *software* DesignModeler. Geometri dimodelkan semirip mungkin dengan bentuk dan ukuran dari model modul eksperimen.

3.8.1 Permodelan Baterai

Pada proses *modelling*, geometri disederhanakan sedemikian rupa untuk membantu proses perhitungan agar lebih mudah. Modul geometri pada gambar di bawah dibuat berdasarkan skema eksperimen baterai dengan model geometri baterai sebagai berikut.



(a)

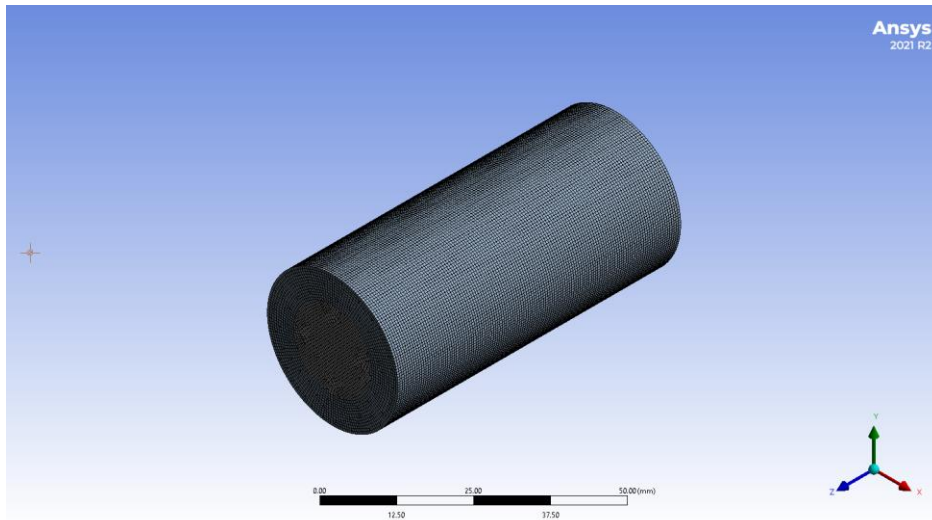


(b)

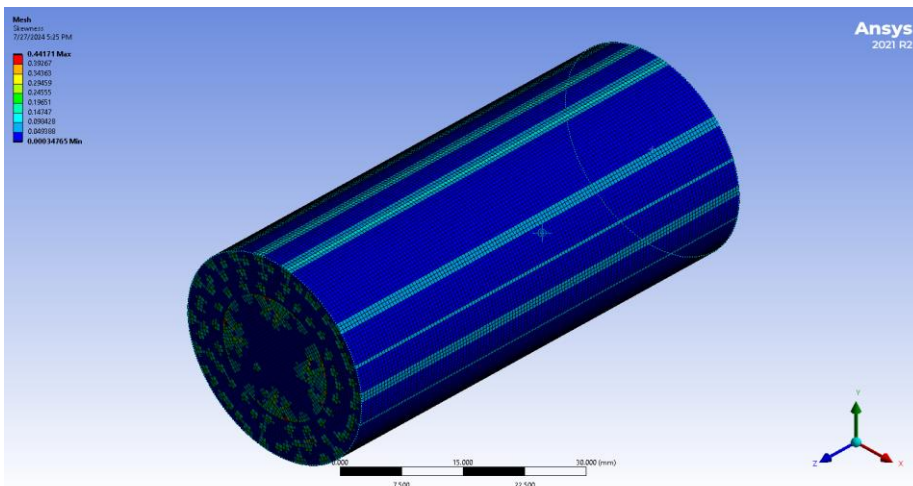
Gambar 3.9 Permodelan Geometri Baterai pada (a) PCM Murni 6 mm (b) PCM Murni 9 mm

3.8.2 Meshing Model Baterai

Setelah geometri selesai dibuat, dilakukan *meshing* terhadap masing-masing geometri. *Element size* dari *meshing* yang dilakukan sebesar 0.5 mm untuk PCM murni ketebalan 6 mm dan 9 mm. Pada *meshing* yang telah dilakukan, diketahui nilai *skewness* untuk masing-masing geometri adalah sebesar dan 0.44171 dan 0.44171. Kedua nilai *skewness* tersebut termasuk bagus menurut panduan dari *Ansys* sehingga dapat dilakukan simulasi terhadap kedua geometri tersebut.

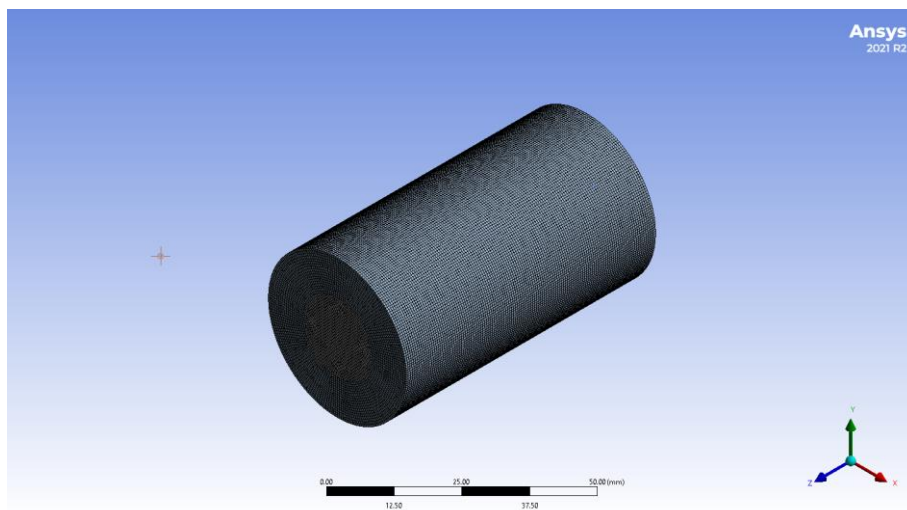


(a)

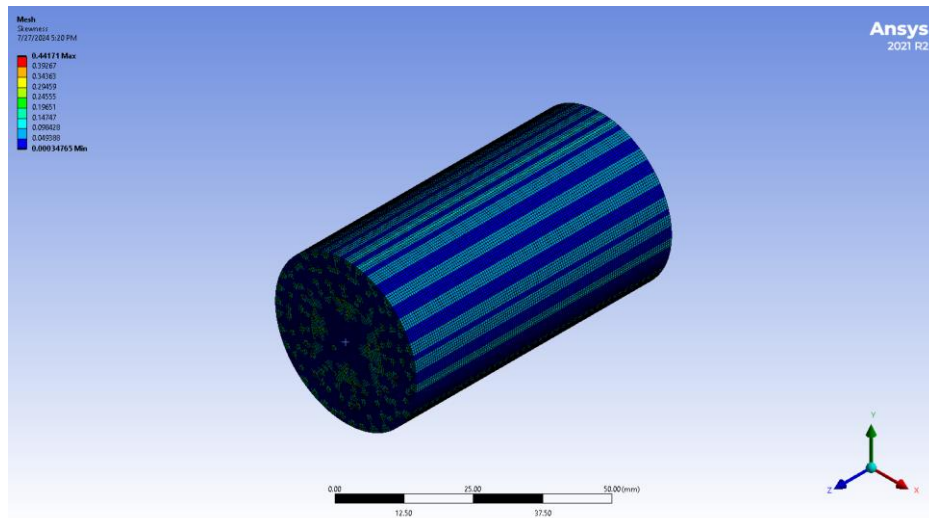


(b)

Gambar 3.10 Hasil *Meshing* Modul Baterai pada PCM Murni 6 mm (a) Geometri *Meshing* (b) Nilai *Skewness*



(a)



(b)

Gambar 3.11 Hasil *Meshing* Modul Baterai pada PCM Murni 9 mm (a) Geometri *Meshing* (b) Nilai *Skewness*

Meshing dilakukan dengan mengimport geometri yang sudah dibuat ke ANSYS. *Meshing* menggunakan element size yang kecil yaitu 0.5 mm dan dinilai sudah lebih dari cukup untuk mendapatkan analisis simulasi yang akurat.

3.8.3 Set-Up Simulasi

Setelah proses *meshing* selesai, maka dilakukan *setup* atau persiapan pada ANSYS Fluent untuk mendapatkan kondisi dan hasil sesuai dengan yang diinginkan. Terdapat beberapa parameter yang digunakan dalam ANSYS Fluent. Berikut merupakan *setup* yang diatur pada simulasi ini.

1. Model

Terdapat beberapa solver yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Pressure-Based* dengan *Velocity Formulation* menggunakan *absolute*, lalu untuk waktu simulasi yang digunakan adalah *transient*. Pemodelan pada penelitian ini, yaitu model *Energy* diaktifkan agar suatu perpindahan panas yang terjadi dapat terakumulasi. Selanjutnya untuk model *Viscous* menggunakan laminar, serta *Solidification and Melting* diaktifkan untuk menambahkan fungsi dari PCM.

Tabel 3.11 Parameter Model yang digunakan

Parameter	Keterangan	
	Lewis-Nielsen	Pitching
<i>Energy</i>	On	On
<i>Viscous</i>	Laminar	Laminar
<i>Multiphase</i>	Off	On
<i>Solidification and Melting</i>	On	Off

2. Material

Terdapat dua jenis material yaitu solid dan fluid. Pada penelitian ini material solid digunakan pada baterai, sedangkan pada material fluid digunakan pada PCM.

Tabel 3.12 Kondisi Fase dari *Cellzone*

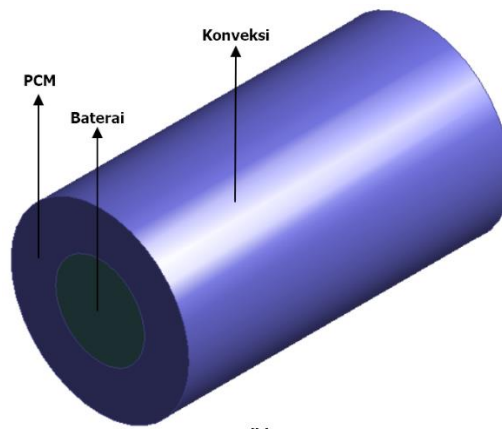
Materials	Conditions
<i>Baterai Material</i>	<i>Solid</i>
<i>PCM Material</i>	<i>Fluid</i>

3. *Cell Zone Condition*

Panas yang dibangkitkan oleh baterai bersifat konstan pada masing-masing C-rate. Nilai heat generation diperoleh dari hasil eksperimen untuk kemudian dimasukkan ke dalam ANSYS.

4. *Boundary Condition*

Tahap ini merupakan tahapan untuk mendefinisikan kondisi batas atau *boundary conditions* pada domain yang sudah dibuat.



Tabel 3.14 Setting dari *Boundary Conditions* dalam Simulasi

Boundary Condition	Values
<i>Battery</i>	Constant Heat Generation
<i>PCM Wall</i>	<i>Natural Convection</i> ($7 \text{ W/m}^2\text{K}$ and free temperature 304.5K)

5. *Solution Methods*

Pada simulasi ini metode solusi yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperti pada tabel berikut.

Tabel 3.15 Setting dari *Solution Methods* dalam Simulasi

Solution Methods	Metode
Scheme	PISO
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	Third-Order MUSCL
Energy	Third-Order MUSCL

6. *Monitor Residual*

Tahap ini merupakan tahapan berupa proses iterasi sampai mencapai kriteria konvergensi yang diinginkan. Kriteria konvergensi yang ditetapkan adalah 10^{-6} untuk *continuity* dan *velocity* serta 10^{-8} untuk *energy*.

7. Initialize

Langkah perhitungan awal untuk mempermudah dalam mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi. Dalam penelitian ini *initialization methods* menggunakan *hybrid initialization*. Temperatur awal lingkungan adalah sebesar 31.5°C (304.5 K).

8. Iterasi dan *Time Step*

Iterasi dan *time step* yang digunakan dalam proses simulasi adalah seperti pada tabel di bawah ini.

Tabel 3.16 Parameter Iterasi dan *Time Steps* dalam Simulasi

Calculation Parameters	Settings
<i>Number of Time Steps</i>	<i>Based on Experimental Data</i>
<i>Time Steps</i>	1 s
<i>Max. Iteration</i>	10
<i>Reporting Interval</i>	1
<i>Profile Update Interval</i>	1

3.9 Penarikan Kesimpulan

Penarikan Kesimpulan dilakukan setelah diperoleh hasil dari analisis data yang telah dilakukan.

3.10 Penutup

Penyusunan laporan merupakan tahap terakhir dari pelaksanaan tugas akhir ini. Laporan memuat hasil penelitian yang telah dilaksanakan selama tugas akhir.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan ditampilkan hasil analisis data eksperimen dari penelitian yang telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi rasio penambahan *filler* material serbuk silika pada PCM komposit terhadap laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai litium-ion. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan efektifitas PCM dan meningkatkan performa upaya pendinginan temperatur pada permukaan baterai litium-ion. Berdasarkan analisis, seluruh hasil eksperimen akan dibandingkan sehingga didapat pemilihan rasio penambahan material *filler* yang paling optimal dalam meningkatkan kinerja PCM untuk menurunkan laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai litium-ion.

4.1 Hasil Pengujian Temperatur pada Baterai

Berdasarkan hasil percobaan yang telah dilakukan, didapatkan data temperatur hasil pengujian baterai dengan sistem *natural convection*, PCM Murni, *discharging rate 1C*, *discharging rate 2C*, *discharging rate 3C*, *discharging rate 4C*, dan *discharging rate 5C*.

4.1.1 Pengujian Baterai dengan Sistem Natural Convection dan PCM Murni (*Terlampir*)

4.1.2 Pengujian Baterai dengan *Discharging Rate 1C* (*Terlampir*)

4.1.3 Pengujian Baterai dengan *Discharging Rate 2C* (*Terlampir*)

4.1.4 Pengujian Baterai dengan *Discharging Rate 3C* (*Terlampir*)

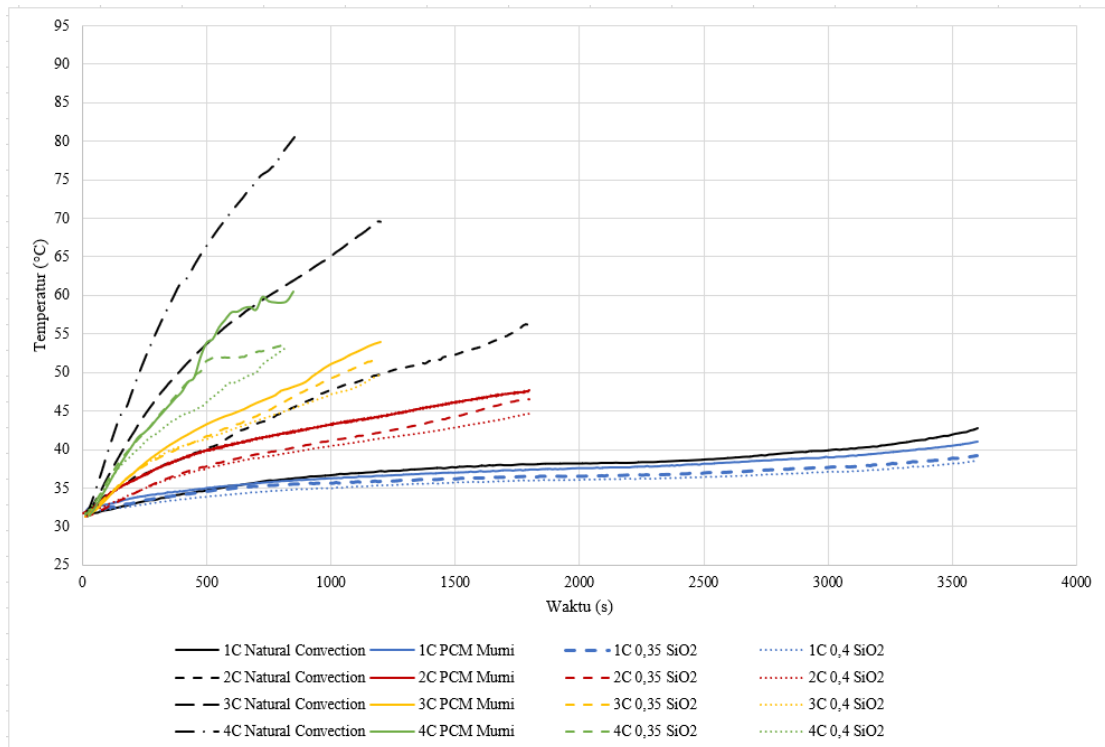
4.1.5 Pengujian Baterai dengan *Discharging Rate 4C* (*Terlampir*)

4.1.6 Pengujian Baterai dengan *Discharging Rate 5C* (*Terlampir*)

4.2 Pengaruh Variasi Ketebalan PCM Komposit terhadap Kenaikan Temperatur Baterai

4.2.1 Analisis pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 3 mm

Berdasarkan hasil pengujian baterai menggunakan sistem pendinginan *natural convection*, PCM murni 3 mm, dan PCM komposit pada ketebalan 3 mm dengan rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 diperoleh grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi tersebut. Grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada ketebalan 3 mm ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Temperatur terhadap Waktu pada Ketebalan 3 mm

Berdasarkan Gambar 4.1 di atas, didapatkan pada pengujian arus 1C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 42.8°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 41.025°C serta pada rasio 0.35, temperatur meningkat secara perlahan hingga mencapai temperatur maksimal pada 39.175°C sementara pada rasio 0.4, mencapai temperatur maksimal pada 38.525°C. Pada pengujian arus 2C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 56.15°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 47.7°C serta pada rasio 0.35, temperatur meningkat lebih cepat dibandingkan dengan 1C hingga mencapai temperatur maksimal pada 46.525°C sedangkan pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.625°C. Pada pengujian arus 3C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 69.5°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 53.95°C serta dengan rasio 0.35 temperatur meningkat cukup cepat hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 51.875°C, sedangkan pada rasio 0.4 temperatur juga meningkat cepat dengan temperatur maksimal sebesar 49.775°C. Pada pengujian arus 4C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 80.525°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 60.5°C serta dengan rasio 0.35 temperatur meningkat sangat cepat hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 53.6°C, sedangkan pada rasio 0.4 temperatur juga meningkat cepat dengan temperatur maksimal sebesar 53.167°C.

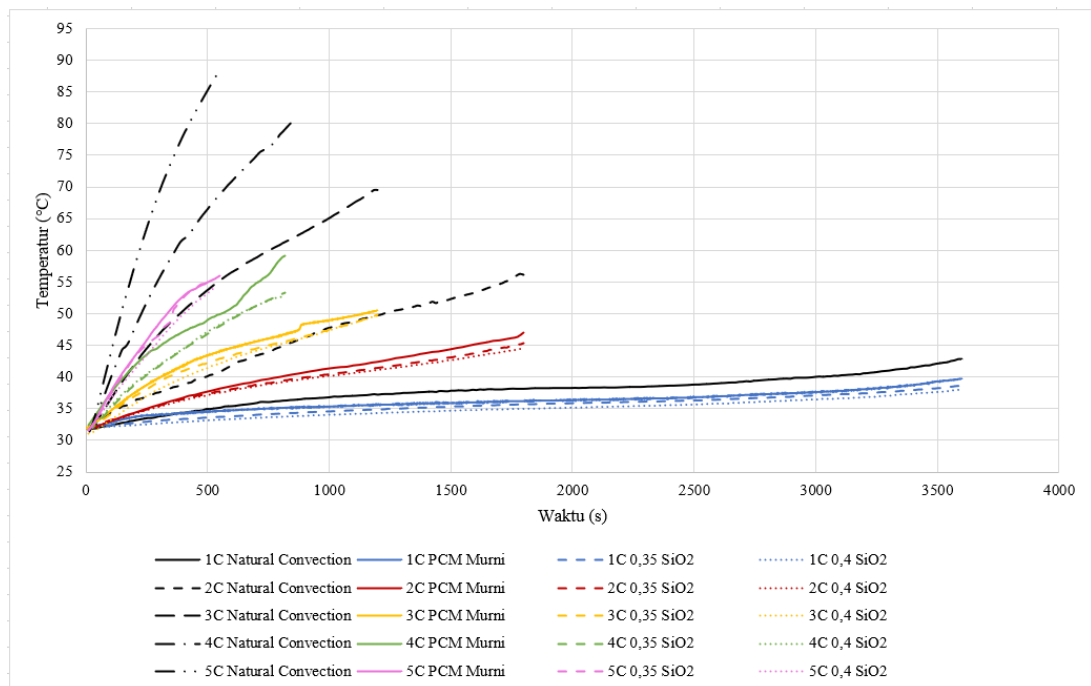
Nilai temperatur tertinggi terdapat pada pengujian arus 4C dengan sistem *natural convection* sebesar 80.525 °C dan nilai temperatur terendah terdapat pada pengujian arus 1C dengan rasio 0.4 sebesar 38.525°C. Kenaikan *discharge rate* tentunya akan sebanding dengan kenaikan arus yang mengalir melalui baterai, apabila *discharge rate* semakin tinggi, maka arus yang mengalir melalui baterai juga akan meningkat juga semakin tinggi juga. Hal tersebut mengakibatkan energi panas yang dihasilkan oleh baterai akan diproduksi semakin cepat juga sehingga ketika baterai dilakukan

discharging dengan *discharge rate* yang tinggi maka baterai akan semakin cepat panas. Sehingga ditunjukkan bahwa semakin tinggi *discharge rate*, maka semakin cepat kenaikan temperatur baterai. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa, dengan kondisi ketebalan PCM komposit yang sama, PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.4 selalu memiliki temperatur akhir yang lebih rendah dibandingkan dengan PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.35. Hal tersebut menunjukkan bahwa banyaknya *filler* (serbuk silika) yang dicampurkan pada PCM dan ketebalan PCM yang semakin meningkat dapat meningkatkan efisiensi pendinginan baterai. Pada grafik juga terlihat bahwa, ketika ketebalan PCM komposit semakin besar, maka temperatur baterai akan semakin menurun. Hal tersebut dapat terjadi karena lapisan PCM yang lebih tebal dapat mendistribusikan panas yang lebih merata sehingga temperatur keseluruhan baterai dapat dijaga lebih stabil. Selain itu, semakin tebal lapisan PCM, maka kapasitas penyerapan panas dari baterai akan lebih besar sehingga dapat membantu menjaga temperatur baterai tetap rendah dalam jangka waktu yang lama.

Berdasarkan pada grafik tersebut, sebenarnya belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

4.2.2 Analisis pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 6 mm

Berdasarkan hasil pengujian baterai menggunakan sistem pendinginan *natural convection*, PCM murni 6 mm, serta PCM komposit pada ketebalan 6 mm dengan rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 diperoleh grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi tersebut. Grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada ketebalan 6 mm ditunjukkan pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Temperatur terhadap Waktu pada Ketebalan 6 mm

Berdasarkan Gambar 4.2 tersebut, didapatkan pada pengujian arus 1C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 42.8°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 39.75°C serta dengan rasio 0.35, temperatur meningkat secara perlahan hingga mencapai temperatur maksimal pada 38.7°C sementara pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal pada 38.05°C. Pada pengujian arus 2C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 56.15°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 45.3°C serta dengan rasio 0.35, temperatur meningkat lebih cepat dibandingkan dengan 1C hingga mencapai temperatur maksimal pada 45.3°C sedangkan pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.5°C. Pada pengujian arus 3C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 69.5°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 50.5°C serta dengan rasio 0.35 temperatur meningkat cukup cepat hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 49.775°C, sedangkan pada rasio 0.4 temperatur juga meningkat cepat dengan temperatur maksimal sebesar 49.725°C. Pada pengujian arus 4C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 80.525°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 59.1°C serta dengan rasio 0.35 temperatur meningkat sangat cepat hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 53.4°C, sedangkan pada rasio 0.4 temperatur juga meningkat cepat dengan temperatur maksimal sebesar 52.45°C. Pada pengujian arus 5C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 88.925°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 56.025°C serta dengan rasio 0.35 temperatur meningkat sangat cepat hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 55.15°C, sedangkan pada rasio 0.4 temperatur juga meningkat cepat dengan temperatur maksimal sebesar 53.95°C.

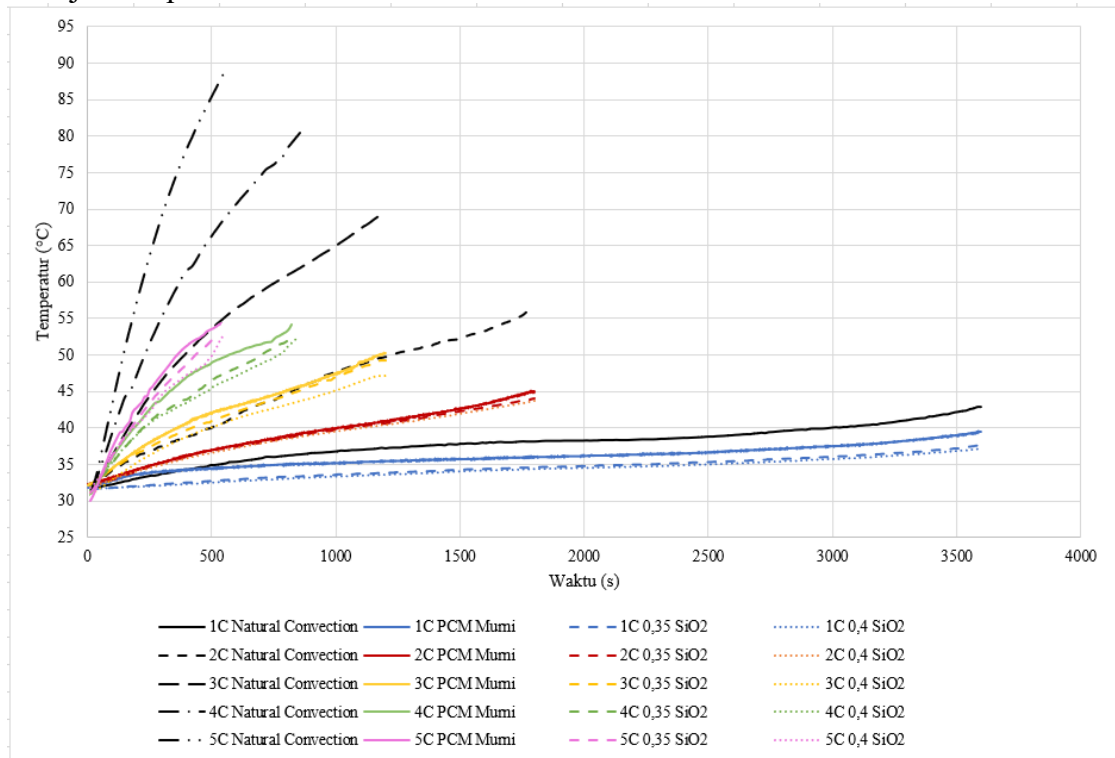
Nilai temperatur tertinggi terdapat pada pengujian arus 5C dengan *natural convection* sebesar 88.925°C dan nilai temperatur terendah terdapat pada pengujian arus 1C dengan rasio 0.4 sebesar 38.05°C. Kenaikan *discharge rate* tentunya akan sebanding dengan kenaikan arus yang mengalir melalui baterai, apabila *discharge rate* semakin tinggi, maka arus yang mengalir melalui baterai juga akan meningkat juga semakin tinggi juga. Hal tersebut mengakibatkan energi panas yang dihasilkan oleh baterai akan diproduksi semakin cepat juga sehingga ketika baterai dilakukan *discharging* dengan *discharge rate* yang tinggi maka baterai akan semakin cepat panas. Sehingga ditunjukkan bahwa semakin tinggi *discharge rate*, maka semakin cepat kenaikan temperatur baterai. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa, dengan kondisi ketebalan PCM komposit yang sama, PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.4 selalu memiliki temperatur akhir yang lebih rendah dibandingkan dengan PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.35. Hal tersebut menunjukkan bahwa banyaknya *filler* (serbuk silika) yang dicampurkan pada PCM dan ketebalan PCM yang semakin meningkat dapat meningkatkan efisiensi pendinginan baterai. Pada grafik juga terlihat bahwa, ketika ketebalan PCM komposit semakin besar, maka temperatur baterai akan semakin menurun. Hal tersebut dapat terjadi karena lapisan PCM yang lebih tebal dapat mendistribusikan panas yang lebih merata sehingga temperatur keseluruhan baterai dapat dijaga lebih stabil. Selain itu, semakin tebal lapisan PCM, maka kapasitas penyerapan panas dari baterai akan lebih besar sehingga dapat membantu menjaga temperatur baterai tetap rendah dalam jangka waktu yang lama.

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai.

Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

4.2.3 Analisis pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 9 mm

Berdasarkan hasil pengujian baterai menggunakan sistem pendinginan *natural convection*, PCM murni, serta PCM komposit pada ketebalan 9 mm dengan rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 diperoleh grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi tersebut. Grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada ketebalan 9 mm ditunjukkan pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Temperatur terhadap Waktu pada Ketebalan 9 mm

Berdasarkan Gambar 4.3 tersebut, didapatkan pada pengujian arus 1C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 42.8°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 39.5°C serta dengan rasio 0.35, temperatur meningkat secara perlahan hingga mencapai temperatur maksimal pada 37.725°C sementara pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal pada 37.225°C. Pada pengujian arus 2C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 56.15°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 44.925°C serta dengan rasio 0.35, temperatur meningkat lebih cepat dibandingkan dengan 1C hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.075°C sedangkan pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal pada 43.65°C. Pada pengujian arus 3C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 69.5°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 50.275°C serta dengan rasio 0.35, temperatur meningkat cukup cepat hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 49.325°C, sedangkan pada rasio 0.4 temperatur juga meningkat cepat dengan temperatur maksimal sebesar 47.075°C. Pada pengujian arus 4C dengan sistem *natural convection*,

temperatur maksimalnya sebesar 80.525°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 54.1°C serta dengan rasio 0.35 temperatur meningkat sangat cepat hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 52.375°C, sedangkan pada rasio 0.4 temperatur juga meningkat cepat dengan temperatur maksimal sebesar 52.25°C. Pada pengujian arus 5C dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 88.925°C dan dengan sistem PCM murni, temperatur maksimalnya sebesar 54.3°C serta dengan rasio 0.35 temperatur meningkat sangat cepat hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 52.9°C, sedangkan pada rasio 0.4 temperatur juga meningkat cepat dengan temperatur maksimal sebesar 52.567°C.

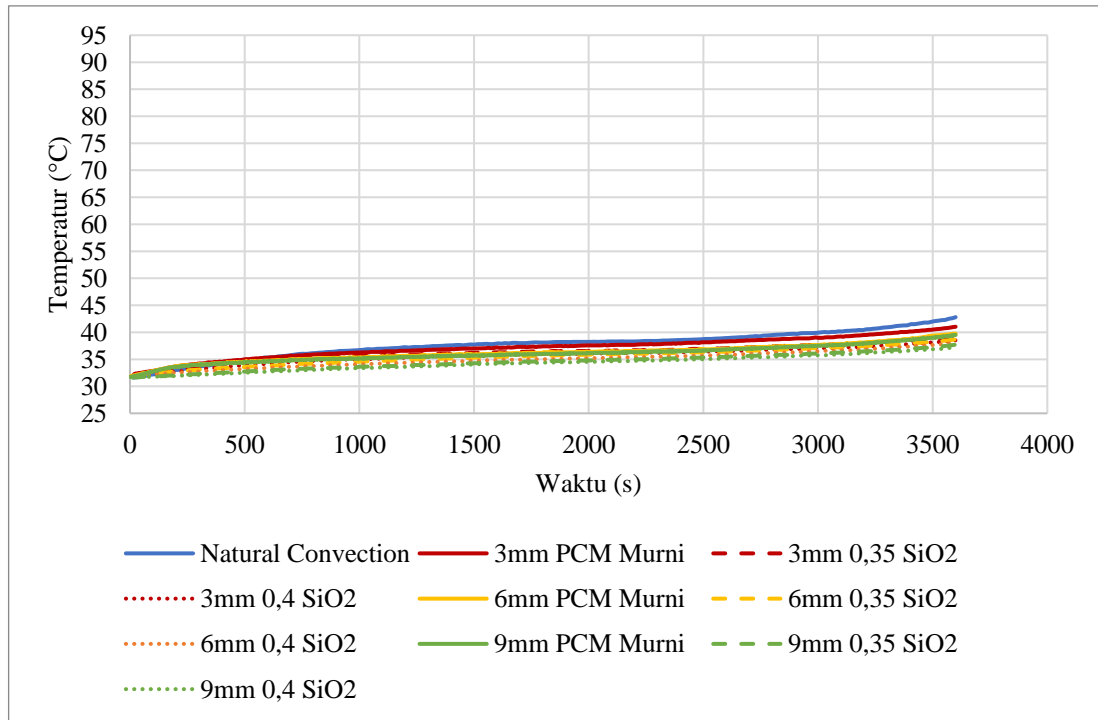
Nilai temperatur tertinggi terdapat pada pengujian arus 5C dengan *natural convection* sebesar 88.925°C dan nilai temperatur terendah terdapat pada pengujian arus 1C dengan rasio 0.4 sebesar 37.225°C. Pada ketebalan 9 mm, sistem pendinginan lebih efektif dalam mengontrol kenaikan temperatur dibandingkan dengan ketebalan 3 mm dan 6 mm. Hal ini terlihat dari stabilitas temperatur yang lebih baik pada *discharge rate* yang lebih tinggi. Kenaikan *discharge rate* tentunya akan sebanding dengan kenaikan arus yang mengalir melalui baterai, apabila *discharge rate* semakin tinggi, maka arus yang mengalir melalui baterai juga akan meningkat juga semakin tinggi juga. Hal tersebut mengakibatkan energi panas yang dihasilkan oleh baterai akan diproduksi semakin cepat juga sehingga ketika baterai dilakukan *discharging* dengan *discharge rate* yang tinggi maka baterai akan semakin cepat panas. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa, dengan kondisi ketebalan PCM komposit yang sama, PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.4 selalu memiliki temperatur akhir yang lebih rendah dibandingkan dengan PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.35. Hal tersebut menunjukkan bahwa banyaknya *filler* (serbuk silika) yang dicampurkan pada PCM dan ketebalan PCM yang semakin meningkat dapat meningkatkan efisiensi pendinginan baterai. Pada grafik juga terlihat bahwa, ketika ketebalan PCM komposit semakin besar, maka temperatur baterai akan semakin menurun. Hal tersebut dapat terjadi karena lapisan PCM yang lebih tebal dapat mendistribusikan panas yang lebih merata sehingga temperatur keseluruhan baterai dapat dijaga lebih stabil. Selain itu, semakin tebal lapisan PCM, maka kapasitas penyerapan panas dari baterai akan lebih besar sehingga dapat membantu menjaga temperatur baterai tetap rendah dalam jangka waktu yang lama.

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

4.3 Pengaruh Variasi Rasio Material *Filler* pada PCM Komposit terhadap Kenaikan Temperatur Baterai

4.3.1 Analisis pada Baterai dengan *Discharging Rate* 1C

Berdasarkan hasil pengujian baterai dengan kondisi *discharging* 1C pada sistem *natural convection*, PCM murni 3 mm, 6 mm, dan 9 mm, serta PCM komposit ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm dengan rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 diperoleh grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi tersebut. Grafik hubungan antara temperatur terhadap waktu pada kondisi *discharging rate* 1C ditunjukkan pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Kondisi Discharging 1C

Pada kondisi *discharging* 1C ini, dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 42.8°C, dengan sistem PCM murni 3 mm, temperatur maksimalnya sebesar 41.025°C, dengan PCM murni 6 mm didapatkan temperatur maksimal sebesar 39.75°C, dengan PCM murni 9 mm didapatkan temperatur sebesar 39.5°C. Kemudian didapatkan pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan rasio 0.35, temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal pada 39.175°C sedangkan pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah bila dibandingkan dengan rasio 0.35 hingga mencapai temperatur maksimal pada 38.525°C. Pada PCM komposit ketebalan 6 mm dengan rasio 0.35, temperatur juga cenderung meningkat hingga mencapai titik maksimal pada temperatur 38.7°C dan pada rasio 0.4, temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal sebesar 38.05°C. Kemudian, pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.35, temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal pada 37.725°C dan pada rasio 0.4, temperatur juga meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal pada 37.225°C.

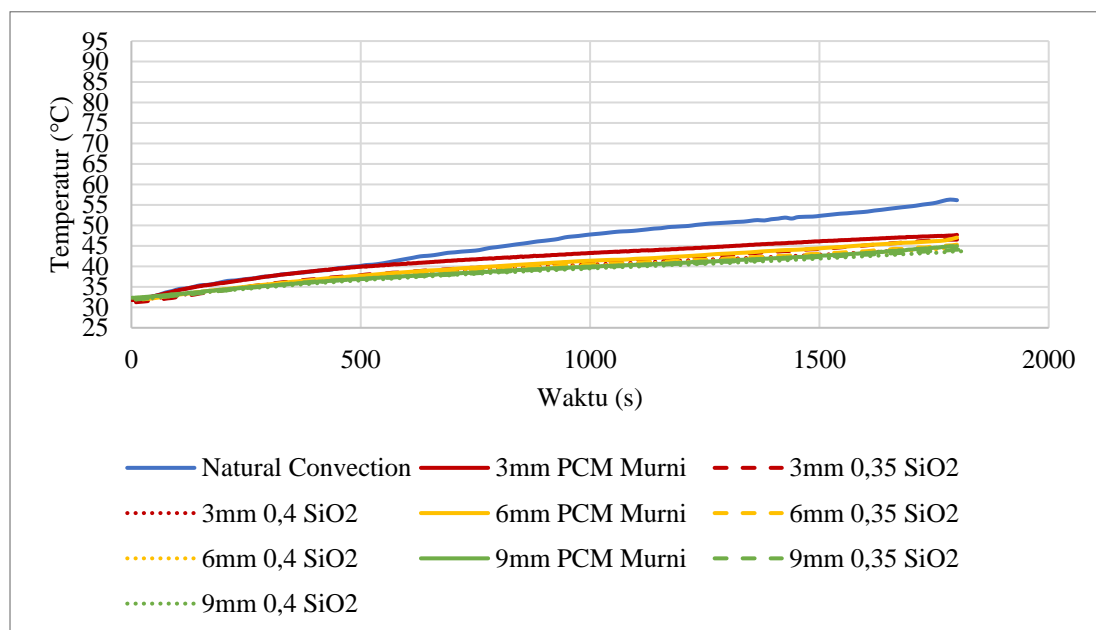
Nilai temperatur tertinggi terdapat pada sistem *natural convection* dengan temperatur maksimalnya sebesar 42.8°C dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.4 sebesar 37.225°C. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa, dengan kondisi ketebalan PCM komposit yang sama, PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.4 selalu memiliki temperatur akhir yang lebih rendah dibandingkan dengan PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.35. Hal tersebut menunjukkan bahwa banyaknya *filler* (serbuk silika) yang dicampurkan pada PCM dan ketebalan PCM yang semakin meningkat dapat meningkatkan efisiensi pendinginan baterai. Pada grafik juga terlihat bahwa, ketika ketebalan PCM komposit semakin besar, maka temperatur baterai akan semakin menurun. Hal tersebut dapat terjadi karena lapisan PCM yang lebih tebal dapat mendistribusikan panas yang lebih merata sehingga temperatur keseluruhan baterai dapat dijaga lebih stabil. Selain itu, semakin tebal lapisan PCM, maka kapasitas

penyerapan panas dari baterai akan lebih besar sehingga dapat membantu menjaga temperatur baterai tetap rendah dalam jangka waktu yang lama. Pada kondisi *discharging* 1C ini, PCM komposit dengan ketebalan 9 mm dan rasio *filler* 0.4 merupakan yang paling optimal karena memiliki temperatur paling rendah dan menunjukkan efektivitas yang lebih baik dalam mengontrol kenaikan temperatur bila dibandingkan dengan ketebalan 3 mm dan 6 mm. Hal ini terlihat dari stabilitas temperatur yang lebih rendah dan lebih stabil.

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

4.3.2 Analisis pada Baterai dengan *Discharging Rate* 2C

Berdasarkan hasil pengujian baterai dengan kondisi *discharging* 2C pada sistem *natural convection*, PCM murni 3 mm, 6 mm, dan 9 mm, serta PCM komposit ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm dengan rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 diperoleh grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi tersebut. Grafik hubungan antara temperatur terhadap waktu pada kondisi *discharging rate* 2C ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Kondisi *Discharging* 2C

Pada kondisi *discharging* 2C ini, dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 56.15°C, dengan sistem PCM murni 3 mm, temperatur maksimalnya sebesar 47.7°C, dengan PCM murni 6 mm didapatkan temperatur maksimal sebesar 47.025°C, dengan PCM murni 9 mm didapatkan temperatur sebesar 44.925°C. Kemudian didapatkan pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan rasio 0.35, temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal pada 46.525°C sedangkan pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah bila dibandingkan dengan rasio 0.35 hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.625°C. Pada PCM

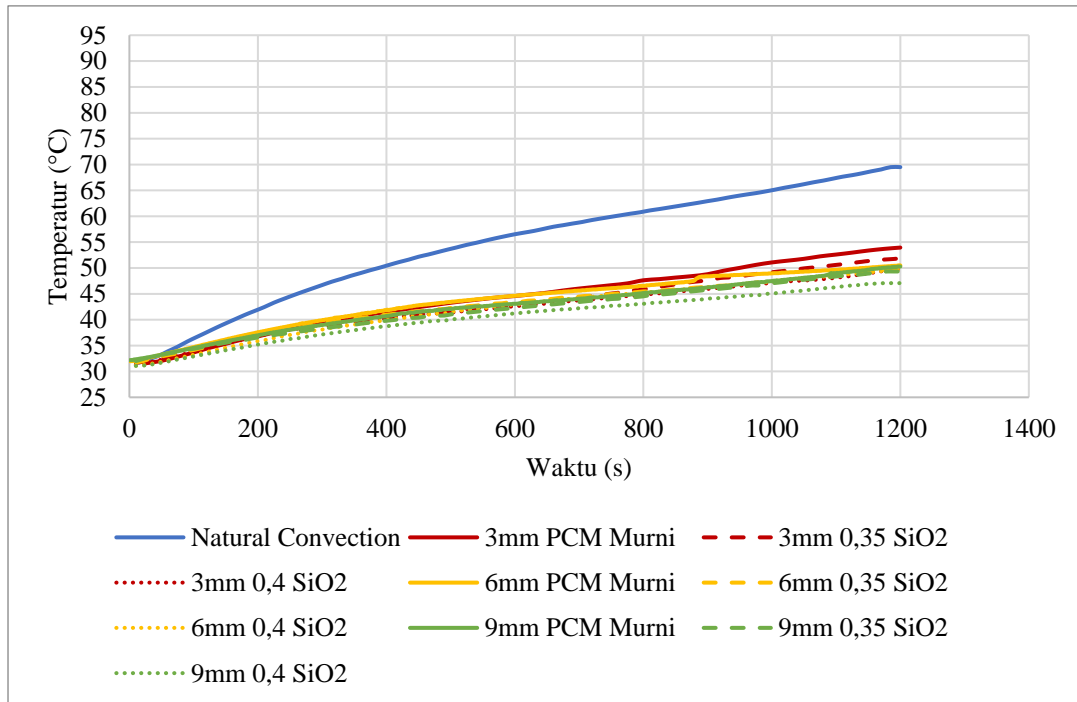
komposit ketebalan 6 mm dengan rasio 0.35, temperatur juga cenderung meningkat hingga mencapai titik maksimal pada temperatur 45.3°C dan pada rasio 0.4, temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal sebesar 44.5°C. Kemudian, pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.35, temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.075°C dan pada rasio 0.4, temperatur juga meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal pada 43.675°C.

Nilai temperatur tertinggi terdapat pada dengan sistem *natural convection* dengan temperatur maksimalnya sebesar 56.15°C dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.4 sebesar 43.675°C. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa, dengan kondisi ketebalan PCM komposit yang sama, PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.4 selalu memiliki temperatur akhir yang lebih rendah dibandingkan dengan PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.35. Hal tersebut menunjukkan bahwa banyaknya *filler* (serbuk silika) yang dicampurkan pada PCM dan ketebalan PCM yang semakin meningkat dapat meningkatkan efisiensi pendinginan baterai. Pada grafik juga terlihat bahwa, ketika ketebalan PCM komposit semakin besar, maka temperatur baterai akan semakin menurun. Hal tersebut dapat terjadi karena lapisan PCM yang lebih tebal dapat mendistribusikan panas yang lebih merata sehingga temperatur keseluruhan baterai dapat dijaga lebih stabil. Selain itu, semakin tebal lapisan PCM, maka kapasitas penyerapan panas dari baterai akan lebih besar sehingga dapat membantu menjaga temperatur baterai tetap rendah dalam jangka waktu yang lama. Pada kondisi *discharging* 2C ini, PCM komposit dengan ketebalan 9 mm dan rasio *filler* 0.4 merupakan yang paling optimal karena memiliki temperatur paling rendah dan menunjukkan efektivitas yang lebih baik dalam mengontrol kenaikan temperatur bila dibandingkan dengan ketebalan 3 mm dan 6 mm. Hal ini terlihat dari stabilitas temperatur yang lebih rendah dan lebih stabil.

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

4.3.3 Analisis pada Baterai dengan *Discharging Rate* 3C

Berdasarkan hasil pengujian baterai dengan kondisi *discharging* 3C pada sistem *natural convection*, PCM murni 3 mm, 6 mm, dan 9 mm, serta PCM komposit ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm dengan rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 diperoleh grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi tersebut. Grafik hubungan antara temperatur terhadap waktu pada kondisi *discharging rate* 3C ditunjukkan pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Kondisi *Discharging* 3C

Pada kondisi *discharging* 3C ini, dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 69.5°C, dengan sistem PCM murni 3 mm, temperatur maksimalnya sebesar 53.95°C, dengan PCM murni 6 mm didapatkan temperatur maksimal sebesar 50.5°C, dengan PCM murni 9 mm didapatkan temperatur sebesar 50.275°C. Kemudian, didapatkan pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan rasio 0.35, temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal pada 51.875°C sedangkan pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah bila dibandingkan dengan rasio 0.35 hingga mencapai temperatur maksimal pada 49.775°C. Pada PCM komposit ketebalan 6 mm dengan rasio 0.35, temperatur juga cenderung meningkat hingga mencapai titik maksimal pada temperatur 49.775°C dan pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal sebesar 49.725°C. Kemudian, pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.35, temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal pada 49.325°C dan pada rasio 0.4, temperatur juga meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal pada 47.075°C.

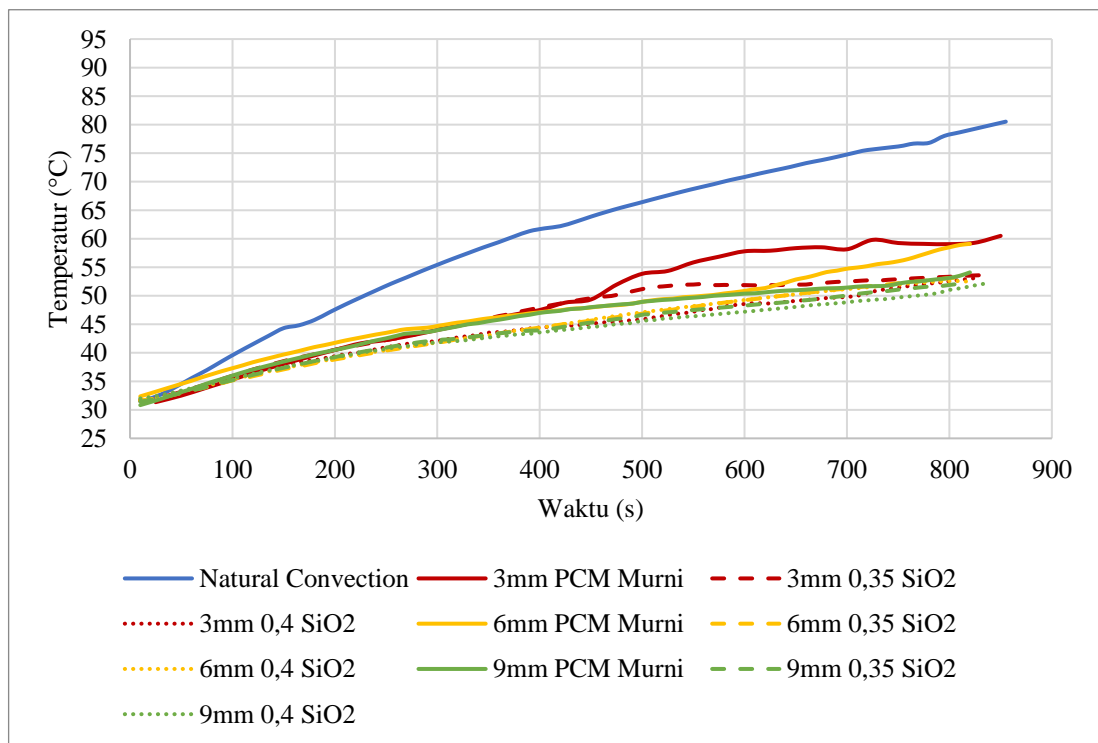
Nilai temperatur tertinggi terdapat pada dengan sistem *natural convection* dengan temperatur maksimalnya sebesar 69.5°C dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.4 sebesar 47.075°C. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa, dengan kondisi ketebalan PCM komposit yang sama, PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.4 selalu memiliki temperatur akhir yang lebih rendah dibandingkan dengan PCM komposit yang memiliki rasio *filler* serbuk silika 0.35. Hal tersebut menunjukkan bahwa banyaknya *filler* (serbuk silika) yang dicampurkan pada PCM dan ketebalan PCM yang semakin meningkat dapat meningkatkan efisiensi pendinginan baterai. Pada grafik juga terlihat bahwa, ketika ketebalan PCM komposit semakin besar, maka temperatur baterai akan semakin menurun. Hal tersebut dapat terjadi karena lapisan PCM yang lebih tebal dapat mendistribusikan panas yang lebih merata sehingga temperatur keseluruhan baterai dapat dijaga lebih stabil. Selain itu, semakin tebal lapisan PCM, maka kapasitas

penyerapan panas dari baterai akan lebih besar sehingga dapat membantu menjaga temperatur baterai tetap rendah dalam jangka waktu yang lama. Pada kondisi *discharging* 2C ini, PCM komposit dengan ketebalan 9 mm dan rasio *filler* 0.4 merupakan yang paling optimal karena memiliki temperatur paling rendah dan menunjukkan efektivitas yang lebih baik dalam mengontrol kenaikan temperatur bila dibandingkan dengan ketebalan 3 mm dan 6 mm. Hal ini terlihat dari stabilitas temperatur yang lebih rendah dan lebih stabil.

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

4.3.4 Analisis pada Baterai dengan *Discharging Rate* 4C

Berdasarkan hasil pengujian baterai dengan kondisi *discharging* 4C pada sistem *natural convection*, PCM murni 3 mm, 6 mm, dan 9 mm, serta PCM komposit ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm dengan rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 diperoleh grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi tersebut. Grafik hubungan antara temperatur terhadap waktu pada kondisi *discharging rate* 4C ditunjukkan pada Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Kondisi *Discharging* 4C

Pada kondisi *discharging* 4C ini, dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 80.525°C, dengan sistem PCM murni 3 mm, temperatur maksimalnya sebesar 60.5°C, dengan PCM murni 6 mm didapatkan temperatur maksimal sebesar 59.1°C, dengan PCM murni 9 mm didapatkan temperatur sebesar 54.1°C. Kemudian, didapatkan pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan rasio 0.35,

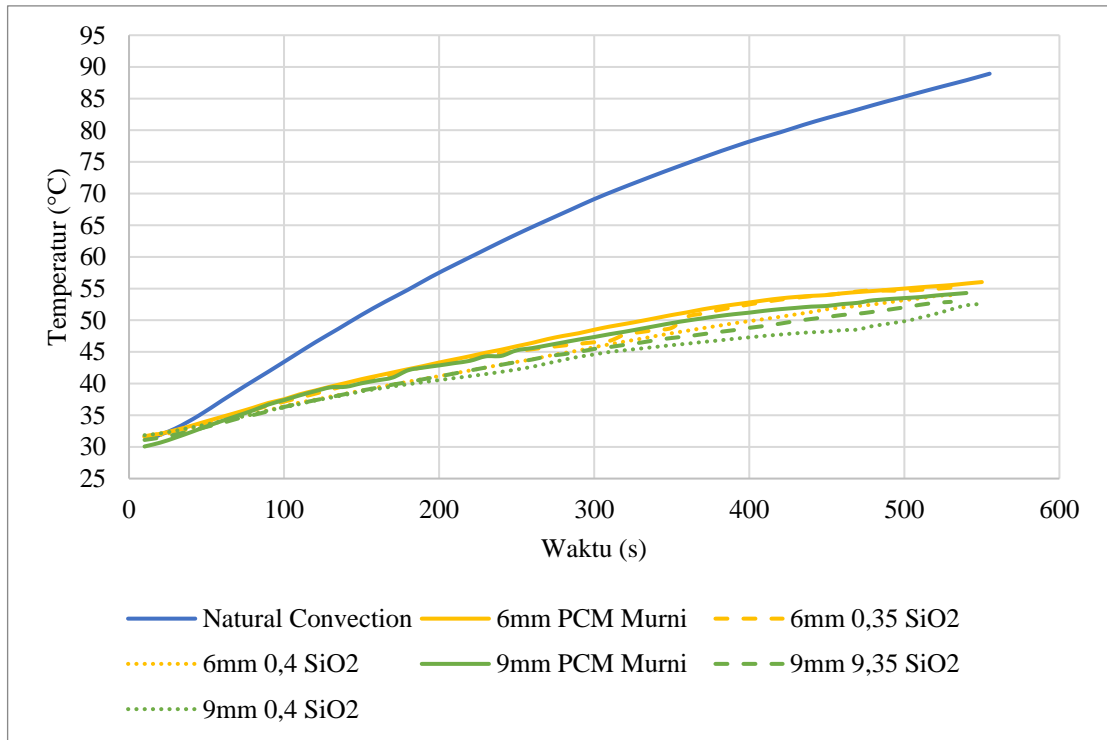
temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal pada 53.6°C sedangkan pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah bila dibandingkan dengan rasio 0.35 hingga mencapai temperatur maksimal pada 53.167°C. Pada PCM komposit ketebalan 6 mm dengan rasio 0.35, temperatur juga cenderung meningkat hingga mencapai titik maksimal pada temperatur 53.4°C dan pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal sebesar 52.45°C. Kemudian, pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.35, temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal pada 52.375°C dan pada rasio 0.4, temperatur juga meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal pada 52.25°C.

Nilai temperatur tertinggi terdapat dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 80.525°C dan nilai temperatur maksimal terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.4 sebesar 52.25 °C. Secara keseluruhan, rasio *filler* serbuk silika 0.4 cenderung memberikan sedikit pengurangan temperatur dibandingkan dengan rasio 0.35 untuk semua ketebalan PCM komposit yang diuji. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan rasio *filler* berfungsi efektif dalam mengurangi laju kenaikan temperatur selama proses *discharging*. Pada kondisi *discharging* 4C, grafik temperatur pada PCM komposit ketebalan 9 mm terlihat cenderung lebih rendah saat kondisi akhir dibandingkan pada PCM komposit ketebalan 3 dan 6 mm. Hal ini berarti pada komposisi PCM komposit dengan ketebalan 9 mm merupakan yang paling optimal saat *discharging* 4C.

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

4.3.5 Analisis pada Baterai dengan *Discharging Rate* 5C

Berdasarkan hasil pengujian baterai kondisi *discharging* 5C pada sistem *natural convection*, PCM murni 6 mm, dan 9 mm, serta PCM komposit ketebalan 6 mm dan 9 mm dengan rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 diperoleh grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi tersebut. Grafik hubungan antara temperatur terhadap waktu pada kondisi *discharging rate* 5C ditunjukkan pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Kondisi *Discharging* 5C

Pada kondisi *discharging* 5C ini, dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 88.925°C, dengan PCM murni 6 mm didapatkan temperatur maksimal sebesar 56.025°C, dengan PCM murni 9 mm didapatkan temperatur sebesar 54.3°C. Kemudian, didapatkan pada PCM komposit ketebalan 6 mm dengan rasio 0.35, temperatur juga cenderung meningkat hingga mencapai titik maksimal pada temperatur 55.15°C dan pada rasio 0.4, temperatur meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal sebesar 53.95°C. Kemudian, pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.35, temperatur meningkat hingga mencapai temperatur maksimal pada 52.9°C dan pada rasio 0.4, temperatur juga meningkat sedikit lebih rendah hingga mencapai temperatur maksimal pada 52.567°C.

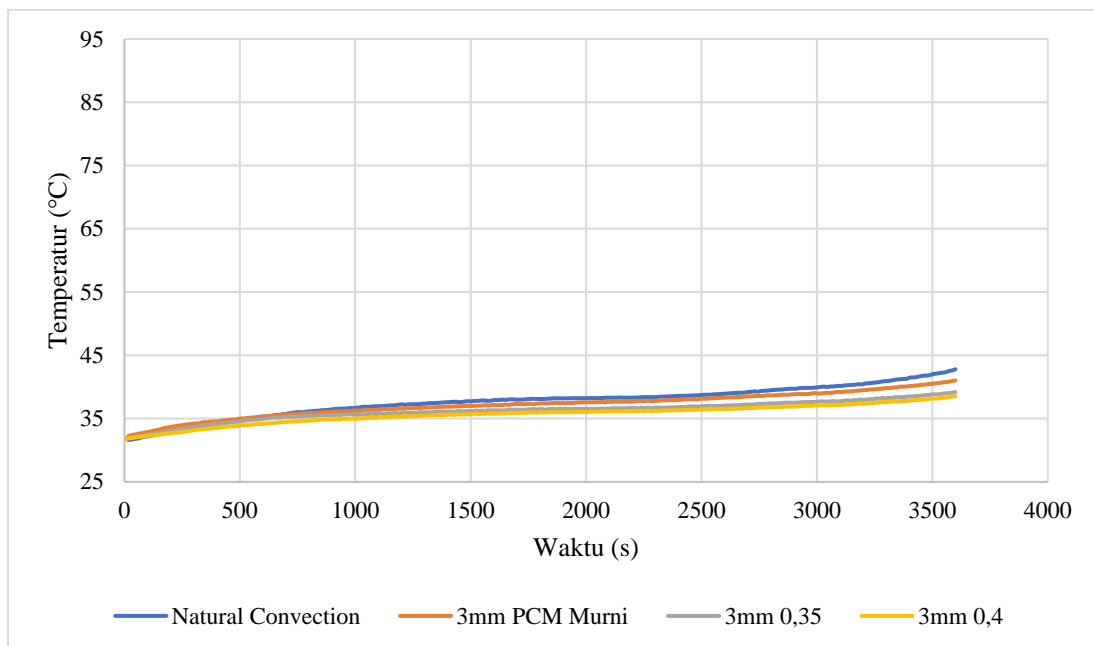
Nilai temperatur tertinggi terdapat pada dengan sistem *natural convection*, temperatur maksimalnya sebesar 88.925°C dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.4 sebesar 52.567°C. Secara keseluruhan, rasio *filler* serbuk silika 0.4 cenderung memberikan sedikit pengurangan temperatur dibandingkan dengan rasio 0.35 untuk semua ketebalan PCM komposit yang diuji. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan rasio *filler* berfungsi efektif dalam mengurangi laju kenaikan temperatur selama proses *discharging*. Pada kondisi *discharging* 5C, grafik temperatur pada PCM komposit ketebalan 9 mm pada rasio 0.35 terlihat cenderung lebih rendah saat kondisi akhir dibandingkan pada PCM komposit ketebalan 6 mm.

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

4.4 Pengaruh Penambahan PCM dan Rasio Material *Filler* terhadap Kenaikan Temperatur Baterai

4.4.1 Analisis pada Baterai dengan *Discharging Rate* 1C pada Ketebalan PCM Komposit 3 mm

Berdasarkan hasil pengujian baterai menggunakan sistem pendinginan *natural convection*, sistem pendinginan PCM murni, dan juga saat menggunakan sistem pendinginan PCM komposit pada ketebalan 3 mm dengan rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 pada kondisi *discharging* 1C diperoleh grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi tersebut. Grafik perbandingan antara temperatur terhadap waktu pada kondisi *natural convection*, saat menggunakan PCM murni, dan saat menggunakan PCM komposit ditunjukkan pada Gambar 4.9 berikut.

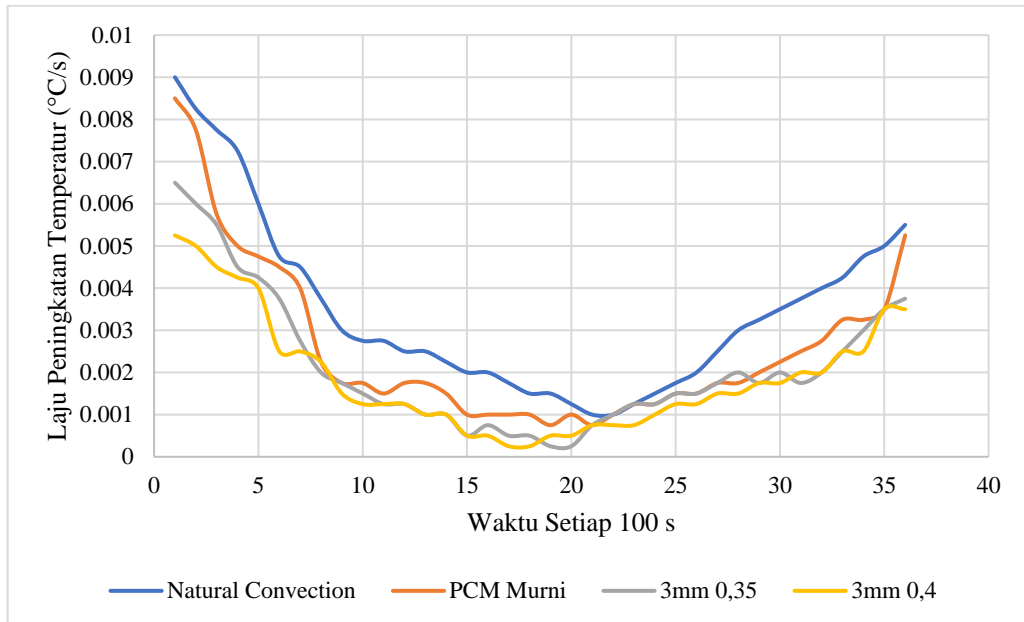


Gambar 4.9 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Ketebalan 3 mm pada Kondisi *Discharging* 1C

Pada Gambar 4.9 tersebut menunjukkan bahwa pada sistem pendinginan *natural convection*, temperatur meningkat paling tinggi secara keseluruhan hingga mencapai pada temperatur maksimalnya pada 42.8°C setelah 3600 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni, temperatur juga meningkat secara perlahan namun sedikit lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 41.025°C. Pada saat menggunakan sistem pendinginan PCM komposit 3 mm dengan rasio 0.35 temperatur meningkat cenderung lebih rendah hingga pada temperatur maksimal sebesar 39.175°C sedangkan pada PCM komposit 3 mm dengan rasio 0.4 temperatur meningkat paling rendah dibandingkan dengan ketiga sistem pendinginan lainnya hingga mencapai titik temperatur maksimal pada 38.525°C.

Nilai temperatur tertinggi terdapat pada sistem pendinginan *natural convection* sebesar 42.8°C dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan rasio 0.4 sebesar 38.525°C. Pada sistem pendinginan PCM murni dapat menurunkan temperatur sebesar 4.15% dibandingkan dengan sistem *natural convection*. Pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan rasio 0.35 dapat menurunkan temperatur sebesar 8.47% dibandingkan dengan *natural convection* dan 4.51% jika dibandingkan dengan sistem PCM murni. Lalu, pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan rasio 0.4

dapat menurunkan temperatur sebesar 9.99% dibandingkan dengan *natural convection* dan 6.09% dibandingkan dengan sistem PCM murni. Hal tersebut menunjukkan, pada kondisi *discharging* 1C, PCM komposit ketebalan 3 mm dengan rasio serbuk silika 0.4 merupakan yang paling optimal dalam menjaga temperatur lebih rendah dibandingkan dengan rasio 0.35 dan sistem pendinginan lainnya.



Gambar 4.10 Grafik Laju Peningkatan Temperatur pada Ketebalan 3 mm pada Kondisi *Discharging* 1C

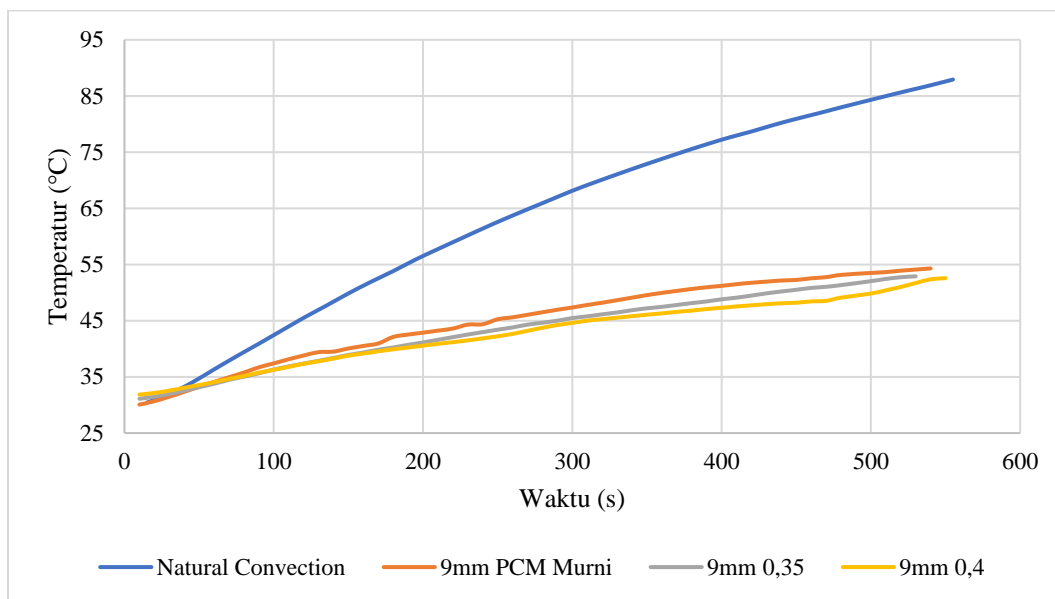
Pada Gambar 4.10 di atas menunjukkan bahwa pada sistem pendinginan *natural convection*, laju peningkatan temperatur mulai tinggi sekitar 0.009°C/s pada awal *discharging* dan menurun secara bertahap hingga pada 0.001°C/s pada interval 20 atau setelah 2000 detik, kemudian meningkat kembali secara perlahan hingga mencapai pada 0.0055°C/s setelah 3600 detik. Kemudian pada sistem pendinginan PCM murni, laju peningkatan temperatur menurun secara lebih lambat dibandingkan dengan *natural convection* mulai sekitar 0.0085°C/s pada awal *discharging* dan menurun hingga pada $0.00075^{\circ}\text{C/s}$ dan kemudian meningkat kembali hingga mencapai $0.00525^{\circ}\text{C/s}$. Pada sistem pendinginan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.35, laju peningkatan temperatur mulai sekitar 0.0065°C/s pada awalnya dan mulai menurun hingga pada 0.0005°C/s lalu kembali meningkat hingga pada $0.00375^{\circ}\text{C/s}$. Selanjutnya pada sistem pendinginan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4, laju peningkatan temperatur mulai sekitar $0.00525^{\circ}\text{C/s}$ di awal dan mulai menurun hingga sekitar 0.0005°C/s baru kemudian meningkat perlahan hingga pada 0.0035°C/s .

Berdasarkan grafik tersebut, terlihat pada sistem *natural convection* memiliki laju peningkatan temperatur awal yang tinggi namun tidak mampu mempertahankan peningkatan yang signifikan dalam jangka panjang. Pada sistem PCM murni memberikan peningkatan laju temperatur yang lebih stabil namun kurang efektif dibandingkan dengan PCM komposit. Kemudian pada penggunaan serbuk silika dengan rasio 0.35 dalam PCM komposit menunjukkan peningkatan laju temperatur yang lebih stabil dan efektif dibandingkan dengan PCM murni. Pada PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 menunjukkan performa terbaik dalam mempertahankan laju peningkatan temperatur yang lebih stabil. Secara keseluruhan, hal tersebut

menunjukkan bahwa penggunaan PCM komposit membantu menjaga laju peningkatan temperatur yang lebih stabil dibandingkan dengan sistem *natural convection*.

4.4.2 Analisis pada Baterai dengan *Discharging Rate* 5C pada Ketebalan PCM Komposit 9 mm

Berdasarkan hasil pengujian baterai menggunakan sistem pendinginan *natural convection*, sistem pendinginan PCM murni, dan juga saat menggunakan sistem pendinginan PCM komposit pada ketebalan 9 mm dengan rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 pada kondisi *discharging* 5C diperoleh grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi tersebut. Grafik perbandingan antara temperatur terhadap waktu pada kondisi *natural convection*, saat menggunakan PCM murni, dan saat menggunakan PCM komposit ditunjukkan pada Gambar 4.11 berikut.

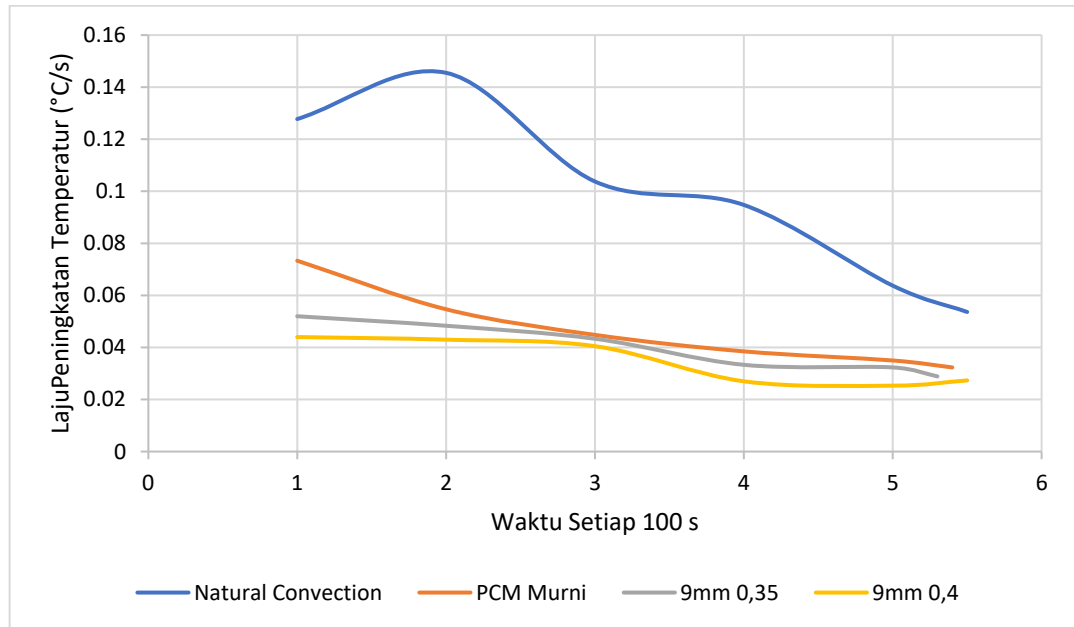


Gambar 4.11 Grafik Temperatur terhadap Waktu pada Ketebalan 9 mm pada Kondisi *Discharging* 5C

Pada Gambar 4.11 tersebut menunjukkan bahwa pada sistem pendinginan *natural convection*, temperatur meningkat paling tinggi secara keseluruhan hingga mencapai pada temperatur maksimalnya pada 86.925°C. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni, temperatur juga meningkat secara perlahan namun sedikit lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 54.3°C. Pada saat menggunakan sistem pendinginan PCM komposit 3 mm dengan rasio 0.35 temperatur meningkat sedikit lebih rendah hingga pada temperatur maksimal sebesar 52.9°C sedangkan pada PCM komposit 9 mm dengan rasio 0.4 temperatur meningkat paling rendah dibandingkan dengan ketiga sistem pendinginan lainnya hingga mencapai titik temperatur maksimal pada 52.567°C.

Nilai temperatur tertinggi terdapat pada sistem pendinginan *natural convection* sebesar 86.925°C dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.4 sebesar 52.9°C. Pada sistem pendinginan PCM murni dapat menurunkan temperatur sebesar 38.28% dibandingkan dengan sistem *natural convection*. Pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio 0.35 dapat menurunkan temperatur sebesar 39.14% dibandingkan dengan *natural convection* dan 2.57% jika dibandingkan dengan sistem PCM murni. Lalu, pada PCM komposit ketebalan 9 mm

dengan rasio 0.4 dapat menurunkan temperatur sebesar 39.52% dibandingkan dengan *natural convection* dan 3.19% dibandingkan dengan sistem PCM murni. Hal tersebut menunjukkan, pada kondisi *discharging* 5C, PCM komposit ketebalan 9 mm dengan rasio serbuk silika 0.4 merupakan yang paling optimal dalam menjaga temperatur lebih rendah dibandingkan dengan rasio 0.35 dan sistem pendinginan lainnya.



Gambar 4.12 Grafik Laju Peningkatan Temperatur pada Ketebalan 9 mm pada Kondisi *Discharging* 5C

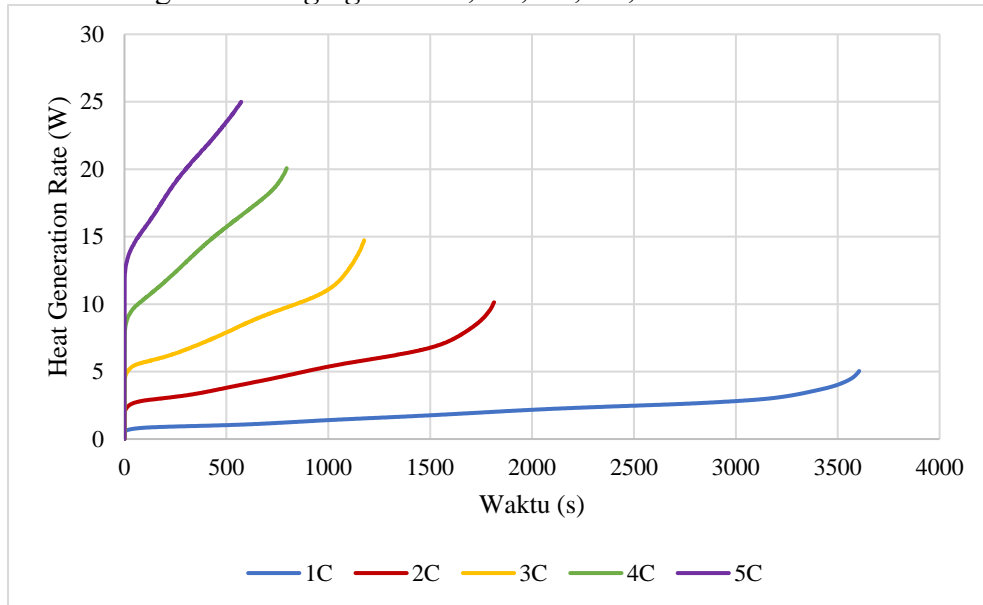
Pada Gambar 4.12 di atas menunjukkan bahwa pada sistem pendinginan *natural convection*, laju peningkatan temperatur mulai tinggi sekitar $0.12775^{\circ}\text{C/s}$ pada awal *discharging* dan menurun secara bertahap hingga pada $0.05363^{\circ}\text{C/s}$. Kemudian pada sistem pendinginan PCM murni, laju peningkatan temperatur menurun secara lebih lambat dibandingkan dengan *natural convection* mulai sekitar $0.07333^{\circ}\text{C/s}$ pada awal *discharging* dan menurun hingga pada $0.03233^{\circ}\text{C/s}$. Pada sistem pendinginan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.35, laju peningkatan temperatur mulai sekitar 0.052°C/s pada awalnya dan mulai menurun hingga pada $0.02888^{\circ}\text{C/s}$. Selanjutnya pada sistem pendinginan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4, laju peningkatan temperatur mulai sekitar 0.044°C/s di awal dan mulai menurun hingga sekitar 0.0273°C/s .

Berdasarkan grafik tersebut, terlihat pada sistem *natural convection* memiliki laju peningkatan temperatur awal yang tinggi namun tidak mampu mempertahankan peningkatan yang signifikan dalam jangka panjang. Pada sistem PCM murni memberikan peningkatan laju temperatur yang lebih stabil namun kurang efektif dibandingkan dengan PCM komposit. Kemudian pada penggunaan serbuk silika dengan rasio 0.35 dalam PCM komposit menunjukkan peningkatan laju temperatur yang lebih stabil dan efektif dibandingkan dengan PCM murni. Pada PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 menunjukkan performa terbaik dalam mempertahankan laju peningkatan temperatur yang lebih stabil. Secara keseluruhan, hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan PCM komposit membantu menjaga laju peningkatan temperatur yang lebih stabil dibandingkan dengan sistem *natural convection* dan PCM murni.

4.5 Pengaruh *Discharging Rate* terhadap *Heat Generation* pada Baterai

4.5.1 Analisis *Heat Generation*

Analisis dilakukan dengan membandingkan *heat generation* saat *discharging* pada baterai dengan *discharging rate* 1C, 2C, 3C, 4C, dan 5C.



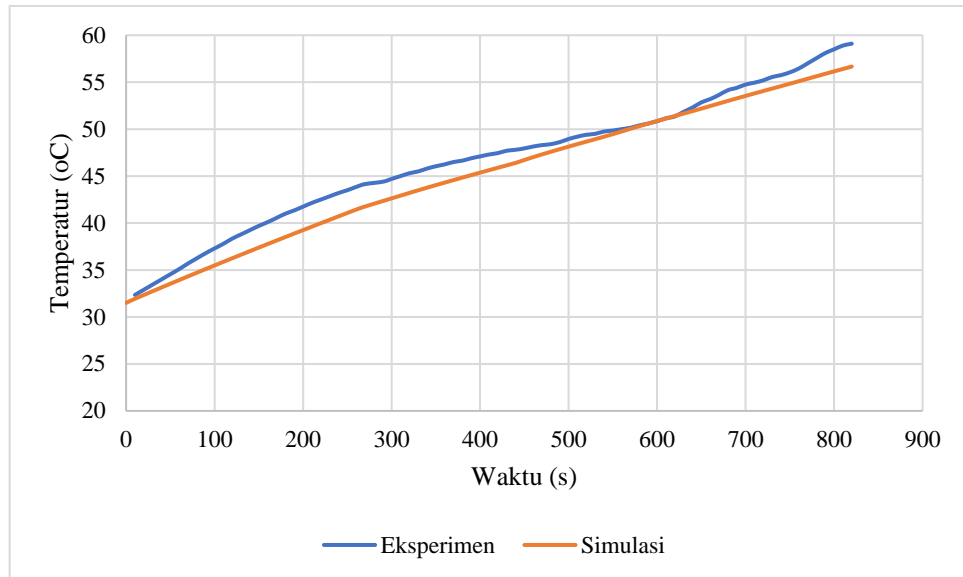
Gambar 4.13 Perbandingan *Heat Generation* pada Semua *Discharging Rate*

Pada gambar di atas menunjukkan perbandingan *heat generation rate* yang dihasilkan oleh baterai pada saat *discharging* dengan *discharging rate* 1C, 2C, 3C, 4C, dan 5C. Berdasarkan data dari hasil eksperimen dan perhitungan, pada *discharging rate* 1C didapatkan rata-rata nilai *heat generation* sebesar sekitar 2.05 W. Kemudian pada *discharging rate* 2C didapatkan rata-rata nilai *heat generation* yang lebih besar daripada 1C, yaitu sekitar 5.16 W. Pada *discharging rate* 3C didapatkan rata-rata nilai *heat generation* sekitar 8.64 W. Pada *discharging rate* 4C dan 5C didapatkan rata-rata nilai *heat generation* masing-masing sekitar 14.27 W dan 19.32 W. Berdasarkan hasil data tersebut menunjukkan bahwa *heat generation* yang ditimbulkan oleh baterai saat *discharging* 1C memiliki *heat generation* terendah dengan *heat generation* maksimalnya sebesar 5.04 W. Untuk *heat generation* tertinggi dihasilkan oleh baterai saat *discharging* 5C dengan nilai *heat generation* maksimalnya sebesar 24.99 W. Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa semakin tinggi *discharging rate*, maka panas yang dihasilkan oleh baterai akan semakin besar. Hal ini dikarenakan semakin tinggi *discharging rate* maka arus yang dialirkan oleh baterai menjadi lebih besar sehingga karena panas yang dihasilkan juga semakin besar, maka waktu kerja dari baterai akan semakin cepat. Pada grafik tersebut terlihat bahwa *heat generation* memiliki tren nilai yang akan naik seiring dengan kenaikan waktu.

4.6 Simulasi CFD

4.6.1 Analisis Hasil Simulasi PCM Murni 6 mm dengan *Discharge Rate* 4C

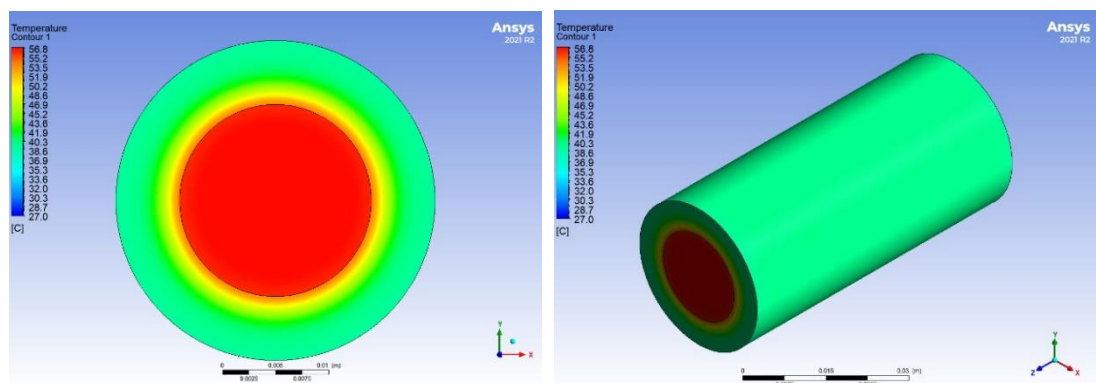
Berdasarkan data simulasi pendinginan baterai litium-ion dengan PCM murni ketebalan 6 mm, diperoleh hubungan antara hasil pengujian eksperimen dan numerik pada *discharge rate* 4C. Hubungan tersebut kemudian digambarkan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada PCM Murni 6 mm dengan *Discharge Rate* 4C

Pada gambar di atas menunjukkan perbandingan hasil temperatur dari eksperimen dan simulasi pada PCM murni. Grafik menunjukkan kenaikan suhu yang linear untuk peningkatan temperatur simulasi, yang berarti kecepatan kenaikan suhu cukup konstan selama waktu pengukuran. Pada suhu awal permukaan baterai dimulai sekitar 31.5°C dan suhu meningkat secara bertahap dan konsisten selama periode 820 detik sehingga mencapai suhu akhir sekitar 56.66°C . Sedangkan untuk temperatur dari eksperimen mencapai suhu awalnya dimulai sekitar 31.5°C dan mencapai suhu akhir maksimal sekitar 59.1°C .

Berdasarkan pada grafik di atas, perbedaan temperatur antara studi eksperimen dan numerik mencapai 2.44°C dan berdasarkan hasil tersebut, *error* dari studi numerik pengujian baterai litium-ion 18650 pada PCM murni ketebalan 6 mm dengan *discharge rate* 4C adalah sebesar 4.13%.



Gambar 4.15 Gambar *Contour* Temperatur dari Baterai Litium-Ion pada PCM Murni Ketebalan 6 mm dengan *Discharge Rate* 4C

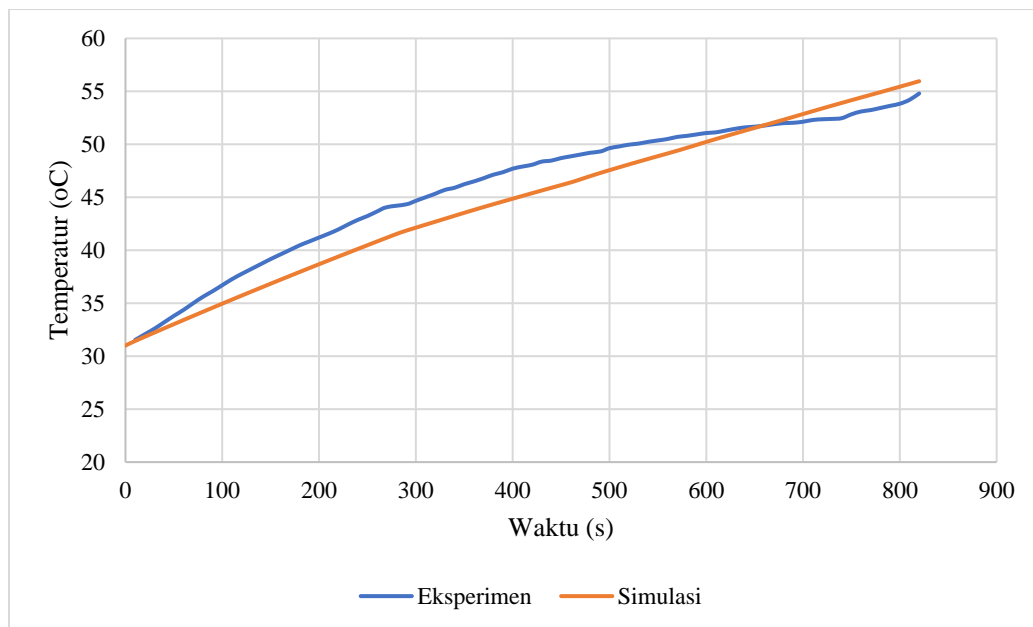
Pada gambar di atas, menunjukkan distribusi suhu pada permukaan baterai litium-ion 18650 yang menggunakan PCM dengan ketebalan 6 mm. Pada gambar tersebut memiliki rentang suhu berkisar mulai dari sekitar 40.3°C pada daerah yang

paling dingin hingga mencapai temperatur 56.66°C pada daerah yang paling panas yang terdapat pada bagian tengah dari kutub baterai.

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

4.6.2 Analisis Hasil Simulasi PCM Murni 9 mm dengan *Discharge Rate* 4C

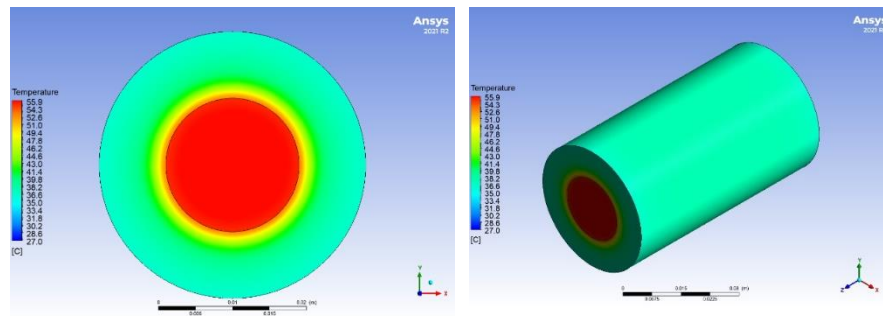
Berdasarkan data simulasi pendinginan baterai litium-ion dengan PCM murni ketebalan 9 mm, diperoleh hubungan antara hasil pengujian eksperimen dan numerik pada *discharge rate* 4C. Hubungan tersebut kemudian digambarkan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



Gambar 4.16 Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada PCM Murni 9 mm dengan *Discharge Rate* 4C

Pada gambar di atas menunjukkan perbandingan hasil temperatur dari eksperimen dan simulasi pada PCM murni. Grafik menunjukkan kenaikan suhu yang linear untuk peningkatan temperatur simulasi, yang berarti kecepatan kenaikan suhu cukup konstan selama waktu pengukuran. Pada suhu awal permukaan baterai dimulai sekitar 31°C dan suhu meningkat secara bertahap dan konsisten selama periode 820 detik sehingga mencapai suhu akhir sekitar 55.96°C. Sedangkan untuk temperatur dari eksperimen mencapai suhu awalnya dimulai sekitar 31°C dan mencapai suhu akhir maksimal sekitar 54.8°C.

Berdasarkan pada grafik di atas, perbedaan temperatur antara studi eksperimen dan numerik mencapai 1.16°C dan berdasarkan hasil tersebut, *error* dari studi numerik pengujian baterai litium-ion 18650 pada PCM murni ketebalan 9 mm dengan *discharge rate* 4C adalah sebesar 2.07%.



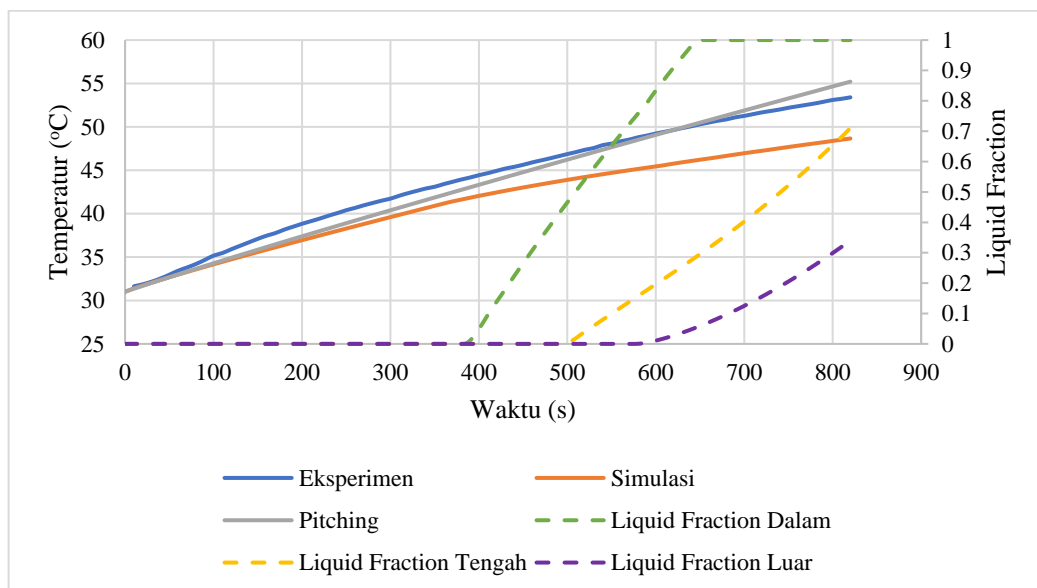
Gambar 4.17 Gambar *Contour* Temperatur dari Baterai Litium-Ion pada PCM Murni Ketebalan 9 mm dengan *Discharge Rate* 4C

Pada gambar di atas, menunjukkan distribusi suhu pada permukaan baterai litium-ion 18650 yang menggunakan PCM dengan ketebalan 9 mm. Pada gambar tersebut memiliki rentang suhu berkisar mulai dari sekitar 39.8°C pada daerah yang paling dingin hingga mencapai temperatur 55.9°C pada daerah yang paling panas yang terdapat pada bagian tengah dari kutub baterai.

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

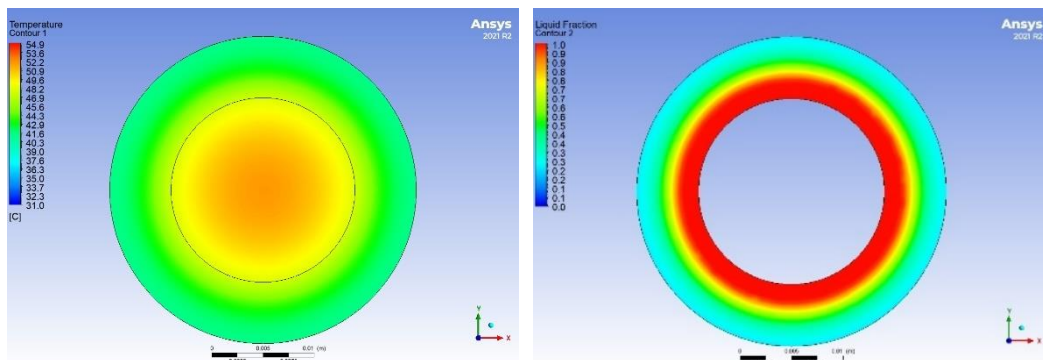
4.6.3 Analisis Hasil Simulasi PCM Komposit 6 mm dan 9 mm Rasio 0.35

Berdasarkan data simulasi pendinginan baterai litium-ion dengan PCM komposit ketebalan 6 mm dan 9 mm rasio 0.35, diperoleh hubungan antara hasil pengujian eksperimen dan numerik pada *discharge rate* 4C seperti berikut.



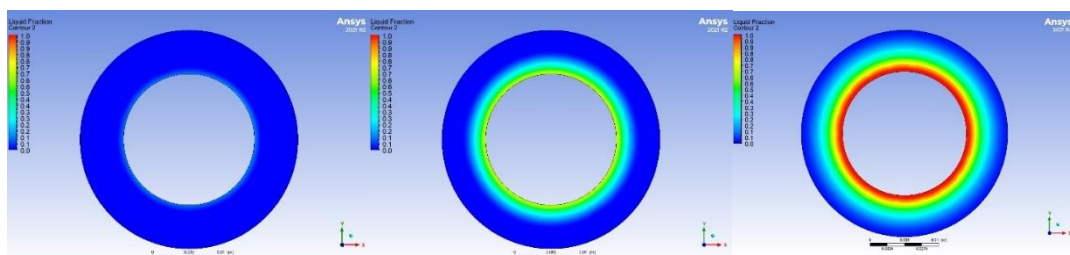
Gambar 4.18 Grafik Perbandingan Temperatur PCM Komposit 6 mm Rasio 0.35

Berdasarkan pada Gambar 4.18 di atas terlihat bahwa antara eksperimen dan simulasi perhitungan serta *pitching* memiliki hasil yang mirip. Temperatur maksimal dari eksperimen adalah 53.4°C sedangkan temperatur maksimal dari simulasi perhitungan adalah 48.6°C , serta pada simulasi dengan metode *pitching* didapatkan temperatur maksimal sebesar 55.209°C . Perbedaan temperatur antara eksperimen dengan simulasi perhitungan adalah sebesar 4.8°C dengan error perbedaanya adalah sebesar 8.87%. Sedangkan perbedaan temperatur antara eksperimen dengan simulasi metode *pitching* adalah sebesar 1.8°C dengan error perbedaanya sebesar 3.27%. Sehingga didapatkan simulasi *pitching* memiliki nilai yang lebih mendekati hasil eksperimen. Perbedaan ini bisa disebabkan karena *heat generation* pada simulasi dianggap konstan, sedangkan pada realitanya tidak konstan. Pada gambar tersebut, terdapat kurva *liquid fraction* bagian dalam PCM yang menempel dengan baterai, bagian tengah PCM, dan juga pada bagian permukaan luar PCM. Pada bagian PCM yang menempel pada baterai terlihat mulai meleleh setelah 385 detik dan kemudian mencair semuanya setelah 655 detik. Pada bagian tengah PCM terlihat juga mulai meleleh setelah 500 detik dan bagian luar PCM mulai meleleh setelah 580 detik. Kontur temperatur dan *liquid fraction* dapat dilihat pada gambar berikut.

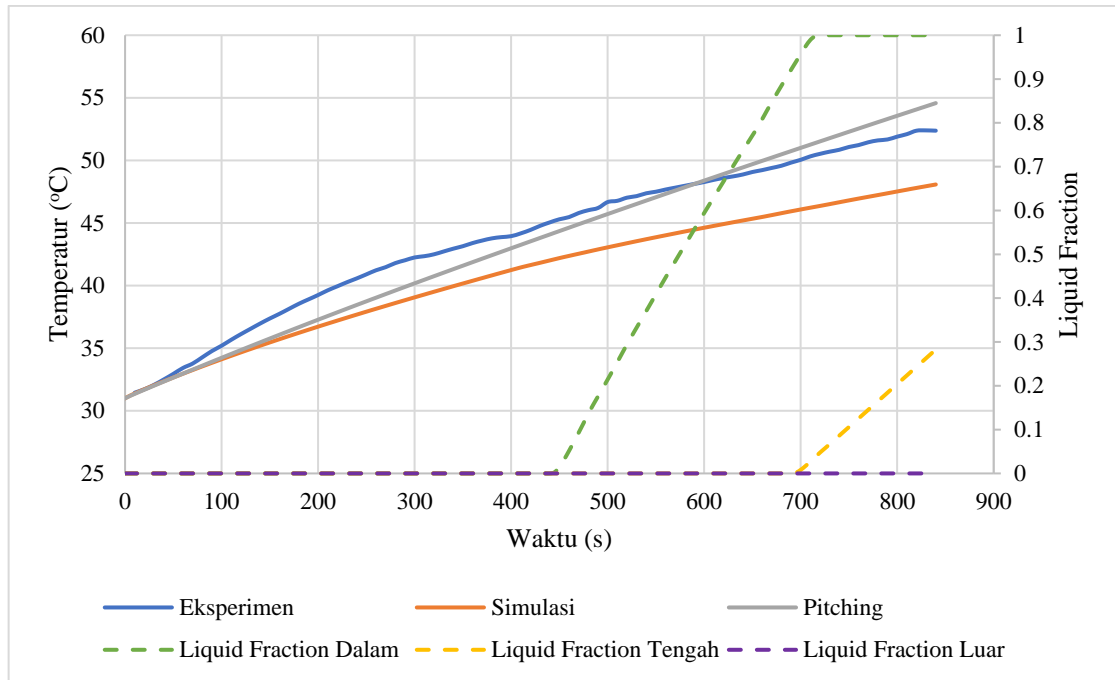


Gambar 4.19 Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction* PCM Komposit 6 mm Rasio 0.35

Berikut merupakan kontur *liquid fraction* pada bagian dalam PCM saat awal mulai mencair, saat sedang meleleh, dan saat PCM bagian dalam sudah menjadi cair seluruhnya pada saat pengujian dengan simulasi

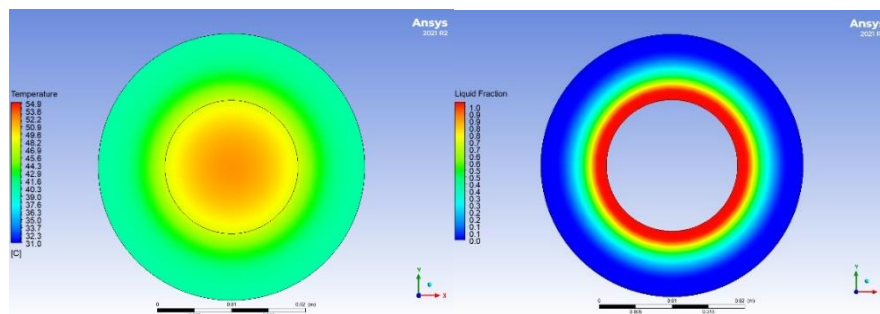


Gambar 4.20 Kontur *Liquid Fraction* PCM Komposit 6 mm 0.35



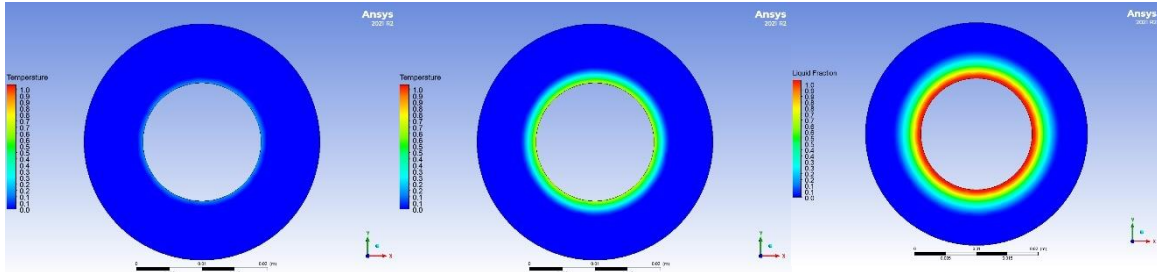
Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Temperatur PCM Komposit 9 mm Rasio 0.35

Berdasarkan pada Gambar 4.21 di atas terlihat bahwa antara eksperimen dan simulasi perhitungan serta *pitching* memiliki hasil yang mirip. Temperatur maksimal dari eksperimen adalah 52.375°C sedangkan temperatur maksimal dari simulasi perhitungan adalah 48.078°C , serta pada simulasi dengan metode *pitching* didapatkan temperatur maksimal sebesar 54.578°C . Perbedaan temperatur antara eksperimen dengan simulasi perhitungan adalah sebesar 4.297°C dengan error perbedaannya adalah sebesar 8.2%. Sedangkan perbedaan temperatur antara eksperimen dengan simulasi metode *pitching* adalah sebesar 2.2°C dengan error perbedaannya sebesar 3.27%. Sehingga didapatkan simulasi *pitching* memiliki nilai yang lebih mendekati hasil eksperimen. Perbedaan ini bisa disebabkan karena *heat generation* pada simulasi dianggap konstan, sedangkan pada realitanya tidak konstan. Pada gambar tersebut, terdapat kurva *liquid fraction* bagian dalam PCM yang menempel dengan baterai, bagian tengah PCM, dan juga pada bagian permukaan luar PCM. Pada bagian PCM yang menempel pada baterai terlihat mulai meleleh setelah 440 detik dan kemudian mencair semuanya setelah 710 detik. Pada bagian tengah PCM terlihat juga mulai meleleh setelah 695 detik dan bagian luar PCM belum meleleh hingga akhir pengujian. Kontur temperatur dan *liquid fraction* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.22 Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction* PCM Komposit 9 mm Rasio 0.35

Berikut merupakan kontur *liquid fraction* pada bagian dalam PCM saat awal mulai mencair, saat sedang meleleh, dan saat PCM bagian dalam sudah menjadi cair seluruhnya, serta terdapat kontur *liquid fraction* pada saat akhir pengujian.

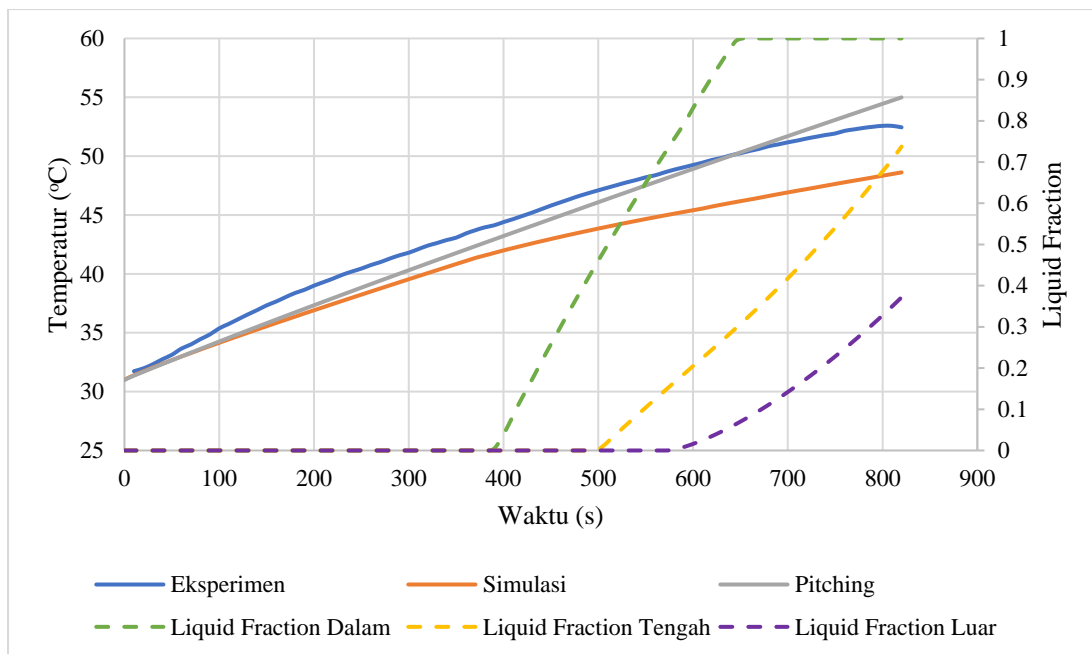


Gambar 4.23 Kontur *Liquid Fraction* PCM Komposit 9 mm Rasio 0.35

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

4.6.4 Analisis Hasil Simulasi PCM Komposit 6 mm dan 9 mm Rasio 0.4

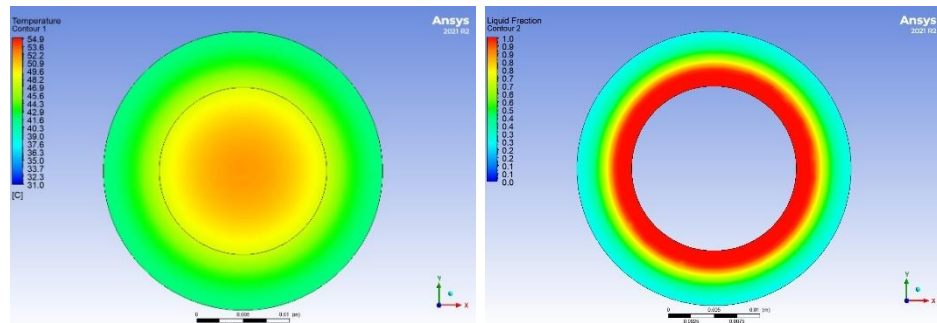
Berdasarkan data simulasi pendinginan baterai litium-ion dengan PCM komposit ketebalan 6 mm dan 9 mm rasio 0.35, diperoleh hubungan antara hasil pengujian eksperimen dan numerik pada *discharge rate* 4C. Hubungan tersebut kemudian digambarkan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



Gambar 4.24 Grafik Perbandingan Temperatur PCM Komposit 6 mm Rasio 0.4

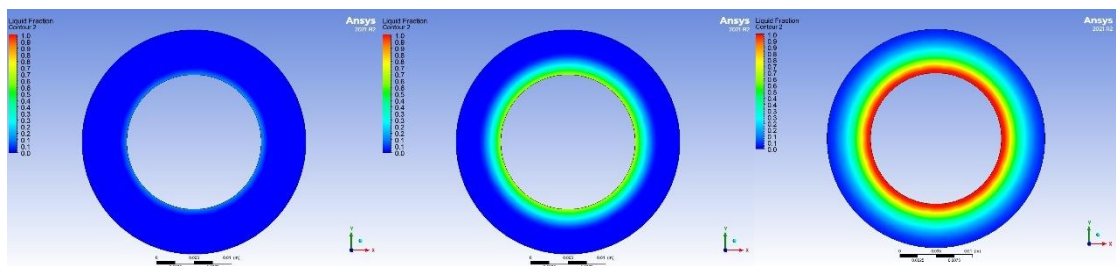
Berdasarkan pada Gambar 4.24 di atas terlihat bahwa antara eksperimen dan simulasi perhitungan serta *pitching* memiliki hasil yang mirip. Temperatur maksimal dari eksperimen adalah 52.45°C sedangkan temperatur maksimal dari simulasi

perhitungan adalah 48.621°C, serta pada simulasi dengan metode *pitching* didapatkan temperatur maksimal sebesar 54.993°C. Perbedaan temperatur antara eksperimen dengan simulasi perhitungan adalah sebesar 3.8289°C dengan error perbedaannya adalah sebesar 7.3%. Sedangkan perbedaan temperatur antara eksperimen dengan simulasi metode *pitching* adalah sebesar 2.54°C dengan error perbedaannya sebesar 4.62%. Sehingga didapatkan simulasi *pitching* memiliki nilai yang lebih mendekati hasil eksperimen. Perbedaan ini bisa disebabkan karena *heat generation* pada simulasi dianggap konstan, sedangkan pada realitanya tidak konstan. Pada gambar tersebut, terdapat kurva *liquid fraction* bagian dalam PCM yang menempel dengan baterai, bagian tengah PCM, dan juga pada bagian permukaan luar PCM. Pada bagian PCM yang menempel pada baterai terlihat mulai meleleh setelah 390 detik dan kemudian mencair semuanya setelah 655 detik. Pada bagian tengah PCM terlihat juga mulai meleleh setelah 495 detik dan bagian luar PCM juga meleleh setelah sekitar 575 detik. Kontur temperatur dan *liquid fraction* dapat dilihat pada gambar berikut.

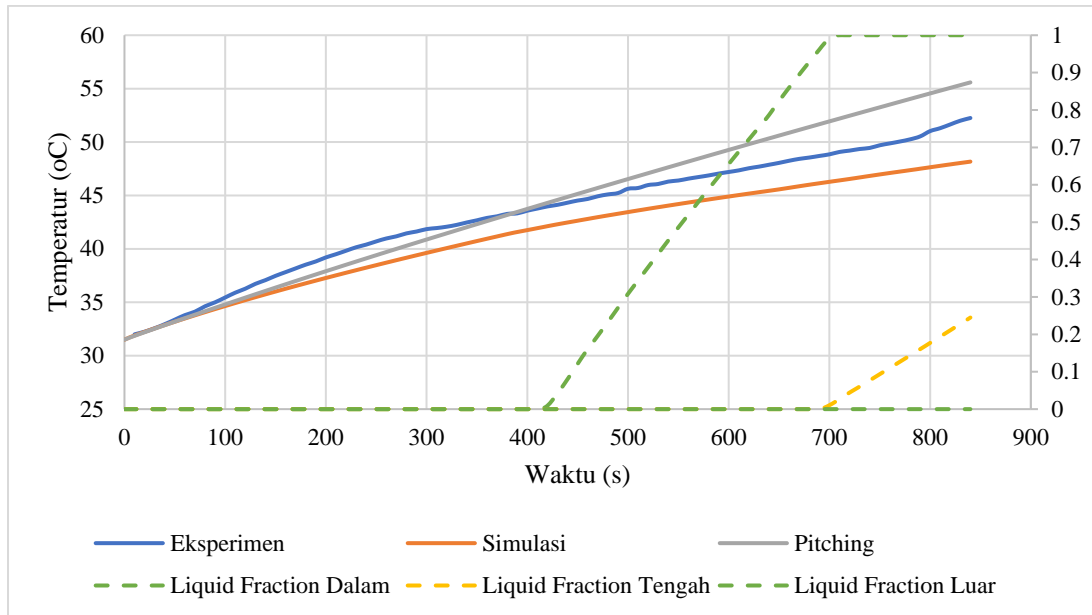


Gambar 4.25 Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction* PCM Komposit 6 mm Rasio 0.4

Berikut merupakan kontur *liquid fraction* pada bagian dalam PCM saat awal mulai mencair, saat sedang meleleh, dan saat PCM bagian dalam sudah menjadi cair seluruhnya, serta terdapat kontur *liquid fraction* pada saat akhir pengujian.

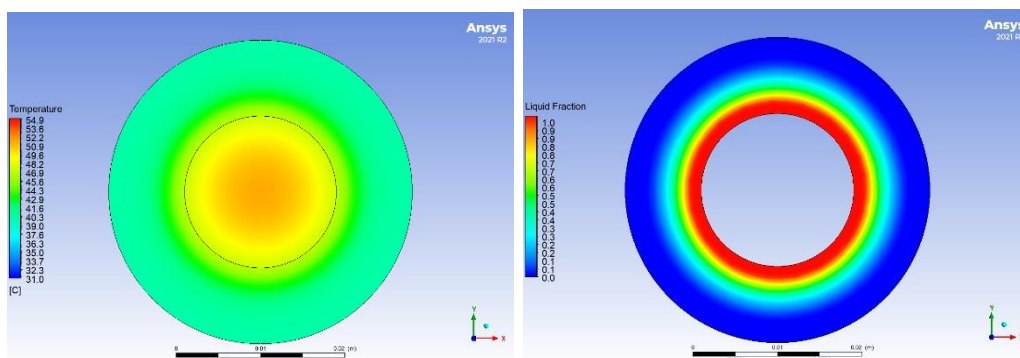


Gambar 4.26 Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction* PCM Komposit 6 mm Rasio 0.4



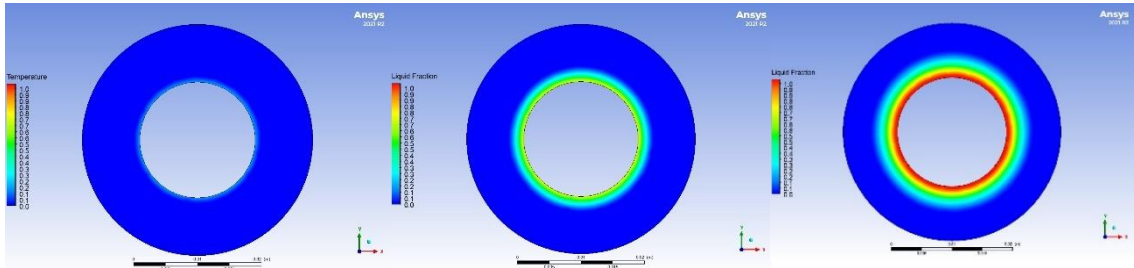
Gambar 4.27 Grafik Perbandingan Temperatur PCM Komposit 9 mm Rasio 0.4

Berdasarkan pada gambar di atas terlihat bahwa antara eksperimen dan simulasi perhitungan serta *pitching* memiliki hasil yang mirip. Temperatur maksimal dari eksperimen adalah 52.25°C sedangkan temperatur maksimal dari simulasi perhitungan adalah 48.168°C , serta pada simulasi dengan metode *pitching* didapatkan temperatur maksimal sebesar 55.586°C . Perbedaan temperatur antara eksperimen dengan simulasi perhitungan adalah sebesar 4.081°C dengan error perbedaannya adalah sebesar 7.8%. Sedangkan perbedaan temperatur antara eksperimen dengan simulasi metode *pitching* adalah sebesar 3.34°C dengan error perbedaannya sebesar 6%. Sehingga didapatkan simulasi *pitching* memiliki nilai yang lebih mendekati hasil eksperimen. Perbedaan ini bisa disebabkan karena *heat generation* pada simulasi dianggap konstan, sedangkan pada realitanya tidak konstan. Pada gambar tersebut, terdapat kurva *liquid fraction* bagian dalam PCM yang menempel dengan baterai, bagian tengah PCM, dan juga pada bagian permukaan luar PCM. Pada bagian PCM yang menempel pada baterai terlihat mulai meleleh setelah 420 detik dan kemudian mencair semuanya setelah 710 detik. Pada bagian tengah PCM terlihat juga mulai meleleh setelah 690 detik dan bagian luar belum meleleh hingga akhir pengujian. Kontur temperatur dan *liquid fraction* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.28 Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction* PCM Komposit 9 mm Rasio 0.4

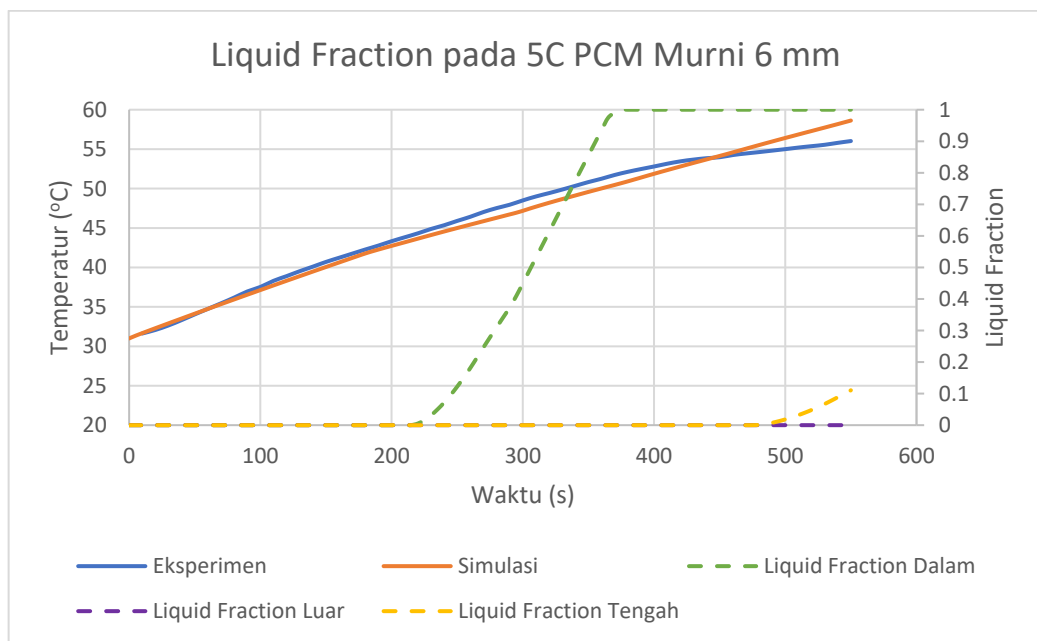
Berikut merupakan kontur *liquid fraction* pada bagian dalam PCM saat awal mulai mencair, saat sedang meleleh, dan saat PCM bagian dalam sudah menjadi cair seluruhnya, serta terdapat kontur *liquid fraction* pada saat akhir pengujian.



Gambar 4.29 Kontur Temperatur PCM Komposit 9 mm Rasio 0.4

4.6.5 Analisis Liquid Fraction pada 5C PCM Murni 6 mm

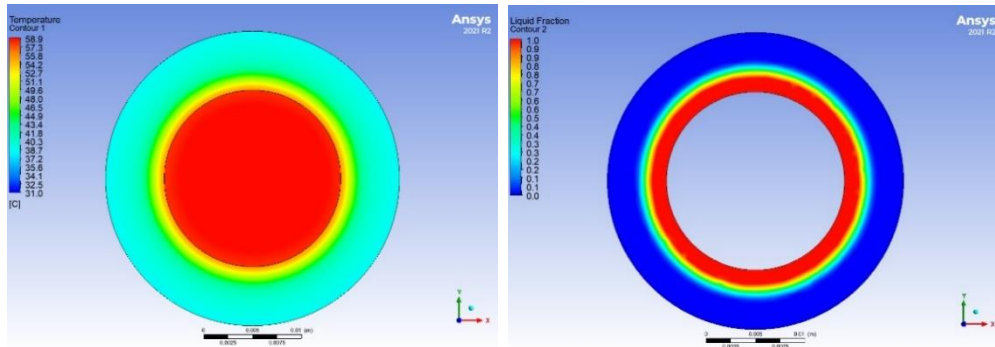
Berdasarkan data simulasi pendinginan baterai litium-ion dengan PCM murni ketebalan 6 mm, diperoleh hubungan antara hasil temperatur dan *liquid fraction* pada *discharge rate* 4C. Hubungan tersebut kemudian digambarkan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



Gambar 4.30 Grafik Liquid Fraction pada 5C PCM Murni 6 mm

Berdasarkan pada gambar di atas, terlihat bahwa antara eksperimen dan simulasi memiliki hasil yang mirip. Temperatur maksimal dari eksperimen adalah 56.025°C sedangkan temperatur maksimal dari simulasi adalah 58.63°C . Error perbedaannya adalah sebesar 4.44%. Perbedaan ini bisa disebabkan karena *heat generation* pada simulasi dianggap konstan, sedangkan pada realitanya tidak konstan. Grafik *liquid fraction* diatas adalah grafik *liquid fraction* yang terdapat pada bagian dalam, tengah dan luar PCM. Berdasarkan pada grafik *liquid fraction* diatas dapat dilihat bahwa menurut simulasi, pada bagian dalam PCM komposit mulai meleleh pada waktu 215 s dan menjadi cair semuanya pada waktu 375 s. Pada *liquid fraction* yang berada di tengah

PCM komposit, PCM komposit mulai meleleh pada waktu 480 s. Sedangkan untuk bagian luar dapat dilihat bahwa, PCM komposit belum terjadi deformasi hingga akhir pengujian. Kontur temperatur dan *liquid fraction* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.31 Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction* 5C PCM Murni 6 mm

Berdasarkan pada grafik tersebut, kenaikan temperatur permukaan baterai cenderung konstan sehingga belum terlalu menggambarkan pengaruh penambahan PCM baik murni maupun komposit, terhadap penurunan temperatur permukaan baterai. Seharusnya, apabila apabila kondisi PCM sudah mulai mencair, grafiknya akan melandai yang menandakan bahwa kalor laten yang dimiliki oleh PCM sudah mulai bekerja untuk menjaga temperatur permukaan baterai.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian pada tugas akhir ini menganalisis manajemen termal pada sistem pendinginan baterai litium-ion berbasis PCM komposit dengan variasi rasio *filler* serbuk silika 0.35 dan 0.4 serta ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm terhadap laju peningkatan temperatur pada permukaan baterai litium-ion pada proses *discharging*. Kesimpulan dari hasil analisis data yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Pemilihan paraffin wax dan serbuk silika dengan rasio 0.4 dan ketebalan 9 mm mampu mendinginkan baterai litium-ion pada *discharging* 1C hingga 5C lebih baik dibandingkan dengan variasi PCM komposit lainnya, yaitu mampu meredam temperatur sebesar 5.575°C dari temperatur maksimal pada *natural convection* pada *discharging* 1C dan mampu meredam temperatur sebesar 12.475°C dari temperatur maksimal pada *natural convection* pada *discharging* 2C. Kemudian, mampu meredam temperatur sebesar 22.425°C dari temperatur maksimal pada *natural convection* pada *discharging* 3C serta pada *discharging* 4C mampu meredam temperatur sebesar 28.275°C dari temperatur maksimal pada *natural convection*. Begitu juga pada *discharging* 5C mampu meredam temperatur sebesar 34.358°C dari temperatur maksimal pada *natural convection*.
2. Variasi *discharging rate* baterai memiliki pengaruh terhadap peningkatan temperatur permukaan baterai litium-ion. Hal ini terjadi karena *discharging rate* yang lebih tinggi menghasilkan intensitas aliran arus listrik yang lebih besar sehingga meningkatkan nilai *heat generation* dan membuat perubahan suhu baterai yang semakin tinggi. Pada penelitian ini, *discharging rate* 5C dengan arus 15 A dan nilai *heat generation* maksimal sebesar 24.99 W memiliki peningkatan temperatur yang paling tinggi dibandingkan dengan *discharging rate* 1C – 4C dengan nilai *heat generation* maksimal masing-masing sebesar 5.04 W pada 1C, 10.13 W pada 2C, 14.73 W pada 3C, serta 20.08 W pada 4C.
3. Penggunaan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 sangat efektif untuk menurunkan laju pemanasan temperatur pada permukaan baterai litium-ion untuk semua C-rate, yaitu memiliki selisih temperatur sebesar 0.5°C hingga 1°C dibandingkan dengan variasi rasio 0.35. Sehingga pemilihan PCM komposit serbuk silika dengan rasio 0.4 merupakan metode efektif untuk meningkatkan kinerja PCM komposit dalam menurunkan temperatur permukaan baterai.
4. Variasi ketebalan PCM komposit mempengaruhi kinerja PCM dalam peningkatan temperatur baterai litium-ion. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tebal PCM komposit, maka peningkatan temperatur pada permukaan baterai semakin rendah. Penggunaan PCM komposit serbuk silika dengan ketebalan 9 mm sangat efektif untuk menurunkan laju pemanasan temperatur pada permukaan baterai litium-ion pada *discharging rate* 1C hingga 5C karena memiliki selisih temperatur kurang dari 2°C dibandingkan dengan ketebalan 3 mm dan selisih temperatur kurang dari 1°C dibandingkan dengan ketebalan 6 mm. Hal ini sesuai dengan teori bahwa dengan ketebalan yang lebih tinggi dapat meningkatkan massa PCM sehingga dapat menurunkan laju perubahan temperatur dengan nilai kalor sensible dan specific heat yang tetap. Kenaikan temperatur paling rendah pada setiap variasi ketebalan dan *discharging rate* adalah variasi ketebalan 9 mm, yang berarti bahwa ketebalan 9 mm merupakan ketebalan dengan Tingkat kelelahan yang paling rendah dan paling aman apabila penelitian dilakukan pada C-rate 1C – 5C.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan oleh penulis untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Dapat melakukan penelitian dalam bentuk modul *battery pack*, bukan hanya satu sel baterai.
2. Dapat melakukan eksperimen baterai pada kondisi *charging*.
3. Dapat menambahkan *housing* pada baterai PCM komposit agar sensor *thermocouple* tidak mudah lepas dan juga PCM tidak mudah deformasi saat pengujian.
4. Dapat melakukan studi numerik untuk variasi PCM material komposit dan memakai nilai *heat generation* dalam fungsi waktu
5. Dapat menggunakan sistem pendinginan tambahan atau kombinasi dengan metode pendinginan aktif pada *discharge rate* yang sangat tinggi untuk meningkatkan performa pendinginan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

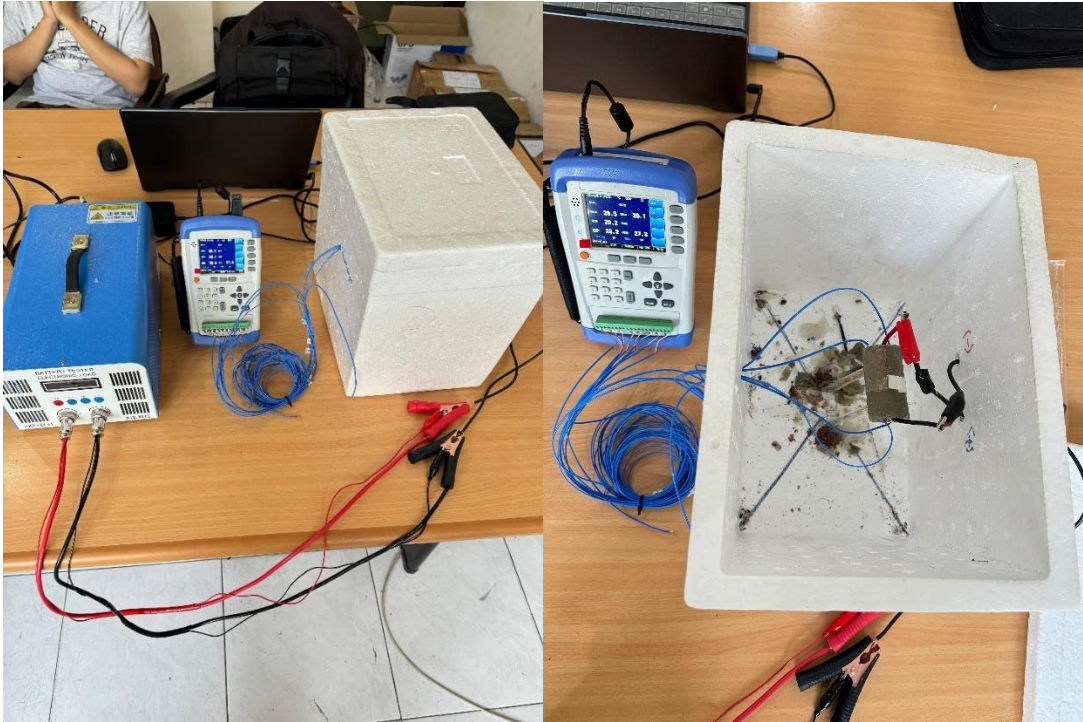
- Behi, H., Karimi, D., Behi, M., Jaguemont, J., Ghanbarpour, M., Behnia, M., Berecibar, M., & Van Mierlo, J. (2020). Thermal management analysis using heat pipe in the high current discharging of lithium-ion battery in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 32(April), 101893. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101893>
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & David, D. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Bharadwaj Reddy, P., Gunasekar, C., Mhaske, A. S., & Vijay Krishna, N. (2018). Enhancement of thermal conductivity of PCM using filler graphite powder materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012173>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2010). Materials science and engineering: An introduction. In *Materials & Design* (8th ed., Vol. 12, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(91\)90101-9](https://doi.org/10.1016/0261-3069(91)90101-9)
- Grimonia, E., Andhika, M. R. C., Aulady, M. F. N., Rubi, R. V. C., & Hamidah, N. L. (2021). Thermal Management System Using Phase Change Material for Lithium-ion Battery. *Journal of Physics: Conference Series*, 2117(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2117/1/012005>
- Ianniciello, L., Biwolé, P. H., & Achard, P. (2018). Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials. *Journal of Power Sources*, 378(October 2017), 383–403. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.12.071>
- Jamshed, S. (2015). Introduction to CFD. *Using HPC for Computational Fluid Dynamics*, July, 1–20. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801567-4.00001-5>
- Landini, S., Leworthy, J., & O'Donovan, T. S. (2019). A Review of Phase Change Materials for the Thermal Management and Isothermalisation of Lithium-Ion Cells. *Journal of Energy Storage*, 25(February), 100887. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100887>
- Lin, Y., Jia, Y., Alva, G., & Fang, G. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(October 2017), 2730–2742. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.002>
- Nomura, T., Tabuchi, K., Zhu, C., Sheng, N., Wang, S., & Akiyama, T. (2015). High thermal conductivity phase change composite with percolating carbon fiber network. *Applied Energy*, 154, 678–685. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.042>
- Peng, P., & Jiang, F. (2016). Thermal safety of lithium-ion batteries with various cathode materials: A numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 1008–1016. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.088>
- Prasetyo, M. A. (2023). *Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Material Filler Pada PCM Komposit Terhadap Laju Pemanasan Pada Permukaan Baterai Litium-Ion*. Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sudjoko, C. (2021). Strategi Pemanfaatan Kendaraan Listrik Berkelanjutan Sebagai Solusi Untuk Mengurangi Emisi Karbon. *Jurnal Paradigma: Jurnal Multidisipliner Mahasiswa Pascasarjana Indonesia*, 2(2), 54–68.
- Sun, Z., Fan, R., Yan, F., Zhou, T., & Zheng, N. (2019). Thermal management of the lithium-ion battery by the composite PCM-Fin structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 145, 118739. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118739>
- Supu, I., Usman, B., Basri, S., & Sunarmi, S. (2016). Pengaruh Suhu terhadap Perpindahan Panas pada Material yang Berbeda. *Dinamika*, 7(1), 62–73.
- Warner, J. (2015). *The handbook of lithium-ion battery pack design: Chemistry, components,*

- types and terminology. In *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology*. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-23144-5>
- Xia, Z., Li, C., Yu, H., & Wang, Z. (2023). Experimental Study of a Passive Thermal Management System Using Expanded Graphite/Polyethylene Glycol Composite for Lithium-Ion Batteries. *Energies*, *16*(23). <https://doi.org/10.3390/en16237786>
- Yi, F., E, J., Zhang, B., Zuo, H., Wei, K., Chen, J., Zhu, H., Zhu, H., & Deng, Y. (2022). Effects analysis on heat dissipation characteristics of lithium-ion battery thermal management system under the synergism of phase change material and liquid cooling method. *Renewable Energy*, *181*, 472–489. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.073>
- Zhang, K., Wang, L., Xu, C., Wu, H., Huang, D., Jin, K., & Xu, X. (2023). Study on Thermal Runaway Risk Prevention of Lithium-Ion Battery with Composite Phase Change Materials. *Fire*, *6*(5), 1–16. <https://doi.org/10.3390/fire6050208>
- Zhao, R., Gu, J., & Liu, J. (2015). An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries. *Journal of Power Sources*, *273*, 1089–1097. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.007>

LAMPIRAN

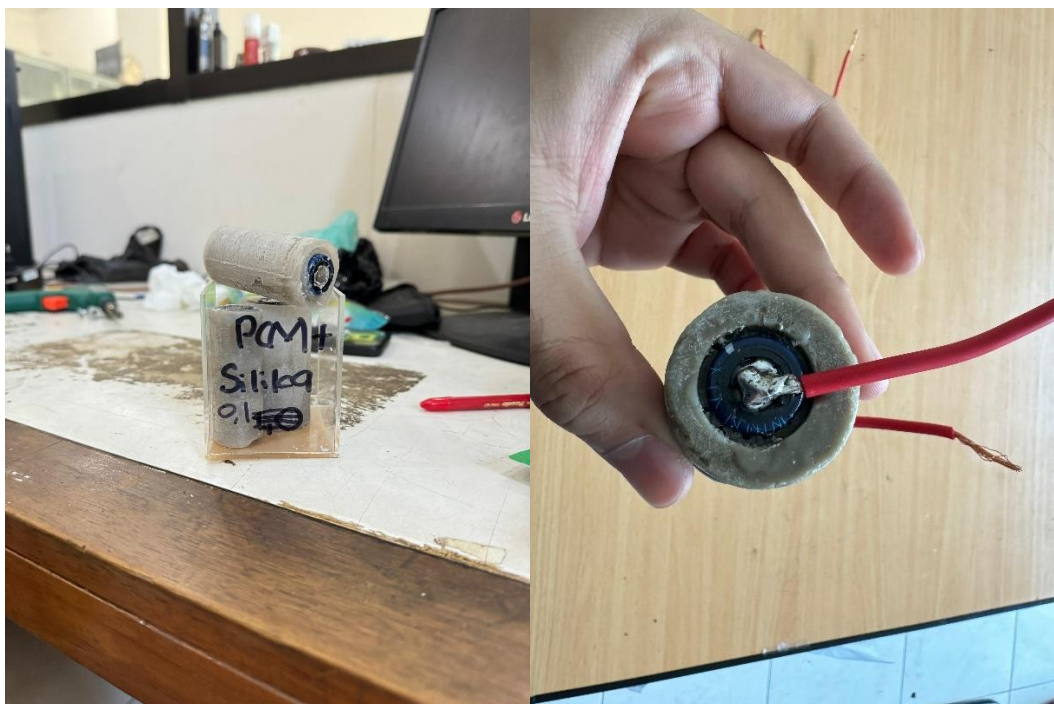
Lampiran 1. *Set-Up* Experimen

Gambar Skema *Set-Up* Eksperimen Pengujian Baterai Litium-Ion VRK IMR18650



Lampiran 2. Modul Baterai

Gambar Modul Baterai yang Telah Dirangkai



Lampiran 3. Holder Baterai dan Cetakan PCM

Gambar Holder Baterai dan Cetakan PCM untuk Ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm



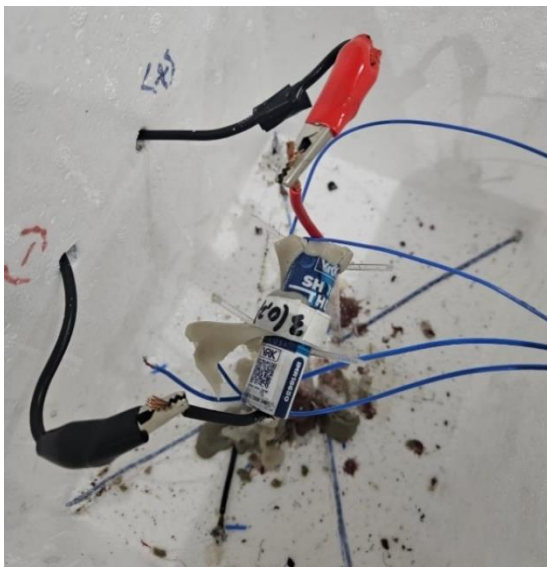
Lampiran 4. Proses Pembuatan PCM Komposit

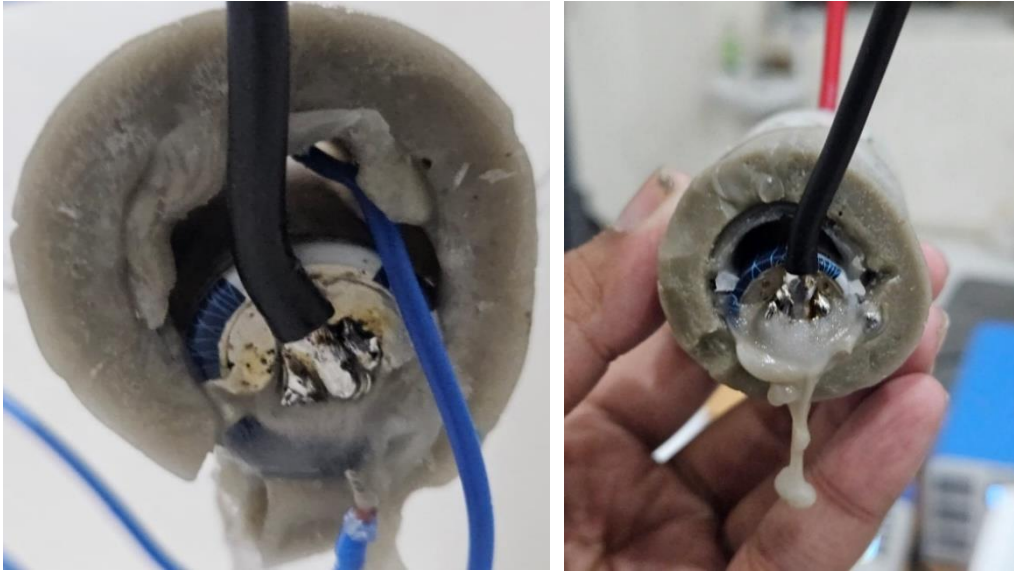




Lampiran 4. Dokumentasi Selama Eksperimen

Gambar PCM Komposit 3 mm Leleh setelah Pengujian *Discharge* 4C





Lampiran 5. Data Temperatur pada 1C

(a) Data *Natural Convection* dan PCM Murni

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
15	31.625	10	31.85	10	31.95	10	31.75
30	31.675	20	32.3	20	32.025	20	31.875
45	31.8	30	32.375	30	32.125	30	31.975
60	31.85	40	32.475	40	32.225	40	32.075
75	32.05	50	32.5	50	32.325	50	32.175
90	32.15	60	32.6	60	32.425	60	32.325
105	32.225	70	32.675	70	32.375	70	32.425
120	32.325	80	32.725	80	32.625	80	32.525
135	32.475	90	32.825	90	32.725	90	32.625
150	32.575	100	32.85	100	32.825	100	32.75
165	32.725	110	32.925	110	32.925	110	32.85
180	32.775	120	33	120	33.025	120	32.95
195	32.975	130	33.1	130	33.125	130	33.075
210	33.05	140	33.175	140	33.2	140	33.175
225	33.175	150	33.25	150	33.325	150	33.225
240	33.275	160	33.375	160	33.4	160	33.35
255	33.375	170	33.475	170	33.575	170	33.425
270	33.475	180	33.525	180	33.65	180	33.5
285	33.475	190	33.625	190	33.7	190	33.55
300	33.575	200	33.675	200	33.8	200	33.6
315	33.75	210	33.75	210	33.875	210	33.625
330	33.775	220	33.8	220	33.925	220	33.7

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
345	33.875	230	33.875	230	33.725	230	33.725
360	33.975	240	33.9	240	33.51875	240	33.775
375	34.125	250	33.95	250	33.55	250	33.8
390	34.175	260	34.025	260	33.5625	260	33.85
405	34.3	270	34.075	270	33.59375	270	33.875
420	34.3	280	34.125	280	33.63125	280	33.925
435	34.4	290	34.125	290	33.6625	290	33.925
450	34.475	300	34.225	300	33.675	300	33.975
465	34.625	310	34.225	310	33.7625	310	34.05
480	34.625	320	34.25	320	33.7375	320	34.025
495	34.7	330	34.3	330	33.78125	330	34.025
510	34.9	340	34.425	340	33.85	340	34.05
525	34.9	350	34.425	350	33.8125	350	34.075
540	34.975	360	34.425	360	33.90625	360	34.15
555	35.05	370	34.525	370	33.93125	370	34.1
570	35.125	380	34.475	380	33.94375	380	34.2
585	35.3	390	34.575	390	33.99375	390	34.225
600	35.325	400	34.525	400	33.95625	400	34.175
615	35.35	410	34.625	410	34.05625	410	34.225
630	35.4	420	34.65	420	34.06875	420	34.225
645	35.5	430	34.725	430	34.13125	430	34.325
660	35.575	440	34.725	440	34.1375	440	34.25
675	35.625	450	34.8	450	34.2	450	34.35
690	35.7	460	34.825	460	34.20625	460	34.325
705	35.775	470	34.875	470	34.21875	470	34.325
720	35.875	480	34.85	480	34.2625	480	34.425
750	36.025	500	35	500	34.3375	500	34.4
765	36	510	35.025	510	34.38125	510	34.475
780	36.05	520	35.025	520	34.3875	520	34.425
795	36.125	530	35.1	530	34.45	530	34.525
810	36.15	540	35.125	540	34.425	550	34.5
825	36.225	550	35.175	550	34.4875	560	34.525
840	36.25	560	35.175	560	34.49375	570	34.55
855	36.325	570	35.225	570	34.53125	580	34.575
870	36.35	580	35.25	580	34.5625	600	34.6
885	36.4	590	35.275	590	34.59375	610	34.65
900	36.45	600	35.275	600	34.6	620	34.65
915	36.55	610	35.35	610	34.6375	630	34.675
930	36.55	620	35.375	620	34.66875	640	34.675
945	36.575	630	35.375	630	34.66875	650	34.7
960	36.6	640	35.45	640	34.7	660	34.7
975	36.65	650	35.45	650	34.7375	670	34.75
990	36.675	660	35.475	660	34.74375	680	34.75

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
1005	36.725	670	35.525	670	34.775	690	34.75
1020	36.775	680	35.55	680	34.8125	700	34.775
1035	36.875	690	35.575	690	34.81875	710	34.85
1050	36.85	700	35.675	700	34.89375	720	34.85
1065	36.875	710	35.625	710	34.9125	730	34.85
1080	36.95	720	35.675	720	34.91875	740	34.875
1095	36.95	730	35.7	730	34.925	750	34.875
1110	36.975	740	35.725	740	34.95	760	34.9
1125	37	750	35.725	750	34.95625	770	34.95
1140	37.05	760	35.775	760	34.9625	780	34.95
1155	37.075	770	35.825	770	35.025	790	34.875
1170	37.1	780	35.825	780	35.03125	800	34.95
1185	37.175	790	35.85	790	35.0125	810	34.975
1200	37.25	800	35.9	800	35.1	820	34.975
1215	37.175	810	35.9	810	35.10625	830	35
1230	37.25	820	35.925	820	35.13125	840	35.05
1245	37.275	830	35.925	830	35.1375	850	34.975
1260	37.275	840	35.95	840	35.14375	860	35.075
1275	37.275	850	36	850	35.15	870	35
1290	37.35	860	36	860	35.2	880	35.075
1305	37.375	870	36.05	870	35.18125	890	35.075
1320	37.45	880	36.025	880	35.2125	900	35.05
1335	37.45	890	36.05	890	35.2375	910	35.05
1350	37.475	900	36.075	900	35.21875	920	35.075
1365	37.5	910	36.1	910	35.25	930	35.1
1380	37.55	920	36.125	920	35.25	940	35.075
1395	37.575	930	36.1	930	35.28125	950	35.075
1410	37.6	940	36.15	940	35.2875	960	35.15
1425	37.65	950	36.175	950	35.29375	970	35.1
1440	37.65	960	36.2	960	35.31875	981	35.125
1455	37.6	970	36.2	970	35.325	990	35.125
1485	37.75	990	36.25	990	35.35625	1000	35.15
1500	37.7	1000	36.25	1000	35.3875	1010	35.15
1515	37.8	1010	36.275	1010	35.39375	1020	35.175
1530	37.8	1020	36.275	1020	35.39375	1030	35.2
1545	37.85	1030	36.3	1030	35.39375	1040	35.25
1560	37.85	1040	36.275	1040	35.475	1050	35.225
1575	37.8	1050	36.375	1050	35.45625	1060	35.225
1590	37.85	1060	36.375	1060	35.46875	1070	35.25
1605	37.95	1070	36.375	1070	35.49375	1080	35.225
1620	37.9	1080	36.375	1080	35.49375	1090	35.3
1635	38	1090	36.375	1090	35.49375	1100	35.275
1650	37.95	1100	36.4	1100	35.54375	1110	35.325

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
1665	38.025	1110	36.475	1110	35.5625	1120	35.325
1680	38.05	1120	36.475	1120	35.59375	1130	35.325
1695	38	1130	36.475	1130	35.59375	1131	35.325
1710	38	1140	36.475	1140	35.59375	1140	35.325
1725	38	1150	36.475	1150	35.59375	1150	35.35
1740	38.05	1160	36.475	1160	35.63125	1160	35.35
1755	38.1	1170	36.525	1170	35.6375	1170	35.375
1770	38.125	1180	36.575	1180	35.66875	1180	35.375
1785	38.1	1190	36.575	1190	35.66875	1190	35.4
1800	38.1	1200	36.575	1200	35.66875	1200	35.425
1815	38.1	1210	36.575	1210	35.7	1210	35.425
1830	38.125	1230	36.625	1230	35.70625	1230	35.45
1845	38.175	1240	36.625	1240	35.74375	1240	35.425
1860	38.2	1250	36.65	1250	35.7125	1250	35.45
1875	38.2	1260	36.675	1260	35.7125	1260	35.45
1890	38.2	1270	36.675	1270	35.79375	1270	35.5
1905	38.2	1280	36.675	1280	35.8	1280	35.525
1920	38.2	1290	36.725	1290	35.79375	1290	35.525
1935	38.225	1300	36.75	1300	35.7625	1300	35.45
1950	38.225	1310	36.75	1310	35.8125	1310	35.525
1965	38.225	1320	36.775	1320	35.86875	1320	35.525
1980	38.225	1330	36.775	1330	35.86875	1330	35.55
1995	38.225	1340	36.8	1340	35.89375	1340	35.6
2010	38.225	1350	36.8	1350	35.9125	1350	35.6
2025	38.25	1360	36.85	1360	35.85	1360	35.55
2040	38.225	1370	36.85	1370	35.9125	1370	35.625
2055	38.25	1380	36.875	1380	35.94375	1380	35.575
2070	38.25	1390	36.875	1390	35.94375	1390	35.6
2085	38.3	1400	36.9	1400	35.99375	1400	35.675
2100	38.3	1410	36.875	1410	35.94375	1410	35.6
2115	38.3	1420	36.9	1420	36	1420	35.7
2130	38.3	1430	36.925	1430	35.95	1430	35.625
2145	38.325	1440	36.95	1440	36.00625	1431	35.625
2160	38.3	1450	36.975	1450	35.9875	1440	35.7
2175	38.3	1470	36.975	1470	36.04375	1450	35.625
2190	38.3	1480	37	1480	36.05	1470	35.65
2220	38.325	1490	36.975	1490	36.04375	1480	35.7
2235	38.375	1500	37	1500	36.04375	1490	35.7
2250	38.4	1510	37	1510	36.0625	1500	35.675
2265	38.4	1520	37.025	1520	36.05625	1510	35.7
2280	38.4	1530	37.025	1530	36.0625	1520	35.7
2295	38.4	1540	37.05	1540	36.09375	1530	35.7
2310	38.425	1550	37.05	1550	36.0875	1540	35.7

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
2325	38.475	1560	37.125	1560	36.13125	1550	35.725
2340	38.475	1570	37.075	1570	36.09375	1560	35.725
2355	38.5	1580	37.075	1580	36.15	1570	35.75
2370	38.525	1590	37.125	1590	36.15	1580	35.75
2385	38.55	1600	37.2	1600	36.1625	1590	35.75
2400	38.575	1610	37.125	1610	36.20625	1600	35.775
2415	38.6	1620	37.125	1620	36.15625	1610	35.85
2430	38.6	1630	37.15	1630	36.1625	1620	35.8
2445	38.625	1640	37.15	1640	36.2125	1630	35.825
2460	38.65	1650	37.225	1650	36.2625	1640	35.875
2475	38.675	1660	37.175	1660	36.26875	1650	35.9
2490	38.7	1670	37.2	1670	36.25	1660	35.9
2505	38.75	1680	37.25	1680	36.31875	1670	35.85
2520	38.775	1690	37.3	1690	36.35	1680	35.95
2535	38.775	1710	37.3	1710	36.3	1690	35.95
2550	38.825	1720	37.3	1720	36.325	1699	35.9
2565	38.85	1730	37.25	1730	36.3125	1710	35.9
2580	38.875	1740	37.3	1740	36.35625	1720	35.925
2595	38.925	1750	37.325	1750	36.3625	1730	35.9
2610	38.95	1760	37.35	1760	36.3625	1740	35.925
2625	39	1770	37.275	1770	36.31875	1750	35.925
2640	39.025	1780	37.35	1780	36.3625	1760	35.95
2655	39.075	1790	37.35	1790	36.4	1770	35.925
2670	39.1	1800	37.4	1800	36.36875	1780	36
2685	39.1	1810	37.4	1810	36.45	1790	36
2700	39.2	1820	37.4	1820	36.43125	1800	36
2715	39.225	1830	37.375	1830	36.45	1810	36.025
2730	39.3	1840	37.425	1840	36.45625	1820	36
2745	39.25	1850	37.45	1850	36.4625	1830	36
2760	39.375	1860	37.45	1860	36.46875	1840	36
2775	39.4	1870	37.475	1870	36.46875	1850	36.025
2790	39.45	1880	37.475	1880	36.46875	1860	36.025
2805	39.5	1890	37.425	1890	36.43125	1870	36.025
2820	39.55	1900	37.475	1900	36.46875	1880	36
2835	39.575	1910	37.425	1910	36.4625	1890	36
2850	39.6	1920	37.475	1920	36.5	1900	36.05
2865	39.675	1930	37.45	1930	36.4625	1910	36.05
2880	39.7	1950	37.5	1950	36.46875	1920	36.05
2895	39.725	1960	37.525	1960	36.55625	1930	36.1
2910	39.7	1970	37.55	1970	36.53125	1950	36.1
2925	39.825	1980	37.55	1980	36.55625	1960	36.1
2955	39.85	1990	37.575	1990	36.56875	1970	36.1
2970	39.85	2000	37.575	2000	36.56875	1980	36.1

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
2985	39.875	2010	37.575	2010	36.56875	1990	36.15
3000	39.925	2020	37.575	2020	36.56875	2000	36.15
3015	40	2030	37.575	2030	36.56875	2010	36.15
3030	40.05	2040	37.575	2040	36.56875	2020	36.15
3045	40	2050	37.575	2050	36.59375	2030	36.2
3060	40.075	2060	37.6	2060	36.6	2040	36.2
3075	40.075	2070	37.65	2070	36.625	2050	36.2
3090	40.175	2080	37.575	2080	36.56875	2060	36.2
3105	40.15	2090	37.625	2090	36.65625	2070	36.2
3120	40.25	2100	37.65	2100	36.65625	2080	36.2
3135	40.275	2110	37.65	2110	36.66875	2090	36.2
3150	40.325	2120	37.675	2120	36.66875	2100	36.2
3165	40.35	2130	37.675	2130	36.6625	2110	36.2
3180	40.425	2140	37.675	2140	36.66875	2120	36.225
3195	40.4	2150	37.675	2150	36.66875	2130	36.25
3210	40.55	2160	37.675	2160	36.66875	2140	36.275
3225	40.575	2170	37.675	2170	36.66875	2150	36.225
3240	40.65	2190	37.675	2190	36.69375	2160	36.25
3255	40.7	2200	37.675	2200	36.69375	2170	36.3
3270	40.775	2210	37.725	2210	36.7	2190	36.325
3285	40.875	2220	37.75	2220	36.7375	2200	36.325
3300	40.925	2230	37.775	2230	36.7625	2210	36.325
3315	40.975	2240	37.775	2240	36.7375	2220	36.325
3330	41.075	2250	37.775	2250	36.76875	2230	36.325
3345	41.175	2260	37.775	2260	36.79375	2240	36.35
3360	41.225	2270	37.85	2270	36.80625	2250	36.35
3375	41.275	2280	37.775	2280	36.79375	2260	36.425
3390	41.3	2290	37.775	2290	36.76875	2270	36.4
3405	41.5	2300	37.8	2300	36.76875	2280	36.425
3420	41.5	2310	37.8	2310	36.79375	2290	36.425
3435	41.6	2320	37.825	2320	36.83125	2300	36.4
3450	41.7	2330	37.875	2330	36.84375	2310	36.425
3465	41.8	2340	37.875	2340	36.875	2320	36.4
3480	41.8	2350	37.9	2350	36.88125	2330	36.425
3495	41.95	2360	37.875	2360	36.86875	2340	36.425
3510	42.075	2370	37.95	2370	36.91875	2350	36.45
3525	42.15	2380	37.875	2380	36.875	2360	36.425
3540	42.25	2390	37.975	2390	36.91875	2370	36.45
3555	42.3	2400	37.925	2400	36.875	2380	36.45
3570	42.5	2410	37.975	2410	36.95	2390	36.5
3585	42.6	2430	38.05	2500	37.08125	2400	36.5
3600	42.8	2440	38.05	2510	37.0875	2410	36.5
		2450	38.05	2520	37.0875	2430	36.525

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
		2460	38.075	2530	37.0875	2440	36.525
		2470	38.075	2540	37.15	2450	36.55
		2480	38.025	2550	37.15625	2460	36.55
		2490	38.125	2560	37.1875	2470	36.575
		2500	38.15	2570	37.1875	2480	36.6
		2510	38.15	2580	37.21875	2481	36.6
		2520	38.15	2590	37.225	2490	36.6
		2530	38.15	2600	37.25	2500	36.65
		2540	38.2	2610	37.28125	2510	36.625
		2550	38.225	2620	37.2875	2520	36.65
		2560	38.25	2630	37.2875	2530	36.7
		2570	38.25	2640	37.325	2540	36.725
		2580	38.275	2650	37.35	2550	36.725
		2590	38.3	2670	37.3875	2560	36.725
		2600	38.3	2680	37.3875	2570	36.75
		2610	38.325	2690	37.41875	2580	36.8
		2620	38.35	2700	37.475	2590	36.8
		2630	38.35	2710	37.475	2600	36.8
		2640	38.35	2720	37.475	2610	36.825
		2650	38.4	2730	37.49375	2620	36.85
		2670	38.425	2740	37.51875	2630	36.85
		2680	38.45	2750	37.54375	2640	36.9
		2690	38.5	2760	37.55	2641	36.875
		2700	38.5	2770	37.58125	2650	36.925
		2710	38.525	2780	37.5875	2670	36.95
		2720	38.525	2790	37.6125	2680	36.95
		2730	38.55	2800	37.61875	2690	36.95
		2740	38.575	2810	37.64375	2700	36.975
		2750	38.575	2820	37.64375	2710	37
		2760	38.575	2830	37.68125	2720	37.025
		2770	38.6	2840	37.6875	2730	37.05
		2780	38.65	2850	37.69375	2740	37.05
		2790	38.675	2860	37.71875	2750	37.075
		2800	38.675	2870	37.71875	2760	37.075
		2810	38.675	2880	37.74375	2770	37.1
		2820	38.7	2890	37.78125	2780	37.1
		2830	38.7	2910	37.81875	2790	37.15
		2840	38.75	2920	37.81875	2800	37.15
		2850	38.775	2930	37.81875	2810	37.125
		2860	38.775	2940	37.84375	2820	37.15
		2870	38.775	2950	37.86875	2830	37.2
		2880	38.775	2960	37.86875	2840	37.225
		2890	38.825	2970	37.9125	2850	37.225

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
		2910	38.875	2980	37.94375	2860	37.25
		2920	38.875	2990	37.95625	2870	37.25
		2930	38.875	3000	37.94375	2880	37.325
		2940	38.875	3010	37.96875	2890	37.325
		2950	38.875	3020	37.98125	2910	37.325
		2960	38.875	3030	38.03125	2920	37.35
		2970	38.925	3040	38.04375	2930	37.4
		2980	38.975	3050	38.04375	2940	37.425
		2990	39.05	3060	38.06875	2950	37.425
		3000	38.975	3070	38.06875	2960	37.425
		3010	38.975	3080	38.14375	2970	37.425
		3020	38.975	3090	38.14375	2980	37.5
		3030	39.05	3100	38.175	2990	37.475
		3040	39.075	3110	38.16875	3000	37.5
		3050	39.075	3120	38.24375	3010	37.525
		3060	39.075	3130	38.275	3020	37.525
		3070	39.1	3150	38.3375	3030	37.525
		3080	39.175	3160	38.36875	3040	37.55
		3090	39.2	3170	38.36875	3050	37.575
		3100	39.225	3180	38.40625	3060	37.625
		3110	39.175	3190	38.4625	3070	37.625
		3120	39.275	3200	38.475	3080	37.625
		3130	39.275	3210	38.525	3090	37.65
		3150	39.325	3220	38.5625	3100	37.7
		3160	39.375	3230	38.575	3110	37.6
		3170	39.4	3240	38.6	3120	37.7
		3180	39.425	3250	38.66875	3130	37.75
		3190	39.45	3260	38.66875	3150	37.775
		3200	39.5	3270	38.7	3160	37.8
		3210	39.5	3280	38.73125	3170	37.85
		3220	39.55	3290	38.76875	3180	37.85
		3230	39.6	3300	38.825	3200	37.9
		3240	39.6	3310	38.8375	3210	37.95
		3250	39.65	3320	38.8625	3220	37.975
		3260	39.675	3330	38.925	3230	38.025
		3270	39.7	3340	38.925	3250	38.075
		3280	39.725	3350	38.9875	3260	38.1
		3290	39.775	3360	39.0375	3270	38.15
		3300	39.825	3370	39.05625	3280	38.2
		3310	39.825	3390	39.14375	3300	38.25
		3320	39.85	3400	39.1875	3310	38.3
		3330	39.9	3410	39.24375	3320	38.325
		3340	39.925	3420	39.29375	3330	38.375

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
		3350	39.95	3430	39.3375	3340	38.4
		3360	40.05	3440	39.3625	3350	38.425
		3370	40.05	3450	39.4625	3360	38.45
		3390	40.075	3460	39.5125	3370	38.525
		3400	40.15	3470	39.56875	3390	38.575
		3410	40.15	3480	39.63125	3400	38.6
		3420	40.2	3490	39.6875	3410	38.65
		3430	40.25	3500	39.99375	3420	38.675
		3440	40.25	3510	40.1	3430	38.75
		3450	40.325	3520	40.125	3440	38.775
		3460	40.35	3530	39.475	3450	38.825
		3470	40.375	3540	39.475	3460	38.85
		3480	40.45	3550	39.55	3470	38.875
		3490	40.45	3560	39.575	3480	38.95
		3500	40.5	3570	39.625	3490	38.975
		3510	40.55	3580	39.65	3500	39
		3520	40.6	3590	39.725	3510	38.975
		3530	40.625	3600	39.75	3520	39.075
		3540	40.675			3530	39.075
		3550	40.75			3540	39.125
		3560	40.775			3550	39.225
		3570	40.825			3560	39.3
		3580	40.9			3570	39.275
		3590	40.975			3580	39.325
		3600	41.025			3590	39.45
						3600	39.5

(b) Data Temperatur PCM Komposit

Waktu (s)	3 mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
10	31.825	31.75	31.875	31.8	31.65	31.65
20	31.925	31.9	31.95	31.925	31.65	31.65
30	32.025	31.925	32.05	31.975	31.65	31.65
40	32.025	32	32.075	32.025	31.675	31.675
50	32.125	32.025	32.125	32.05	31.75	31.7
60	32.125	32.1	32.175	32.1	31.75	31.7
70	32.225	32.1	32.25	32.15	31.75	31.725
80	32.25	32.2	32.275	32.15	31.75	31.75
90	32.375	32.2	32.3	32.2	31.775	31.775
100	32.475	32.275	32.35	32.25	31.8	31.8
110	32.55	32.3	32.425	32.275	31.85	31.8
120	32.575	32.3	32.45	32.3	31.85	31.8

Waktu (s)	3 mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
130	32.625	32.4	32.45	32.3	31.875	31.825
140	32.675	32.4	32.525	32.35	31.875	31.875
150	32.725	32.45	32.55	32.35	31.925	31.875
160	32.775	32.5	32.6	32.375	31.975	31.875
170	32.9	32.525	32.625	32.4	32	31.9
180	32.95	32.625	32.65	32.425	32	31.9
190	32.95	32.625	32.7	32.475	32	31.9
200	33.025	32.675	32.75	32.475	32.075	31.95
210	33.125	32.725	32.775	32.475	32.1	31.975
220	33.25	32.775	32.8	32.55	32.1	31.975
230	33.25	32.825	32.85	32.575	32.1	32
240	33.35	32.825	32.9	32.575	32.1	32
250	33.425	32.9	32.925	32.575	32.175	32.025
260	33.5	32.925	33	32.65	32.175	32.05
270	33.525	33	33	32.675	32.225	32.1
280	33.575	33.05	33.025	32.675	32.25	32.1
290	33.65	33.1	33.05	32.7	32.25	32.1
300	33.7	33.175	33.1	32.75	32.325	32.125
310	33.725	33.2	33.125	32.75	32.325	32.125
320	33.75	33.275	33.175	32.775	32.35	32.15
330	33.85	33.275	33.175	32.85	32.35	32.2
340	33.9	33.325	33.25	32.85	32.4	32.2
350	33.925	33.4	33.25	32.85	32.425	32.225
360	33.95	33.375	33.25	32.85	32.425	32.225
370	34	33.425	33.275	32.9	32.45	32.275
380	34.025	33.45	33.3	32.95	32.475	32.275
390	34.15	33.55	33.325	32.95	32.5	32.275
400	34.125	33.525	33.375	32.975	32.525	32.325
410	34.175	33.575	33.375	33	32.525	32.325
420	34.225	33.6	33.375	33	32.55	32.375
430	34.25	33.675	33.425	33.05	32.575	32.375
440	34.3	33.7	33.425	33.075	32.625	32.375
450	34.35	33.75	33.475	33.1	32.625	32.425
460	34.375	33.75	33.475	33.1	32.625	32.425
470	34.45	33.825	33.5	33.125	32.675	32.475
480	34.5	33.825	33.55	33.175	32.7	32.475
490	34.5	33.825	33.575	33.2	32.725	32.475
500	34.575	33.925	33.575	33.225	32.725	32.525
510	34.625	33.95	33.575	33.25	32.75	32.525
520	34.65	33.95	33.625	33.25	32.8	32.575
530	34.725	33.975	33.675	33.3	32.8	32.575
540	34.75	34.025	33.675	33.3	32.825	32.6
550	34.8	34.025	33.7	33.325	32.875	32.65
560	34.825	34.075	33.7	33.325	32.875	32.65

Waktu (s)	3 mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
570	34.85	34.125	33.725	33.35	32.9	32.675
580	34.85	34.125	33.725	33.35	32.925	32.675
590	34.9	34.15	33.775	33.4	32.925	32.7
600	34.95	34.175	33.8	33.425	32.95	32.725
610	34.975	34.225	33.8	33.425	32.95	32.725
620	35.025	34.25	33.825	33.45	33	32.775
630	35.05	34.275	33.85	33.45	33.025	32.775
640	35.125	34.3	33.875	33.525	33.05	32.775
650	35.15	34.35	33.875	33.525	33.05	32.8
660	35.15	34.35	33.9	33.525	33.05	32.8
670	35.15	34.4	33.975	33.55	33.125	32.85
680	35.175	34.45	33.975	33.55	33.125	32.85
690	35.25	34.45	33.975	33.6	33.15	32.85
700	35.225	34.45	34.025	33.625	33.175	32.9
710	35.25	34.5	34.05	33.625	33.175	32.9
720	35.275	34.525	34.075	33.625	33.225	32.925
730	35.275	34.55	34.075	33.65	33.225	32.925
740	35.3	34.55	34.15	33.7	33.25	32.925
750	35.325	34.55	34.15	33.725	33.25	32.975
760	35.35	34.65	34.15	33.725	33.25	32.975
770	35.35	34.65	34.15	33.725	33.3	33
780	35.375	34.65	34.175	33.725	33.3	33.025
790	35.425	34.65	34.2	33.75	33.3	33.025
800	35.425	34.7	34.2	33.75	33.35	33.05
810	35.425	34.725	34.2	33.8	33.35	33.05
820	35.45	34.75	34.25	33.825	33.35	33.075
830	35.45	34.75	34.275	33.825	33.35	33.125
840	35.5	34.775	34.3	33.825	33.35	33.125
850	35.525	34.825	34.3	33.85	33.35	33.125
860	35.525	34.85	34.3	33.875	33.375	33.125
870	35.525	34.85	34.35	33.9	33.425	33.175
880	35.55	34.85	34.35	33.9	33.45	33.2
890	35.55	34.875	34.35	33.9	33.45	33.2
900	35.525	34.85	34.4	33.9	33.45	33.225
910	35.575	34.875	34.425	33.925	33.45	33.225
920	35.625	34.9	34.45	33.975	33.45	33.225
930	35.55	34.875	34.45	34	33.525	33.275
940	35.625	34.95	34.475	34	33.525	33.275
950	35.625	34.975	34.475	34	33.55	33.3
960	35.65	34.975	34.5	34	33.55	33.3
970	35.675	34.975	34.525	34.05	33.55	33.325
980	35.675	34.975	34.525	34.05	33.55	33.35
990	35.625	34.975	34.55	34.1	33.55	33.35
1000	35.625	34.975	34.55	34.1	33.625	33.35

Waktu (s)	3 mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
1010	35.625	34.975	34.575	34.1	33.65	33.375
1020	35.725	35.075	34.6	34.1	33.65	33.375
1030	35.65	35	34.6	34.125	33.65	33.375
1040	35.625	35.025	34.625	34.125	33.65	33.4
1050	35.675	35.075	34.625	34.15	33.65	33.4
1060	35.75	35.125	34.625	34.15	33.65	33.425
1070	35.775	35.175	34.7	34.2	33.65	33.425
1080	35.775	35.175	34.7	34.2	33.725	33.45
1090	35.725	35.1	34.725	34.2	33.75	33.475
1100	35.8	35.2	34.725	34.225	33.75	33.475
1110	35.825	35.225	34.725	34.25	33.75	33.5
1120	35.725	35.2	34.725	34.25	33.75	33.5
1130	35.725	35.2	34.75	34.25	33.75	33.525
1140	35.8	35.225	34.775	34.25	33.75	33.525
1150	35.8	35.225	34.8	34.25	33.775	33.55
1160	35.8	35.275	34.825	34.3	33.8	33.55
1170	35.875	35.325	34.825	34.3	33.85	33.575
1180	35.9	35.35	34.85	34.35	33.85	33.6
1190	35.825	35.3	34.875	34.35	33.85	33.6
1200	35.875	35.3	34.875	34.35	33.85	33.6
1210	35.925	35.4	34.875	34.375	33.875	33.6
1220	35.9	35.35	34.875	34.375	33.875	33.625
1230	35.9	35.375	34.9	34.375	33.875	33.625
1240	35.9	35.35	34.975	34.4	33.95	33.7
1250	35.9	35.4	34.975	34.425	33.95	33.7
1260	35.925	35.4	34.975	34.45	33.95	33.7
1270	35.95	35.425	34.975	34.45	33.95	33.7
1280	36	35.45	34.975	34.45	33.95	33.7
1290	36	35.475	35	34.475	33.975	33.7
1300	36	35.475	35.025	34.5	34	33.725
1310	36	35.5	35.05	34.5	34	33.725
1320	36	35.5	35.075	34.5	34.05	33.775
1330	36	35.55	35.075	34.5	34.05	33.8
1340	36.025	35.55	35.075	34.525	34.05	33.8
1350	36.075	35.55	35.075	34.575	34.05	33.8
1360	36.1	35.55	35.1	34.575	34.075	33.8
1370	36.1	35.55	35.15	34.575	34.075	33.8
1380	36.1	35.55	35.15	34.6	34.1	33.85
1390	36.1	35.575	35.15	34.6	34.1	33.85
1400	36.1	35.625	35.15	34.625	34.125	33.875
1410	36.1	35.625	35.175	34.625	34.15	33.9
1420	36.1	35.65	35.175	34.625	34.15	33.95
1430	36.1	35.55	35.225	34.625	34.175	33.95
1440	36.15	35.65	35.25	34.625	34.175	33.95

Waktu (s)	3 mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
1450	36.175	35.65	35.25	34.65	34.225	33.975
1460	36.175	35.65	35.25	34.7	34.225	33.975
1470	36.1	35.65	35.25	34.7	34.25	34.025
1480	36.2	35.65	35.275	34.725	34.25	34.025
1490	36.2	35.7	35.275	34.725	34.25	34.025
1500	36.175	35.65	35.3	34.725	34.275	34.075
1510	36.2	35.75	35.35	34.725	34.275	34.075
1520	36.25	35.75	35.35	34.75	34.325	34.1
1530	36.275	35.75	35.35	34.75	34.35	34.1
1540	36.2	35.7	35.35	34.775	34.35	34.15
1550	36.3	35.775	35.35	34.825	34.35	34.15
1560	36.2	35.75	35.375	34.825	34.35	34.15
1570	36.3	35.8	35.425	34.825	34.35	34.15
1580	36.3	35.8	35.45	34.825	34.375	34.15
1590	36.3	35.775	35.45	34.825	34.375	34.15
1600	36.3	35.775	35.45	34.825	34.4	34.175
1610	36.3	35.775	35.45	34.825	34.425	34.175
1620	36.3	35.8	35.45	34.875	34.425	34.2
1630	36.3	35.8	35.5	34.9	34.45	34.2
1640	36.3	35.85	35.5	34.925	34.45	34.225
1650	36.3	35.825	35.5	34.925	34.475	34.225
1660	36.4	35.9	35.525	34.925	34.475	34.25
1670	36.375	35.875	35.525	34.925	34.475	34.25
1680	36.4	35.875	35.525	34.925	34.475	34.25
1690	36.4	35.875	35.575	34.925	34.475	34.25
1700	36.4	35.875	35.575	34.925	34.5	34.275
1710	36.4	35.9	35.575	34.925	34.525	34.275
1720	36.4	35.925	35.6	34.925	34.575	34.3
1730	36.4	35.925	35.6	34.95	34.575	34.3
1740	36.425	35.925	35.625	34.975	34.575	34.325
1750	36.45	35.975	35.625	35	34.575	34.35
1760	36.475	35.95	35.625	35.025	34.575	34.35
1770	36.475	36	35.65	35.025	34.575	34.35
1780	36.5	35.975	35.675	35.025	34.575	34.35
1790	36.4	35.925	35.675	35.025	34.6	34.375
1800	36.5	36	35.7	35.025	34.625	34.4
1810	36.5	36	35.7	35.025	34.625	34.4
1820	36.425	35.95	35.7	35.05	34.65	34.4
1830	36.425	35.975	35.7	35.05	34.675	34.4
1840	36.525	36	35.7	35.05	34.675	34.4
1850	36.525	36.025	35.725	35.05	34.675	34.425
1860	36.525	36.05	35.725	35.05	34.675	34.45
1870	36.475	36	35.75	35.075	34.675	34.45
1880	36.55	36.05	35.775	35.075	34.675	34.45

Waktu (s)	3 mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
1890	36.5	36	35.775	35.125	34.675	34.45
1900	36.525	36.025	35.8	35.125	34.7	34.45
1910	36.525	36	35.8	35.15	34.725	34.45
1920	36.525	36.05	35.8	35.15	34.725	34.45
1930	36.5	36.025	35.8	35.15	34.725	34.5
1940	36.5	36.025	35.8	35.15	34.75	34.5
1950	36.525	36.025	35.8	35.15	34.775	34.5
1960	36.525	36.05	35.8	35.175	34.775	34.525
1970	36.525	36.05	35.825	35.175	34.775	34.525
1980	36.525	36.05	35.825	35.2	34.775	34.525
1990	36.525	36.05	35.85	35.2	34.8	34.525
2000	36.525	36.05	35.85	35.2	34.8	34.55
2010	36.525	36.05	35.875	35.2	34.8	34.55
2020	36.525	36.1	35.875	35.2	34.825	34.55
2030	36.55	36.1	35.875	35.225	34.825	34.55
2040	36.525	36.1	35.875	35.225	34.825	34.55
2050	36.55	36.1	35.9	35.25	34.825	34.575
2060	36.575	36.1	35.925	35.25	34.9	34.6
2070	36.575	36.1	35.925	35.275	34.9	34.6
2080	36.575	36.125	35.95	35.275	34.9	34.6
2090	36.6	36.125	35.95	35.275	34.9	34.625
2100	36.55	36.125	35.95	35.325	34.9	34.625
2110	36.625	36.125	35.95	35.325	34.9	34.625
2120	36.625	36.15	35.95	35.325	34.925	34.65
2130	36.625	36.15	35.95	35.325	34.925	34.65
2140	36.625	36.15	35.95	35.325	34.925	34.65
2150	36.65	36.15	35.975	35.325	34.925	34.675
2160	36.625	36.15	35.975	35.35	34.95	34.675
2170	36.625	36.175	36	35.375	34.975	34.675
2180	36.65	36.2	36	35.375	34.975	34.675
2190	36.675	36.2	36	35.4	35	34.7
2200	36.675	36.2	36	35.4	35	34.725
2210	36.675	36.225	36.05	35.4	35	34.725
2220	36.65	36.15	36.05	35.4	35	34.725
2230	36.65	36.175	36.05	35.4	35	34.725
2240	36.725	36.25	36.05	35.425	35.025	34.75
2250	36.65	36.175	36.05	35.45	35.025	34.775
2260	36.675	36.2	36.05	35.45	35.05	34.775
2270	36.725	36.275	36.075	35.475	35.05	34.775
2280	36.675	36.2	36.1	35.475	35.05	34.775
2290	36.7	36.2	36.1	35.5	35.05	34.775
2300	36.725	36.225	36.125	35.5	35.1	34.775
2310	36.725	36.2	36.125	35.5	35.1	34.8
2320	36.725	36.25	36.125	35.5	35.1	34.8

Waktu (s)	3 mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
2330	36.725	36.275	36.125	35.5	35.1	34.825
2340	36.725	36.25	36.125	35.5	35.125	34.825
2350	36.75	36.3	36.125	35.525	35.175	34.875
2360	36.75	36.275	36.15	35.55	35.175	34.875
2370	36.775	36.3	36.175	35.575	35.175	34.875
2380	36.775	36.3	36.175	35.575	35.2	34.875
2390	36.8	36.3	36.2	35.575	35.2	34.875
2400	36.8	36.3	36.2	35.6	35.225	34.925
2410	36.825	36.325	36.225	35.6	35.225	34.925
2420	36.825	36.325	36.225	35.6	35.25	34.925
2430	36.825	36.375	36.225	35.6	35.275	34.925
2440	36.875	36.35	36.225	35.6	35.3	34.95
2450	36.925	36.375	36.25	35.65	35.3	34.975
2460	36.925	36.4	36.25	35.65	35.3	34.975
2470	36.925	36.375	36.275	35.675	35.3	35
2480	36.925	36.425	36.275	35.675	35.3	35
2490	36.875	36.375	36.275	35.675	35.3	35
2500	36.95	36.425	36.3	35.675	35.35	35.025
2510	36.975	36.45	36.3	35.7	35.35	35.025
2520	37	36.45	36.3	35.725	35.375	35.05
2530	37	36.45	36.3	35.725	35.4	35.075
2540	37.025	36.475	36.3	35.75	35.4	35.075
2550	36.975	36.45	36.35	35.775	35.425	35.075
2560	37.025	36.525	36.35	35.775	35.425	35.1
2570	36.975	36.475	36.4	35.825	35.425	35.1
2580	37.025	36.5	36.4	35.825	35.45	35.175
2590	37.025	36.5	36.4	35.825	35.45	35.175
2600	37.05	36.525	36.425	35.85	35.475	35.175
2610	37.075	36.525	36.425	35.85	35.475	35.175
2620	37.075	36.525	36.45	35.85	35.525	35.175
2630	37.075	36.55	36.475	35.85	35.525	35.2
2640	37.1	36.575	36.5	35.85	35.525	35.2
2650	37.125	36.575	36.525	35.95	35.525	35.2
2660	37.125	36.6	36.525	35.95	35.525	35.2
2670	37.15	36.6	36.55	35.95	35.6	35.3
2680	37.175	36.6	36.55	35.95	35.6	35.3
2690	37.2	36.625	36.575	35.95	35.6	35.3
2700	37.2	36.675	36.575	36.025	35.65	35.3
2710	37.225	36.675	36.575	36.025	35.65	35.3
2720	37.225	36.675	36.625	36.05	35.65	35.3
2730	37.25	36.7	36.625	36.05	35.65	35.325
2740	37.3	36.725	36.65	36.05	35.725	35.4
2750	37.325	36.75	36.675	36.05	35.725	35.4
2760	37.325	36.75	36.675	36.05	35.725	35.4

Waktu (s)	3 mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
2770	37.35	36.775	36.7	36.15	35.725	35.4
2780	37.35	36.775	36.7	36.15	35.725	35.4
2790	37.4	36.775	36.7	36.15	35.725	35.4
2800	37.4	36.8	36.725	36.15	35.8	35.475
2810	37.4	36.825	36.75	36.15	35.8	35.5
2820	37.425	36.825	36.775	36.25	35.825	35.5
2830	37.425	36.85	36.775	36.25	35.825	35.5
2840	37.425	36.825	36.775	36.25	35.825	35.5
2850	37.475	36.85	36.775	36.25	35.825	35.5
2860	37.5	36.875	36.825	36.25	35.825	35.5
2870	37.525	36.9	36.85	36.275	35.825	35.5
2880	37.525	36.9	36.85	36.275	35.925	35.6
2890	37.525	36.9	36.85	36.275	35.925	35.6
2900	37.525	36.9	36.9	36.375	35.925	35.6
2910	37.525	36.925	36.925	36.375	35.925	35.6
2920	37.55	36.95	36.925	36.375	35.95	35.675
2930	37.575	37	36.95	36.375	35.95	35.675
2940	37.6	37	36.95	36.375	35.95	35.675
2950	37.625	37.025	37	36.45	36	35.7
2960	37.625	37.025	37.025	36.45	36.025	35.7
2970	37.625	37.025	37.05	36.475	36.05	35.75
2980	37.625	37.025	37.05	36.475	36.05	35.75
2990	37.625	37.1	37.05	36.475	36.05	35.75
3000	37.65	37.1	37.075	36.475	36.05	35.75
3010	37.7	37.1	37.1	36.475	36.05	35.775
3020	37.725	37.1	37.15	36.575	36.125	35.775
3030	37.725	37.1	37.15	36.575	36.15	35.775
3040	37.65	37.1	37.15	36.575	36.15	35.775
3050	37.725	37.125	37.2	36.575	36.15	35.875
3060	37.725	37.1	37.2	36.575	36.175	35.875
3070	37.775	37.175	37.2	36.575	36.225	35.875
3080	37.725	37.1	37.2	36.6	36.225	35.875
3090	37.725	37.175	37.2	36.625	36.225	35.875
3100	37.75	37.175	37.275	36.675	36.275	35.925
3110	37.775	37.175	37.3	36.675	36.275	35.925
3120	37.825	37.2	37.3	36.675	36.325	35.975
3130	37.875	37.275	37.3	36.675	36.325	35.975
3140	37.85	37.2	37.3	36.675	36.325	35.975
3150	37.825	37.25	37.325	36.75	36.35	36
3160	37.925	37.3	37.325	36.75	36.35	36
3170	37.875	37.275	37.35	36.775	36.4	36.075
3180	37.975	37.35	37.375	36.775	36.425	36.075
3190	38	37.375	37.425	36.775	36.425	36.075
3200	37.95	37.325	37.425	36.85	36.475	36.125

Waktu (s)	3 mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
3210	38	37.375	37.425	36.85	36.475	36.125
3220	38	37.425	37.5	36.875	36.5	36.175
3230	38.1	37.45	37.525	36.875	36.5	36.175
3240	38.05	37.425	37.525	36.875	36.525	36.2
3250	38.1	37.45	37.55	36.975	36.6	36.275
3260	38.2	37.55	37.575	36.975	36.6	36.275
3270	38.125	37.525	37.625	37	36.625	36.325
3280	38.225	37.6	37.625	37.025	36.625	36.325
3290	38.25	37.625	37.625	37.075	36.675	36.325
3300	38.2	37.575	37.675	37.075	36.675	36.325
3310	38.3	37.675	37.675	37.075	36.7	36.35
3320	38.275	37.65	37.725	37.175	36.75	36.425
3330	38.3	37.675	37.725	37.175	36.75	36.425
3340	38.4	37.775	37.75	37.175	36.775	36.425
3350	38.375	37.7	37.825	37.275	36.775	36.45
3360	38.375	37.75	37.825	37.275	36.8	36.45
3370	38.4	37.775	37.85	37.3	36.85	36.525
3380	38.4	37.775	37.9	37.325	36.875	36.55
3390	38.475	37.775	37.925	37.325	36.9	36.55
3400	38.5	37.825	37.95	37.4	36.95	36.65
3410	38.5	37.875	37.95	37.4	36.975	36.65
3420	38.525	37.9	38.025	37.45	37.025	36.675
3430	38.575	37.925	38.025	37.475	37.025	36.675
3440	38.575	37.95	38.05	37.5	37.05	36.7
3450	38.625	37.95	38.075	37.525	37.1	36.75
3460	38.65	38.025	38.1	37.525	37.125	36.75
3470	38.7	38.025	38.15	37.575	37.125	36.775
3480	38.725	38.075	38.175	37.6	37.15	36.8
3490	38.75	38.1	38.175	37.6	37.225	36.8
3500	38.85	38.175	38.25	37.65	37.225	36.875
3510	38.825	38.175	38.25	37.675	37.225	36.875
3520	38.825	38.175	38.3	37.7	37.325	36.925
3530	38.85	38.225	38.35	37.775	37.325	36.925
3540	38.925	38.25	38.375	37.775	37.4	36.95
3550	38.95	38.3	38.45	37.85	37.45	37
3560	39	38.35	38.475	37.9	37.5	37.05
3570	39.025	38.4	38.55	37.95	37.55	37.1
3580	39.075	38.45	38.575	37.95	37.6	37.125
3590	39.125	38.5	38.625	38.025	37.65	37.15
3600	39.175	38.525	38.7	38.05	37.725	37.225

Lampiran 6. Data Temperatur pada 2C

(a) Data Temperatur *Natural Convection* dan PCM Murni

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
15	31.875	10	31.9	25	31.95	10	32.375
30	32.15	20	32.125	50	32.25	20	32.45
45	32.575	30	32.3	75	32.65	30	32.525
60	33.05	40	32.525	100	33.05	40	32.625
75	33.625	50	32.725	125	33.4	50	32.725
90	34	60	33	150	33.75	60	32.8
105	34.5	70	33.275	175	34.1	70	32.95
120	34.6	80	33.55	200	34.375	80	33.025
135	34.975	90	33.8	225	34.7	90	33.175
150	35.375	100	34.075	250	35.025	100	33.225
165	35.475	110	34.35	275	35.35	110	33.3
180	35.725	120	34.55	300	35.625	120	33.45
195	36.1	130	34.775	325	35.925	130	33.6
210	36.45	140	34.975	350	36.225	140	33.65
225	36.55	150	35.175	375	36.475	150	33.725
240	36.75	160	35.375	400	36.75	160	33.9
255	36.95	170	35.5	425	37.075	170	34.05
270	37.125	180	35.65	450	37.225	180	34.05
285	37.45	190	35.825	475	37.5	190	34.225
300	37.55	200	35.925	500	37.725	200	34.275
315	37.775	210	36.1	525	37.95	210	34.425
330	38.075	220	36.275	550	38.2	220	34.5
345	38.175	230	36.425	575	38.4	230	34.6
360	38.4	240	36.6	600	38.6	240	34.725
375	38.5	250	36.75	625	38.8	250	34.825
390	38.7	260	36.925	650	39	260	34.925
405	38.9	270	37.075	675	39.125	270	35
420	39.05	280	37.25	700	39.35	280	35.075
435	39.175	290	37.425	725	39.575	290	35.175
450	39.575	300	37.6	750	39.7	300	35.275
465	39.675	310	37.725	775	39.9	310	35.375
480	39.925	320	37.85	800	40.05	320	35.475
495	40.025	330	37.975	825	40.25	330	35.55
510	40.3	340	38.15	850	40.425	340	35.625
525	40.4	350	38.25	875	40.575	350	35.8
540	40.6	360	38.35	900	40.75	360	35.8
555	40.875	370	38.5	925	40.925	370	35.875
570	41.2	380	38.65	950	41.075	380	35.975
585	41.525	390	38.75	975	41.25	390	36.025
600	41.825	400	38.875	1000	41.375	400	36.225
615	42.125	410	39	1025	41.5	410	36.3

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
630	42.45	420	39.1	1050	41.6	420	36.3
645	42.575	430	39.175	1075	41.65	430	36.425
660	42.75	440	39.35	1100	41.85	440	36.5
675	43.025	450	39.4	1125	41.95	450	36.55
690	43.3	460	39.525	1150	42.1	460	36.65
705	43.425	470	39.65	1175	42.3	470	36.75
720	43.6	480	39.75	1200	42.425	480	36.825
750	43.85	491	39.85	1250	42.775	491	36.875
765	44.125	500	39.9	1275	43	500	36.975
780	44.475	510	40	1300	43.125	510	37
795	44.675	520	40.05	1325	43.275	520	37.1
810	44.9	530	40.125	1350	43.425	530	37.2
825	45.125	540	40.175	1375	43.65	540	37.225
840	45.375	550	40.275	1400	43.8	550	37.3
855	45.575	560	40.325	1425	43.975	560	37.375
870	45.825	570	40.525	1450	44.05	570	37.425
885	46.075	580	40.525	1475	44.225	580	37.5
900	46.25	591	40.6	1500	44.4	590	37.55
915	46.45	600	40.625	1525	44.6	600	37.6
930	46.675	610	40.7	1550	44.75	610	37.65
945	47.075	620	40.775	1575	44.975	620	37.725
960	47.275	630	40.875	1600	45.175	630	37.825
975	47.425	640	40.95	1625	45.35	641	37.825
990	47.65	650	41	1650	45.5	650	37.925
1005	47.825	660	41.1	1675	45.725	660	37.975
1020	47.975	670	41.175	1700	45.8	670	38.05
1035	48.15	680	41.25	1725	45.975	680	38.1
1050	48.35	690	41.35	1750	46.15	690	38.15
1065	48.5	700	41.4	1775	46.35	700	38.225
1080	48.575	710	41.475	1800	47.025	710	38.275
1095	48.675	720	41.525			720	38.35
1110	48.85	730	41.625			730	38.4
1125	49.025	741	41.675			740	38.475
1140	49.225	750	41.7			750	38.5
1155	49.325	760	41.8			760	38.6
1170	49.575	770	41.875			770	38.7
1185	49.675	780	41.925			780	38.7
1200	49.775	790	41.9			790	38.8
1215	49.875	800	42.05			800	38.875
1230	50.1	810	42.1			810	38.85
1245	50.275	820	42.175			820	38.975
1260	50.425	830	42.225			830	39.025
1275	50.525	841	42.325			840	39.1

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
1290	50.625	850	42.4			850	39.125
1305	50.725	860	42.4			860	39.175
1320	50.85	870	42.425			870	39.275
1335	50.925	880	42.575			880	39.3
1350	51.125	890	42.575			890	39.3
1365	51.3	900	42.575			900	39.425
1380	51.2	910	42.675			910	39.475
1395	51.5	920	42.775			920	39.55
1410	51.65	930	42.825			930	39.575
1425	51.9	940	42.875			940	39.65
1440	51.675	950	42.975			950	39.675
1455	52.05	960	42.975			960	39.75
1485	52.15	970	43.075			970	39.8
1500	52.325	981	43.175			981	39.825
1515	52.5	990	43.175			990	39.9
1530	52.675	1000	43.275			1000	39.9
1545	52.85	1010	43.35			1010	39.975
1560	52.95	1020	43.375			1020	40.025
1575	53.1	1030	43.45			1030	40.075
1590	53.225	1040	43.5			1040	40.1
1605	53.375	1050	43.55			1050	40.15
1620	53.625	1060	43.6			1060	40.225
1635	53.8	1070	43.625			1070	40.25
1650	54.025	1081	43.625			1080	40.275
1665	54.225	1090	43.75			1090	40.325
1680	54.425	1100	43.8			1100	40.4
1695	54.6	1110	43.85			1110	40.425
1710	54.8	1120	43.9			1120	40.45
1725	55.075	1130	43.9			1130	40.5
1740	55.275	1141	43.925			1140	40.575
1755	55.55	1150	44			1150	40.6
1770	56	1160	44.075			1160	40.675
1785	56.3	1170	44.125			1170	40.7
1800	56.15	1180	44.2			1180	40.775
		1190	44.25			1190	40.775
		1200	44.3			1200	40.85
		1210	44.375			1210	40.9
		1221	44.4			1221	41.025
		1230	44.5			1230	41
		1241	44.5			1240	41.125
		1250	44.6			1250	41.175
		1260	44.65			1260	41.175
		1270	44.7			1270	41.275

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
		1280	44.775			1280	41.275
		1290	44.825			1290	41.375
		1300	44.9			1300	41.45
		1310	44.95			1310	41.475
		1320	45.05			1320	41.55
		1330	45.1			1330	41.6
		1340	45.175			1340	41.675
		1350	45.25			1350	41.7
		1360	45.325			1360	41.775
		1370	45.35			1370	41.8
		1380	45.425			1380	41.875
		1390	45.5			1390	41.925
		1400	45.55			1400	41.975
		1410	45.6			1410	42.05
		1420	45.625			1420	42.125
		1430	45.7			1430	42.15
		1440	45.75			1440	42.2
		1450	45.8			1450	42.275
		1461	45.85			1461	42.3
		1470	45.95			1470	42.375
		1480	46			1480	42.45
		1490	46.1			1490	42.5
		1500	46.1			1500	42.55
		1510	46.2			1511	42.65
		1520	46.25			1520	42.725
		1530	46.25			1530	42.75
		1540	46.325			1540	42.825
		1550	46.4			1550	42.875
		1560	46.425			1560	42.95
		1570	46.5			1570	43.025
		1580	46.525			1580	43.1
		1590	46.625			1590	43.175
		1600	46.65			1600	43.225
		1610	46.675			1610	43.3
		1620	46.775			1620	43.4
		1630	46.825			1630	43.45
		1640	46.875			1640	43.55
		1650	46.925			1650	43.675
		1660	46.975			1660	43.775
		1670	47.025			1670	43.775
		1680	47.075			1680	43.9
		1690	47.075			1690	43.975
		1701	47.175			1701	44.1

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3mm	Waktu (s)	PCM Murni 6mm	Waktu (s)	PCM Murni 9mm
		1710	47.2			1710	44.225
		1720	47.275			1720	44.3
		1730	47.3			1730	44.375
		1740	47.325			1740	44.45
		1750	47.4			1750	44.575
		1760	47.425			1760	44.575
		1770	47.425			1770	44.75
		1780	47.5			1780	44.85
		1790	47.55			1790	44.925
		1800	47.7			1800	44.925

(b) Data Temperatur PCM Komposit

Waktu (s)	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
10	31.25	31.925	32.025	31.975	31.925	31.975
20	31.35	31.925	32.3	32.1	32.025	32.025
30	31.45	32.025	32.4	32.225	32.125	32.15
40	31.575	32.1	32.525	32.325	32.225	32.25
50	31.7	32.25	32.55	32.425	32.35	32.3
60	31.825	32.3	32.675	32.575	32.45	32.45
70	32.025	32.475	32.775	32.675	32.55	32.55
80	32.2	32.625	32.875	32.775	32.675	32.65
90	32.3	32.7	33.025	32.975	32.8	32.725
100	32.525	32.9	33.15	33.125	32.9	32.85
110	32.7	33.05	33.225	33.175	33	33.125
120	32.875	33.175	33.375	33.35	33.075	33.225
130	33	33.275	33.45	33.4	33.2	33.325
140	33.175	33.425	33.575	33.525	33.325	33.425
150	33.4	33.625	33.7	33.625	33.5	33.55
160	33.525	33.7	33.8	33.75	33.6	33.625
170	33.65	33.85	33.925	33.9	33.725	33.775
180	33.9	34.025	34.05	34	33.8	33.8
190	33.975	34.125	34.15	34.125	33.95	33.95
200	34.175	34.3	34.25	34.25	34.05	34.025
210	34.325	34.4	34.375	34.35	34.175	34.175
220	34.475	34.575	34.5	34.5	34.325	34.225
230	34.65	34.725	34.6	34.625	34.45	34.325
240	34.825	34.825	34.75	34.725	34.575	34.375
250	34.925	35	34.85	34.825	34.725	34.55
260	35.125	35.125	34.975	34.95	34.825	34.575
270	35.275	35.225	35.025	35.025	34.875	34.725

Waktu (s)	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
280	35.425	35.4	35.175	35.175	35	34.825
290	35.575	35.525	35.325	35.275	35.075	34.875
300	35.675	35.575	35.4	35.35	35.175	34.925
310	35.875	35.775	35.55	35.45	35.325	35.025
320	35.975	35.9	35.675	35.575	35.45	35.125
330	36.125	36	35.8	35.675	35.55	35.2
340	36.2	36.075	35.9	35.775	35.65	35.3
350	36.35	36.2	36.025	35.9	35.75	35.4
360	36.45	36.275	36.1	36	35.85	35.475
370	36.6	36.425	36.2	36.075	35.975	35.575
380	36.7	36.525	36.325	36.2	36.075	35.65
390	36.8	36.625	36.4	36.275	36.2	35.725
400	36.9	36.7	36.475	36.375	36.275	35.825
410	37.025	36.775	36.575	36.475	36.375	35.925
420	37.125	36.875	36.675	36.55	36.425	36
430	37.225	37	36.775	36.65	36.525	36.075
440	37.325	37.075	36.85	36.7	36.55	36.125
450	37.4	37.175	36.925	36.8	36.625	36.225
460	37.5	37.275	37.05	36.875	36.7	36.325
470	37.6	37.375	37.1	36.975	36.775	36.375
480	37.7	37.425	37.1	36.975	36.825	36.45
490	37.7	37.425	37.225	37.075	36.825	36.45
500	37.825	37.55	37.3	37.175	36.925	36.6
510	37.975	37.7	37.375	37.275	36.925	36.6
520	38.075	37.8	37.45	37.35	37	36.675
530	38.15	37.825	37.6	37.475	37.1	36.825
540	38.225	37.9	37.65	37.475	37.125	36.825
550	38.25	37.925	37.7	37.55	37.175	36.875
560	38.325	38	37.75	37.65	37.2	36.925
570	38.45	38.1	37.85	37.675	37.275	37.025
580	38.475	38.175	37.925	37.75	37.35	37.125
590	38.575	38.225	37.975	37.85	37.375	37.125
600	38.675	38.3	38.05	37.925	37.425	37.225
610	38.725	38.375	38.125	37.95	37.475	37.325
620	38.8	38.425	38.175	38.05	37.575	37.375
630	38.875	38.475	38.275	38.15	37.65	37.425
640	38.975	38.575	38.325	38.2	37.675	37.525
650	39	38.65	38.4	38.25	37.775	37.55
660	39.1	38.7	38.45	38.35	37.775	37.625
670	39.15	38.75	38.525	38.4	37.85	37.7
680	39.225	38.8	38.55	38.4	37.875	37.75
690	39.3	38.9	38.675	38.525	37.925	37.775
700	39.375	38.9	38.75	38.575	38	37.875
710	39.4	38.9	38.75	38.575	38.05	37.95

Waktu (s)	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
720	39.5	39.075	38.875	38.725	38.1	37.975
730	39.525	39.075	38.85	38.725	38.175	38.075
740	39.65	39.15	39	38.875	38.25	38.125
750	39.625	39.15	39	38.875	38.3	38.175
760	39.725	39.225	39.025	38.9	38.375	38.225
770	39.725	39.225	39.1	39	38.45	38.3
780	39.8	39.325	39.175	39.05	38.5	38.4
790	39.85	39.35	39.225	39.1	38.525	38.4
800	39.9	39.425	39.3	39.15	38.65	38.5
810	39.975	39.475	39.375	39.25	38.7	38.525
820	40.025	39.5	39.45	39.25	38.75	38.525
830	40.075	39.575	39.475	39.35	38.825	38.6
840	40.175	39.625	39.575	39.375	38.9	38.65
850	40.225	39.675	39.625	39.45	38.95	38.725
860	40.3	39.75	39.675	39.5	39	38.775
870	40.375	39.775	39.7	39.55	39.1	38.875
880	40.4	39.85	39.8	39.6	39.15	38.875
890	40.475	39.9	39.85	39.675	39.175	38.925
900	40.575	39.95	39.9	39.75	39.275	38.975
910	40.6	40	39.95	39.75	39.325	39.05
920	40.675	40.075	39.95	39.775	39.4	39.075
930	40.725	40.125	40.05	39.875	39.4	39.125
940	40.85	40.175	40.125	39.925	39.475	39.2
950	40.9	40.225	40.15	39.975	39.525	39.225
960	40.95	40.275	40.225	40.025	39.55	39.3
970	41	40.325	40.225	40.025	39.6	39.325
980	41	40.35	40.325	40.125	39.6	39.325
990	41.1	40.4	40.325	40.125	39.675	39.425
1000	41.2	40.5	40.425	40.25	39.775	39.5
1010	41.2	40.525	40.525	40.25	39.775	39.525
1020	41.2	40.525	40.45	40.25	39.85	39.575
1030	41.325	40.6	40.525	40.325	39.875	39.65
1040	41.35	40.625	40.6	40.325	39.9	39.675
1050	41.4	40.675	40.625	40.4	39.975	39.725
1060	41.45	40.725	40.675	40.425	40.025	39.75
1070	41.55	40.8	40.725	40.525	40.075	39.825
1080	41.575	40.825	40.775	40.525	40.1	39.85
1090	41.575	40.875	40.825	40.6	40.15	39.85
1100	41.65	40.9	40.9	40.625	40.2	39.95
1110	41.775	41	40.9	40.7	40.25	39.975
1120	41.775	41.025	41	40.725	40.3	40.025
1130	41.8	41.05	41.05	40.8	40.375	40.075
1140	41.875	41.125	41.075	40.825	40.4	40.125
1150	41.925	41.2	41.15	40.875	40.4	40.125

Waktu (s)	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
1160	42.05	41.275	41.175	40.925	40.4	40.175
1170	42.025	41.3	41.225	40.975	40.5	40.3
1180	42.125	41.325	41.3	41	40.55	40.35
1190	42.15	41.4	41.35	41.1	40.6	40.325
1200	42.225	41.4	41.4	41.1	40.6	40.35
1210	42.275	41.475	41.45	41.175	40.675	40.4
1220	42.35	41.5	41.5	41.225	40.725	40.45
1230	42.4	41.55	41.525	41.275	40.75	40.5
1240	42.475	41.6	41.625	41.3	40.825	40.6
1250	42.525	41.625	41.625	41.375	40.875	40.6
1260	42.6	41.675	41.7	41.4	40.925	40.625
1270	42.65	41.725	41.75	41.45	41	40.675
1280	42.75	41.75	41.8	41.5	41.025	40.75
1290	42.775	41.825	41.85	41.55	41.125	40.85
1300	42.85	41.85	41.9	41.6	41.1	40.8
1310	42.9	41.9	42	41.675	41.175	40.85
1320	42.975	41.925	42.025	41.7	41.25	40.925
1330	43.05	41.975	42.1	41.775	41.275	41
1340	43.1	42.025	42.175	41.8	41.325	41.025
1350	43.175	42.075	42.2	41.875	41.4	41.1
1360	43.25	42.125	42.275	41.925	41.475	41.125
1370	43.35	42.15	42.325	41.975	41.55	41.175
1380	43.375	42.225	42.375	42.025	41.65	41.25
1390	43.475	42.25	42.375	42.05	41.65	41.275
1400	43.575	42.325	42.5	42.15	41.75	41.35
1410	43.625	42.35	42.575	42.225	41.8	41.375
1420	43.7	42.425	42.55	42.225	41.85	41.45
1430	43.75	42.475	42.625	42.275	41.925	41.5
1440	43.775	42.5	42.675	42.325	41.95	41.55
1450	43.925	42.575	42.675	42.325	42.025	41.625
1460	43.925	42.6	42.8	42.425	42.05	41.625
1470	44.075	42.675	42.875	42.525	42.125	41.7
1480	44.15	42.75	43	42.625	42.175	41.775
1490	44.175	42.775	43	42.625	42.225	41.825
1500	44.225	42.85	43.05	42.675	42.3	41.9
1510	44.375	42.925	43.1	42.7	42.35	41.925
1520	44.4	42.925	43.2	42.8	42.4	42
1530	44.475	43.025	43.3	42.825	42.45	42.075
1540	44.575	43.075	43.3	42.9	42.5	42.1
1550	44.675	43.125	43.4	42.95	42.55	42.175
1560	44.8	43.2	43.45	43	42.625	42.225
1570	44.85	43.25	43.475	43.05	42.675	42.275
1580	44.95	43.3	43.6	43.175	42.725	42.325
1590	45	43.325	43.65	43.225	42.775	42.4

Waktu (s)	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
1600	45.1	43.425	43.675	43.25	42.85	42.475
1610	45.2	43.425	43.775	43.275	42.875	42.5
1620	45.3	43.5	43.9	43.45	42.95	42.6
1630	45.375	43.575	43.95	43.425	43.025	42.625
1640	45.475	43.625	44.025	43.5	43.075	42.7
1650	45.55	43.7	44.075	43.525	43.125	42.725
1660	45.65	43.725	44.25	43.7	43.2	42.825
1670	45.7	43.8	44.25	43.7	43.225	42.825
1680	45.8	43.85	44.25	43.725	43.3	42.95
1690	45.9	43.925	44.325	43.825	43.375	42.975
1700	45.975	43.975	44.425	43.85	43.45	43.05
1710	46.05	44.05	44.55	43.925	43.475	43.025
1720	46.15	44.125	44.625	44	43.55	43.15
1730	46.2	44.2	44.6	44.05	43.625	43.225
1740	46.25	44.275	44.75	44.125	43.7	43.275
1750	46.35	44.325	44.825	44.175	43.7	43.275
1760	46.375	44.4	44.925	44.225	43.775	43.375
1770	46.525	44.5	45	44.3	43.85	43.45
1780	46.525	44.525	45.1	44.375	43.9	43.5
1790	46.525	44.625	45.15	44.45	44	43.6
1800	46.525	44.625	45.3	44.5	44.075	43.65

Lampiran 7. Data Temperatur pada 3C

(a) Data Temperatur *Natural Convection* dan PCM Murni

Waktu (s)	Natural Convection	NO.	PCM Murni 3mm	NO.	PCM Murni 6mm	NO.	PCM Murni 9mm
15	31.725	25	31.575	10	32.125	10	32.35
30	32.35	50	32.05	20	32.35	20	32.55
45	33	75	32.85	30	32.625	30	32.75
60	33.9	100	33.675	40	32.925	40	33.025
75	34.775	125	34.575	50	33.2	50	33.225
90	35.775	150	35.35	60	33.475	60	33.5
105	36.675	175	36.15	70	33.8	70	33.725
120	37.55	200	36.775	80	34.1	80	34
135	38.45	225	37.525	90	34.425	90	34.3
150	39.3	250	38.2	100	34.7	100	34.525
165	40.125	275	38.85	110	35	110	34.8
180	40.95	300	39.425	120	35.3	120	35.05
195	41.7	325	40	130	35.575	130	35.3
210	42.45	350	40.55	140	35.9	140	35.575
225	43.3	375	41.025	150	36.2	150	35.8

Waktu (s)	Natural Convection	NO.	PCM Murni 3mm	NO.	PCM Murni 6mm	NO.	PCM Murni 9mm
240	44.025	400	41.525	160	36.425	160	36.05
255	44.725	425	41.95	170	36.725	170	36.275
270	45.4	450	42.425	180	37.05	180	36.5
285	46.05	475	42.85	190	37.3	190	36.725
300	46.7	500	43.275	200	37.6	200	36.975
315	47.35	525	43.65	210	37.8	210	37.225
330	47.9	550	44	220	38.075	220	37.475
345	48.5	575	44.325	230	38.325	230	37.65
360	49.025	600	44.575	240	38.575	240	37.85
375	49.575	625	44.9	250	38.775	250	38.075
390	50.075	650	45.225	260	39.05	260	38.25
405	50.625	675	45.65	270	39.325	270	38.425
420	51.15	700	46.025	280	39.5	280	38.65
435	51.625	725	46.35	290	39.7	290	38.8
450	52.175	750	46.675	300	39.9	300	39
465	52.6	775	47.025	310	40.125	310	39.175
480	53.075	800	47.625	320	40.375	320	39.325
495	53.55	825	47.85	330	40.525	330	39.5
510	54	850	48.15	340	40.7	340	39.7
525	54.475	875	48.425	350	40.9	350	39.875
540	54.875	900	48.8	360	41.075	360	40.05
555	55.325	925	49.475	370	41.3	370	40.225
570	55.75	950	50.025	380	41.45	380	40.375
585	56.15	975	50.6	390	41.7	390	40.55
600	56.525	1000	51.075	400	41.85	400	40.7
615	56.85	1025	51.425	410	42.025	410	40.875
630	57.175	1050	51.775	420	42.275	420	41.15
645	57.575	1075	52.25	430	42.4	430	41.225
660	57.975	1100	52.6	440	42.575	440	41.35
675	58.275	1125	52.975	450	42.775	450	41.525
690	58.6	1150	53.375	460	42.925	460	41.625
705	58.9	1175	53.7	470	43.025	470	41.7
720	59.275	1200	53.95	480	43.2	480	41.9
750	59.9			491	43.325	491	42.05
765	60.2			500	43.425	500	42.075
780	60.5			510	43.575	510	42.25
795	60.775			520	43.7	520	42.325
810	61.125			530	43.8	530	42.425
825	61.4			540	43.95	540	42.575
840	61.7			550	44.025	550	42.575
855	62			560	44.175	560	42.675
870	62.3			570	44.3	570	42.825
885	62.6			580	44.425	580	42.9

Waktu (s)	Natural Convection	NO.	PCM Murni 3mm	NO.	PCM Murni 6mm	NO.	PCM Murni 9mm
900	62.925			590	44.525	591	43
915	63.225			600	44.625	600	43.075
930	63.575			610	44.75	610	43.25
945	63.9			620	44.825	620	43.25
960	64.2			630	44.925	630	43.35
975	64.475			640	45	640	43.475
990	64.8			650	45.125	650	43.575
1005	65.15			660	45.25	660	43.675
1020	65.525			670	45.35	670	43.75
1035	65.85			680	45.45	680	43.85
1050	66.2			690	45.525	690	43.925
1065	66.575			700	45.625	700	44.075
1080	66.9			710	45.725	710	44.15
1095	67.275			720	45.825	720	44.275
1110	67.65			730	45.925	730	44.35
1125	67.95			740	46	740	44.45
1140	68.3			750	46.1	750	44.575
1155	68.7			760	46.175	760	44.675
1170	69.05			770	46.275	770	44.775
1185	69.5			780	46.35	780	44.875
1200	69.5			790	46.425	790	45
				800	46.55	800	45.15
				810	46.675	810	45.25
				820	46.8	820	45.35
				830	46.9	830	45.475
				840	47.025	840	45.6
				850	47.125	850	45.675
				860	47.2	860	45.8
				870	47.35	870	45.85
				880	47.625	880	46
				890	48.325	890	46.15
				900	48.4	900	46.275
				910	48.475	910	46.375
				920	48.5	920	46.5
				930	48.55	930	46.6
				940	48.625	940	46.725
				950	48.65	950	46.875
				960	48.75	960	47.025
				970	48.775	970	47.15
				981	48.85	981	47.25
				990	48.9	990	47.325
				1000	48.975	1000	47.475
				1010	49	1010	47.55

Waktu (s)	Natural Convection	NO.	PCM Murni 3mm	NO.	PCM Murni 6mm	NO.	PCM Murni 9mm
				1020	49.1	1020	47.725
				1030	49.175	1031	47.85
				1040	49.225	1040	47.95
				1050	49.3	1050	48.1
				1060	49.375	1060	48.25
				1070	49.425	1070	48.375
				1080	49.525	1080	48.475
				1090	49.575	1090	48.85
				1100	49.65	1100	49
				1110	49.725	1110	49.1
				1120	49.825	1120	49.225
				1130	49.875	1130	49.375
				1140	49.975	1140	49.5
				1150	50.05	1150	49.675
				1160	50.15	1160	49.85
				1170	50.25	1170	49.975
				1180	50.325	1180	50.1
				1190	50.425	1190	50.2
				1200	50.5	1200	50.275

(b) Data Temperatur PCM Komposit

Waktu	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
10	31.675	31.275	31.8	31.125	32	31.075
20	31.85	31.475	31.95	31.2	32.375	31.125
30	32.05	31.75	32.375	31.4	32.7	31.25
40	32.275	32	32.625	31.625	32.975	31.475
50	32.525	32.275	32.9	31.875	33.2	31.7
60	32.775	32.575	33.15	32.125	33.475	31.925
70	33.075	32.85	33.375	32.45	33.675	32.2
80	33.375	33.15	33.6	32.675	33.95	32.425
90	33.7	33.525	33.9	32.95	34.2	32.675
100	34	33.825	34.15	33.225	34.375	32.9
110	34.225	34.1	34.45	33.475	34.625	33.15
120	34.525	34.4	34.7	33.75	34.825	33.375
130	34.85	34.75	35.2	34.025	35.075	33.625
140	35.2	35.1	35.475	34.275	35.325	33.85
150	35.475	35.425	35.775	34.575	35.55	34.1
160	35.775	35.725	36.075	34.85	35.75	34.3
170	36.05	35.975	36.325	35.1	35.95	34.55
180	36.3	36.275	36.525	35.375	36.1	34.675

Waktu	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
190	36.55	36.575	36.775	35.6	36.35	35
200	36.8	36.825	37.025	35.875	36.575	35.2
210	37.025	37.1	37.225	36.05	36.775	35.45
220	37.275	37.375	37.425	36.3	36.875	35.575
230	37.525	37.575	37.675	36.6	37.15	35.875
240	37.675	37.825	37.875	36.85	37.275	35.975
250	37.9	38.075	38.075	37.075	37.5	36.275
260	38.05	38.25	38.325	37.25	37.625	36.375
270	38.2	38.475	38.575	37.55	37.8	36.575
280	38.375	38.675	38.825	37.75	37.975	36.8
290	38.575	38.875	39.05	37.95	38.15	36.975
300	38.775	39.05	39.275	38.1	38.3	37.15
310	38.95	39.225	39.5	38.375	38.45	37.325
320	39.1	39.4	39.7	38.5	38.625	37.475
330	39.3	39.525	39.875	38.725	38.75	37.675
340	39.5	39.7	40.075	38.9	38.95	37.825
350	39.6	39.85	40.2	39.05	39.05	37.975
360	39.675	39.975	40.375	39.25	39.225	38.15
370	39.825	40.175	40.5	39.4	39.375	38.325
380	40.025	40.275	40.7	39.6	39.5	38.45
390	40.2	40.375	40.825	39.75	39.675	38.625
400	40.325	40.45	40.975	39.95	39.8	38.725
410	40.45	40.55	41.1	40.1	39.925	38.9
420	40.55	40.65	41.275	40.275	40.075	39.025
430	40.65	40.75	41.4	40.4	40.225	39.175
440	40.8	40.875	41.55	40.6	40.35	39.325
450	40.95	40.975	41.65	40.75	40.4	39.4
460	41.125	41.075	41.775	40.925	40.6	39.575
470	41.275	41.125	41.9	41.05	40.7	39.725
480	41.4	41.225	42.05	41.225	40.8	39.8
490	41.55	41.325	42.05	41.225	40.8	39.8
500	41.725	41.35	42.275	41.5	41.025	40.05
510	41.725	41.55	42.4	41.675	41.175	40.15
520	41.975	41.65	42.5	41.85	41.3	40.25
530	42.125	41.775	42.65	41.95	41.425	40.4
540	42.225	41.9	42.725	42.075	41.55	40.525
550	42.4	42	42.9	42.25	41.675	40.65
560	42.5	42.1	42.95	42.325	41.8	40.75
570	42.675	42.225	43.125	42.575	41.925	40.875
580	42.725	42.35	43.175	42.625	42.05	41
590	42.825	42.5	43.35	42.825	42.15	41.1
600	43	42.6	43.45	42.975	42.275	41.225
610	43.125	42.725	43.475	43.025	42.4	41.325
620	43.225	42.825	43.675	43.25	42.525	41.45

Waktu	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
630	43.275	42.95	43.725	43.3	42.625	41.55
640	43.4	43.025	43.85	43.525	42.75	41.65
650	43.6	43.15	43.95	43.575	42.9	41.75
660	43.7	43.275	44.05	43.725	42.975	41.85
670	43.9	43.4	44.225	43.875	43.1	41.95
680	44	43.525	44.3	44	43.2	42.05
690	44.175	43.65	44.35	44.05	43.25	42.075
700	44.275	43.75	44.475	44.2	43.425	42.225
710	44.475	43.85	44.6	44.325	43.55	42.325
720	44.6	43.95	44.65	44.425	43.675	42.4
730	44.75	44.075	44.8	44.55	43.7	42.425
740	44.9	44.175	44.875	44.65	43.825	42.525
750	45.05	44.3	44.975	44.775	44	42.7
760	45.2	44.375	45.075	44.85	44.05	42.725
770	45.425	44.525	45.175	44.95	44.175	42.8
780	45.6	44.625	45.25	45.05	44.25	42.9
790	45.8	44.725	45.35	45.2	44.4	43
800	45.9	44.825	45.475	45.25	44.525	43.075
810	46.1	44.95	45.5	45.35	44.725	43.225
820	46.3	45.05	45.575	45.4	44.775	43.275
830	46.475	45.175	45.675	45.5	44.9	43.375
840	46.65	45.25	45.775	45.625	45	43.475
850	46.825	45.375	45.875	45.75	45.125	43.575
860	47	45.5	46	45.85	45.25	43.65
870	47.2	45.625	46.075	45.95	45.4	43.75
880	47.35	45.725	46.2	46.05	45.525	43.825
890	47.475	45.875	46.275	46.175	45.65	43.9
900	47.65	45.95	46.375	46.3	45.8	44.1
910	47.85	46.1	46.475	46.4	45.875	44.1
920	48.075	46.175	46.575	46.525	46	44.225
930	48.15	46.325	46.6	46.575	46.125	44.35
940	48.225	46.425	46.725	46.7	46.25	44.425
950	48.375	46.6	46.85	46.8	46.375	44.55
960	48.575	46.675	46.95	46.9	46.5	44.65
970	48.75	46.8	47.1	47.1	46.625	44.75
980	48.925	46.9	47.225	47.225	46.625	44.75
990	49.1	47	47.225	47.225	46.9	44.975
1000	49.175	47.2	47.45	47.475	47.05	45.075
1010	49.325	47.3	47.525	47.525	47.175	45.175
1020	49.45	47.35	47.625	47.675	47.325	45.3
1030	49.6	47.45	47.775	47.8	47.45	45.45
1040	49.75	47.525	47.9	47.95	47.575	45.525
1050	49.925	47.575	47.975	48.025	47.725	45.65
1060	50.05	47.65	48.05	48.125	47.825	45.8

Waktu	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
1070	50.175	47.75	48.125	48.2	47.975	45.925
1080	50.3	47.85	48.25	48.325	48.1	46.075
1090	50.45	47.975	48.375	48.45	48.225	46.175
1100	50.6	48.1	48.5	48.575	48.375	46.275
1110	50.725	48.275	48.625	48.7	48.475	46.45
1120	50.85	48.4	48.725	48.8	48.625	46.575
1130	51.05	48.6	48.85	48.925	48.65	46.65
1140	51.2	48.775	49.025	49.1	48.775	46.775
1150	51.35	48.975	49.1	49.15	48.925	46.925
1160	51.375	49.15	49.225	49.275	49.025	46.975
1170	51.575	49.35	49.375	49.4	49.225	47.05
1180	51.675	49.45	49.55	49.6	49.325	47.075
1190	51.75	49.625	49.625	49.675	49.325	47.075
1200	51.875	49.775	49.775	49.725	49.325	47.075

Lampiran 8. Data Temperatur pada 4C

(a) Data Temperatur *Natural Convection* dan PCM Murni

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3 mm	Waktu (s)	PCM Murni 6 mm	PCM Murni 9 mm
15	31.7	25	31.3333333	10	32.3666667	30.8333333
30	32.675	50	32.4	20	32.9	31.3666667
45	34.05	75	33.6666667	30	33.45	31.9
60	35.55	100	35	40	34	32.5
75	36.975	125	36.4	50	34.55	33.1
90	38.55	150	37.6666667	60	35.1	33.6666667
105	40.075	175	38.9	70	35.7	34.3
120	41.525	200	40.0666667	80	36.25	34.9
135	42.95	225	41.2666667	90	36.8	35.4333333
150	44.325	250	41.9666667	100	37.3	36
165	44.825	275	43	110	37.8	36.5666667
180	45.75	300	44.0666667	120	38.35	37.0666667
195	47.125	325	45.1333333	130	38.8	37.5333333
210	48.45	350	46.2333333	140	39.25	38
225	49.7	375	47.3333333	150	39.7	38.4666667
240	50.925	400	48.3333333	160	40.1	38.9
255	52.125	425	49.7666667	170	40.55	39.3333333
270	53.225	450	50.2333333	180	41	39.7666667
285	54.35	475	52.2	190	41.35	40.1333333
300	55.425	500	52.8333333	200	41.75	40.5
315	56.475	525	52.8666667	210	42.15	40.8666667
330	57.475	550	53.3333333	220	42.5	41.2666667

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3 mm	Waktu (s)	PCM Murni 6 mm	PCM Murni 9 mm
345	58.475	575	57.1	230	42.85	41.7333333
360	59.4	600	58.7666667	240	43.2	42.1666667
375	60.4	625	58.0666667	250	43.5	42.5333333
390	61.325	650	53.0333333	260	43.85	42.9666667
405	61.825	675	51.8333333	270	44.15	43.3666667
420	62.2	700	57.5333333	290	44.4	43.6333333
435	62.975	725	59.8666667	300	44.7	43.9666667
450	63.875	750	59.6666667	310	45	44.3
465	64.7	775	59.7333333	320	45.3	44.6333333
480	65.475	800	59.8666667	330	45.5	45
495	66.175	825	60.2333333	340	45.8	45.2
510	66.9	850	61.1666667	350	46.05	45.5333333
525	67.6			360	46.25	45.8
540	68.3			370	46.5	46.1
555	68.95			380	46.65	46.4333333
570	69.575			390	46.9	46.6666667
585	70.25			400	47.1	47
600	70.825			410	47.3	47.2
615	71.45			420	47.45	47.3666667
630	72.025			430	47.7	47.6666667
645	72.6			440	47.8	47.7666667
660	73.25			450	47.95	48
675	73.775			460	48.15	48.1666667
690	74.35			470	48.3	48.3333333
705	74.975			480	48.4	48.5
720	75.55			491	48.65	48.6333333
750	76.175			500	48.95	48.9333333
765	76.675			510	49.2	49.1
780	76.8			520	49.4	49.2666667
795	78.025			530	49.5	49.3666667
810	78.65			540	49.75	49.5333333
825	79.275			550	49.85	49.6666667
840	79.9			560	50	49.8
855	80.525			570	50.15	50
				580	50.4	50.1
				590	50.6	50.2333333
				600	50.85	50.3666667
				610	51.15	50.4333333
				620	51.35	50.6
				630	51.85	50.7666667
				640	52.3	50.9

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 3 mm	Waktu (s)	PCM Murni 6 mm	PCM Murni 9 mm
				650	52.85	50.9666667
				660	53.2	51.0666667
				670	53.65	51.2
				680	54.15	51.3
				690	54.4	51.3333333
				700	54.75	51.4333333
				710	54.95	51.6
				720	55.2	51.6666667
				730	55.55	51.7
				740	55.75	51.7666667
				750	56.05	52.1333333
				760	56.45	52.4
				770	57	52.5333333
				780	57.55	52.7333333
				790	58.1	52.9333333
				800	58.5	53.1333333
				810	58.9	53.5
				820	59.1	54.1

(b) Data Temperatur PCM Komposit

Waktu (s)	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
10	31.56667	31.73333	31.63333	31.73333	31.45	32
20	31.8	32	31.86667	31.975	31.725	32.25
30	32.2	32.4	32.16667	32.325	32.075	32.575
40	32.63333	32.83333	32.53333	32.75	32.5	32.95
50	33.16667	33.26667	32.96667	33.125	32.95	33.375
60	33.7	33.66667	33.43333	33.65	33.425	33.8
70	34.23333	34.16667	33.8	34	33.775	34.125
80	34.76667	34.63333	34.2	34.45	34.275	34.625
90	35.4	35.13333	34.66667	34.85	34.775	35
100	35.96667	35.6	35.16667	35.375	35.2	35.45
110	36.5	36.06667	35.46667	35.75	35.675	35.9
120	37.06667	36.56667	35.9	36.15	36.125	36.275
130	37.56667	37	36.3	36.55	36.55	36.725
140	38.06667	37.43333	36.7	36.925	36.975	37.075
150	38.53333	37.83333	37.1	37.325	37.375	37.475
160	39	38.16667	37.46667	37.65	37.75	37.825
170	39.36667	38.5	37.76667	38.025	38.15	38.175
180	39.73333	38.7	38.16667	38.375	38.55	38.525
190	40.1	39.06667	38.5	38.65	38.9	38.825

Waktu (s)	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
200	40.53333	39.4	38.83333	39	39.25	39.2
210	40.86667	39.76667	39.13333	39.3	39.625	39.5
220	41.23333	39.96667	39.43333	39.6	39.95	39.825
230	41.56667	40.23333	39.76667	39.925	40.275	40.15
240	41.9	40.63333	40.06667	40.2	40.575	40.4
250	42.23333	40.96667	40.4	40.45	40.9	40.7
260	42.53333	41.26667	40.66667	40.75	41.225	40.975
270	42.9	41.56667	40.96667	41	41.475	41.175
280	43.3	41.73333	41.23333	41.3	41.8	41.45
290	43.8	41.9	41.5	41.575	42.025	41.625
300	44.13333	42.1	41.73333	41.8	42.25	41.85
310	44.53333	42.4	42.06667	42.1	42.35	41.95
320	44.93333	42.7	42.36667	42.4	42.5	42.075
330	45.23333	42.93333	42.63333	42.625	42.725	42.25
340	45.63333	43.16667	42.9	42.875	42.95	42.475
350	46	43.53333	43.1	43.075	43.15	42.675
360	46.43333	43.63333	43.4	43.425	43.4	42.9
370	46.76667	43.8	43.66667	43.7	43.6	43.05
380	47.2	44.03333	43.93333	43.95	43.775	43.275
390	47.56667	44.26667	44.16667	44.125	43.875	43.325
400	47.93333	44.43333	44.43333	44.4	43.95	43.575
410	48.3	44.56667	44.66667	44.65	44.175	43.775
420	48.63333	44.7	44.93333	44.925	44.45	43.975
430	48.96667	44.76667	45.2	45.2	44.775	44.125
440	49.3	44.9	45.4	45.5	45.05	44.325
450	49.56667	45.06667	45.63333	45.8	45.3	44.525
460	49.83333	45.3	45.9	46.075	45.475	44.675
470	49.96667	45.4	46.13333	46.35	45.8	44.925
480	50.36667	45.56667	46.36667	46.625	46.025	45.1
500	51.16667	45.86667	46.86667	47.1	46.2	45.225
510	51.5	46.16667	47.1	47.325	46.675	45.625
520	51.63333	46.43333	47.36667	47.55	46.775	45.7
530	51.8	46.76667	47.56667	47.775	47.025	45.975
540	51.93333	46.93333	47.9	47.975	47.15	46.075
550	51.96667	47.2	48.06667	48.2	47.375	46.3
560	52.06667	47.53333	48.33333	48.375	47.5	46.4
570	51.86667	47.7	48.53333	48.625	47.675	46.575
580	51.9	48.13333	48.8	48.85	47.825	46.725
590	51.86667	48.36667	49	49.05	47.975	46.875
600	51.86667	48.56667	49.23333	49.25	48.125	47.05
610	51.83333	48.73333	49.43333	49.45	48.275	47.2
620	51.86667	48.63333	49.63333	49.675	48.45	47.35

Waktu (s)	3mm		6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4	0.35	0.4
630	51.86667	48.73333	49.86667	49.85	48.6	47.55
640	51.9	48.93333	50.06667	50.075	48.725	47.7
650	51.96667	49.1	50.3	50.25	48.875	47.875
660	51.96667	49.26667	50.5	50.45	49.075	48.05
670	52.2	49.43333	50.7	50.625	49.225	48.25
680	52.3	49.6	50.86667	50.85	49.4	48.425
690	52.43333	49.7	51.1	51	49.575	48.55
700	52.5	49.8	51.26667	51.175	49.825	48.7
710	52.6	50	51.46667	51.325	50.05	48.85
720	52.7	50.46667	51.66667	51.5	50.325	49.075
730	52.66667	50.93333	51.83333	51.65	50.525	49.2
740	52.8	51.16667	52	51.8	50.7	49.35
750	52.9	51.43333	52.2	51.925	50.85	49.45
760	53	51.7	52.36667	52.15	51.075	49.7
770	53.1	51.86667	52.53333	52.275	51.225	49.875
780	53.16667	52.13333	52.7	52.4	51.45	50.05
790	53.26667	52.3	52.9	52.5	51.6	50.25
800	53.33333	52.56667	53.1	52.575	51.675	50.525
810	53.46667	52.76667	53.23333	52.575	51.9	51.025
820	53.53333	53	53.4	52.45	52.1	51.3
830	53.6	53.16667			52.375	51.65
840					52.4	52
850					52.375	52.25

Lampiran 9. Data Temperatur pada 5C

(a) Data Temperatur *Natural Convection* dan PCM Murni

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 6 mm	PCM Murni 9mm
15	31.425	10	31.625	30.0666667
30	32.925	20	32.075	30.6666667
45	34.95	30	32.65	31.4666667
60	37.325	40	33.325	32.3333333
75	39.65	50	34.05	33.2333333
90	41.9	60	34.75	34.1
105	44.2	70	35.45	34.9333333
120	46.5	80	36.175	35.7666667
135	48.65	90	36.95	36.7
150	50.85	100	37.525	37.4
165	52.9	110	38.3	38.1333333

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 6 mm	PCM Murni 9mm
180	54.825	120	38.9	38.8
195	56.875	130	39.525	39.4
210	58.75	140	40.1	39.5
225	60.575	150	40.7	40.05
240	62.4	160	41.225	40.5
255	64.15	170	41.75	40.95
270	65.825	180	42.275	42.1
285	67.475	190	42.775	42.5333333
300	69.125	200	43.325	42.8666667
315	70.625	210	43.825	43.2333333
330	72.05	220	44.325	43.6
345	73.45	230	44.875	44.3
360	74.8	240	45.35	44.3666667
375	76.125	250	45.9	45.25
390	77.4	260	46.425	45.6
405	78.6	270	47.025	46.05
420	79.675	280	47.525	46.5
435	80.85	290	47.95	46.95
450	81.925	300	48.5	47.35
465	82.925	310	49	47.8
480	83.975	320	49.425	48.2
495	84.975	330	49.875	48.65
510	85.975	340	50.35	49.1
525	86.95	350	50.825	49.55
540	87.9	360	51.25	49.95
555	88.925	370	51.725	50.3
		380	52.125	50.65
		390	52.475	50.95
		400	52.8	51.2
		410	53.15	51.5
		420	53.45	51.75
		430	53.675	51.95
		440	53.85	52.15
		450	53.975	52.25
		460	54.25	52.55
		470	54.45	52.75
		480	54.625	53.15
		500	55	53.5
		510	55.2	53.65
		520	55.375	53.9
		530	55.55	54.1

Waktu (s)	Natural Convection	Waktu (s)	PCM Murni 6 mm	PCM Murni 9mm
		540	55.8	54.3
		550	56.025	

(b) Data Temperatur PCM Komposit

Waktu (s)	6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4
10	31.7	31.575	31.1	31.85
20	32.075	31.9	31.46667	32.125
30	32.575	32.35	31.96667	32.55
40	33.2	32.9	32.53333	33.05
50	33.825	33.5	33.16667	33.55
60	34.475	34.025	33.76667	34.05
70	35.125	34.7	34.46667	34.625
80	35.8	35.2	35.03333	35.15
90	36.525	35.8	35.63333	35.75
100	37.15	36.425	36.3	36.25
110	37.775	37	36.86667	36.775
120	38.4	37.45	37.36667	37.325
130	39.05	37.95	37.86667	37.775
140	39.7	38.425	38.36667	38.25
150	40.325	38.9	38.9	38.775
160	40.85	39.375	39.33333	39.15
170	41.425	39.85	39.83333	39.55
180	42.075	40.3	40.23333	39.9
190	42.625	40.75	40.7	40.225
200	43.075	41.175	41.13333	40.55
210	43.6	41.625	41.6	40.875
220	44.025	42.075	42.06667	41.175
230	44.45	42.525	42.53333	41.5
240	44.775	43	42.96667	41.85
250	45.125	43.425	43.4	42.225
260	45.425	43.825	43.8	42.65
270	45.725	44.35	44.3	43.2
280	46	44.8	44.63333	43.73333
290	46.275	45.225	45	44.23333
300	46.525	45.75	45.46667	44.6
310	46.75	46.2	45.76667	45
320	47.76667	46.65	46.13333	45.26667
330	48.13333	47.075	46.46667	45.53333
340	48.46667	47.525	46.86667	45.8

Waktu (s)	6mm		9mm	
	0.35	0.4	0.35	0.4
350	48.8	47.95	47.2	46.06667
360	50.55	48.35	47.46667	46.3
370	51.05	48.75	47.8	46.56667
380	51.6	49.125	48.13333	46.8
390	52.05	49.525	48.43333	47.06667
400	52.5	49.85	48.8	47.3
410	52.9	50.2	49.1	47.53333
420	53.25	50.55	49.46667	47.73333
430	53.55	50.925	49.86667	47.93333
440	53.8	51.3	50.2	48.1
450	54	51.725	50.5	48.2
460	54.25	52.025	50.83333	48.43333
470	54.55	52.25	51.03333	48.53333
480	54.7	52.5	51.33333	49.1
490	54.65	53.175	52.03333	49.83333
500	54.8	53.45	52.43333	50.4
510	54.95	53.825	52.73333	51
520	55.15	53.95	52.9	51.7
530				52.36667
540				52.56667

Lampiran 10. Data *Heat Generation* pada Baterai

(a) *Heat Generation* pada *Discharging Rate* 1C

Time(S)	Cur(A)	Vol(V)	OCV	Heat Generation Rate
0	0	4.181	4.181	0
100	3	3.9	4.181	0.843
200	3	3.879	4.181	0.906
300	3	3.865	4.181	0.948
400	3	3.852	4.181	0.987
500	3	3.838	4.181	1.029
600	3	3.819	4.181	1.086
700	3	3.796	4.181	1.155
800	3	3.769	4.181	1.236
900	3	3.741	4.181	1.32
1000	3	3.714	4.181	1.401
1100	3	3.689	4.181	1.476
1200	3	3.664	4.181	1.551
1300	3	3.642	4.181	1.617

Time(S)	Cur(A)	Vol(V)	OCV	Heat Generation Rate
1400	3	3.619	4.181	1.686
1500	3	3.594	4.181	1.761
1600	3	3.568	4.181	1.839
1700	3	3.54	4.181	1.923
1800	3	3.511	4.181	2.01
1900	3	3.484	4.181	2.091
2000	3	3.459	4.181	2.166
2100	3	3.434	4.181	2.241
2200	3	3.414	4.181	2.301
2300	3	3.394	4.181	2.361
2400	3	3.373	4.181	2.424
2500	3	3.358	4.181	2.469
2600	3	3.339	4.181	2.526
2700	3	3.321	4.181	2.58
2800	3	3.299	4.181	2.646
2900	3	3.272	4.181	2.727
3000	3	3.242	4.181	2.817
3010	3	3.241	4.181	2.82
3100	3	3.207	4.181	2.922
3200	3	3.157	4.181	3.072
3300	3	3.078	4.181	3.309
3400	3	2.972	4.181	3.627
3500	3	2.837	4.181	4.032
3600	3	2.529	4.181	4.956

(b) Heat Generation pada Discharging Rate 2C

Time(S)	Cur(A)	Vol(V)	OCV	Heat Generation Rate
0	0	4.188	4.188	0
100	6	3.711	4.188	2.862
200	6	3.68	4.188	3.048
300	6	3.649	4.188	3.234
400	6	3.605	4.188	3.498
500	6	3.555	4.188	3.798
600	6	3.504	4.188	4.104
700	6	3.454	4.188	4.404
800	6	3.401	4.188	4.722
900	6	3.346	4.188	5.052
1000	6	3.293	4.188	5.37
1010	6	3.288	4.188	5.4
1100	6	3.247	4.188	5.646

Time(S)	Cur(A)	Vol(V)	OCV	Heat Generation Rate
1200	6	3.206	4.188	5.892
1300	6	3.165	4.188	6.138
1400	6	3.118	4.188	6.42
1500	6	3.06	4.188	6.768
1600	6	2.969	4.188	7.314
1700	6	2.818	4.188	8.22
1800	6	2.564	4.188	9.744

(c) *Heat Generation pada Discharging Rate 3C*

Time(S)	Cur(A)	Vol(V)	OCV	Heat Generation Rate
0	0	4.137	4.137	0
100	9	3.503	4.137	5.706
200	9	3.459	4.137	6.102
300	9	3.399	4.137	6.642
400	9	3.332	4.137	7.245
500	9	3.259	4.137	7.902
600	9	3.181	4.137	8.604
700	9	3.11	4.137	9.243
800	9	3.051	4.137	9.774
900	9	2.987	4.137	10.35
1000	9	2.906	4.137	11.079
1100	9	2.737	4.137	12.6

(d) *Heat Generation pada Discharging Rate 4C*

Time(S)	Cur(A)	Vol(V)	OCV	Heat Generation Rate
0	0	4.173	4.173	0
100	12	3.302	4.173	10.452
200	12	3.199	4.173	11.688
300	12	3.083	4.173	13.08
400	12	2.966	4.173	14.484
500	12	2.862	4.173	15.732
600	12	2.764	4.173	16.908
700	12	2.665	4.173	18.096

(e) *Heat Generation pada Discharging Rate 5C*

Time(S)	Cur(A)	Vol(V)	OCV	Heat Generation Rate
0	0	4.166	4.166	0
100	15	3.117	4.166	15.735
200	15	2.966	4.166	18
300	15	2.834	4.166	19.98
400	15	2.717	4.166	21.735
500	15	2.597	4.166	23.535

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Surabaya pada tanggal 17 Oktober 2002. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, anak dari pasangan suami istri Hermin Hartutik dan Nurhadi Adnan. Penulis telah menempuh pendidikan formal, yaitu di SDIT Al-Uswah Tuban (2008-2014), kemudian dilanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 1 Tuban (2014-2017), dan dilanjutkan untuk pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Tuban (2017-2020). Setelah menyelesaikan pendidikan di jenjang SMA, penulis melanjutkan pendidikan ke tahap perguruan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dan mengambil program studi Teknik Mesin pada tahun 2020. Penulis mengambil Bidang Studi Konversi Energi di Laboratorium Rekayasa Termal dan Sistem Energi. Selama berkuliah 4 tahun di ITS, selain fokus pada kegiatan akademik,

penulis juga aktif dalam kegiatan non akademik seperti organisasi dan kepanitiaan. Pada tahun keempat, penulis berkesempatan untuk melakukan kerja praktik di Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas PPSDM Migas di Cepu, Blora selama satu bulan. Penulis sangat terbuka terhadap kritik dan saran terkait penelitian ini, maupun hal di luar penelitian. Apabila terdapat saran dan masukan, penulis dapat dihubungi melalui *email* daffanur157@gmail.com