

**TUGAS AKHIR - TM234802**

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGAPLIKASIAN  
VARIASI MATERIAL *FILLER* DAN NILAI KETEBALAN  
PADA *PHASE CHANGE MATERIAL* KOMPOSIT DENGAN  
RASIO 0.3 TERHADAP PENINGKATAN TEMPERATUR  
PADA PERMUKAAN BATERAI *LITHIUM-ION* SELAMA  
PROSES *DISCHARGING***

**MICHAEL JP SIREGAR**

**NRP 5007201239**

**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 PENGAPLIKASIAN  
VARIASI MATERIAL *FILLER* DAN NILAI KETEBALAN  
PADA *PHASE CHANGE MATERIAL* KOMPOSIT DENGAN  
RASIO 0.3 TERHADAP PENINGKATAN TEMPERATUR  
PADA PERMUKAAN BATERAI *LITHIUM ION* SELAMA  
PROSES *DISCHARGING***

**MICHAEL JP SIREGAR**

NRP 5007201239

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 ON THE EFFECT OF APPLICATION OF MATERIAL FILLER AND VALUE OF THICKNESS VARIATIONS ON A COMPOSITE PHASE CHANGE MATERIAL WITH RATIO OF 0.3 TO THE INCREASED TEMPERATURE ON THE SURFACE OF THE LITHIUM ION BATTERY DURING THE DISCHARGING PROCESS**

**MICHAEL JP SIREGAR**

NRP 5007201239

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 PENGAPLIKASIAN VARIASI MATERIAL *FILLER* DAN NILAI KETEBALAN PADA *PHASE CHANGE MATERIAL* KOMPOSIT DENGAN RASIO 0.3 TERHADAP PENINGKATAN TEMPERATUR PADA PERMUKAAN BATERAI *LITHIUM ION* SELAMA PROSES *DISCHARGING*

#### TUGAS AKHIR

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

Oleh : **MICHAEL JP SIREGAR**  
NRP. 5007201239

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal 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 I
3. Dr. Ir. Atok Setiyawan, MEng.Sc, IPU, AEng Penguji II
4. Tri Vicca Kusumadewi, S.T., MSc Penguji III



**SURABAYA**  
**Juli, 2024**

## APPROVAL SHEET

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF APPLICATION OF MATERIAL FILLER AND VALUE OF THICKNESS VARIATIONS ON A COMPOSITE PHASE CHANGE MATERIAL WITH RATIO OF 0.3 TO THE INCREASED TEMPERATURE ON THE SURFACE OF THE LITHIUM ION BATTERY DURING THE DISCHARGING PROCESS**

### FINAL PROJECT PROPOSAL

Submitted to fulfill one of the requirements  
for obtaining a degree of Bachelor of Enngineering at  
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering  
Departement of Mechanical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **MICHAEL JP SIREGAR**  
NRP. 5007201239

Approved by Final Project Proposal Examiner 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, Eng  Examiner I
3. Dr. Ir. Atok Setiyawan, MEng.Sc, IPU, AEng  Examiner II
4. Tri Vicca Kusumadewi, S.T., MSc  Examiner III



**SURABAYA**  
**July, 2024**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama mahasiswa / NRP : Michael JP Siregar / 5007201239  
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 PENGAPLIKASIAN VARIASI MATERIAL *FILLER* DAN NILAI KETEBALAN PADA *PHASE CHANGE MATERIAL* KOMPOSIT DENGAN RASIO 0.3 TERHADAP PENINGKATAN TEMPERATUR PADA PERMUKAAN BATERAI *LITHIUM ION* SELAMA 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, 31 Juli 2024

Mengetahui  
Dosen Pembimbing



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

Mahasiswa

Michael JP Siregar  
NRP. 5007201239

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below :

Name of student / NRP : Michael JP Siregar / 5007201239  
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 ON THE EFFECT OF APPLICATION OF MATERIAL FILLER AND VALUE OF THICKNESS VARIATIONS ON A COMPOSITE PHASE CHANGE MATERIAL WITH RATIO OF 0.3 TO THE INCREASED TEMPERATURE ON THE SURFACE OF THE LITHIUM ION BATTERY DURING THE 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, 31<sup>st</sup> July 2024

Acknowledged



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

Student

Michael JP Siregar  
NRP. 5007201239

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGAPLIKASIAN VARIASI MATERIAL  
FILLER DAN NILAI KETEBALAN PADA *PHASE CHANGE MATERIAL*  
KOMPOSIT DENGAN RASIO 0.3 TERHADAP PENINGKATAN TEMPERATUR  
PADA PERMUKAAN BATERAI *LITHIUM ION* SELAMA PROSES *DISCHARGING***

Nama Mahasiswa / NRP : Michael JP Siregar / 5007201239  
Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng

**ABSTRAK**

Pengoperasian baterai *lithium ion* memerlukan pemeliharaan suhu yang tepat, idealnya antara 30°C - 50°C. Suhu operasional ini penting untuk memastikan efisiensi, kapasitas, dan umur baterai yang panjang. Namun, baterai *lithium ion* memiliki kelemahan yaitu sensitif terhadap panas. Suhu yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan internal dan berpotensi memicu *thermal runaway*. *Thermal runaway* merupakan fenomena di mana peningkatan suhu yang berlebihan dapat berujung pada kegagalan baterai. Karena itu, pengembangan sistem manajemen termal baterai yang efektif menjadi sangat penting. Penggunaan PCM sebagai metode pendinginan baterai muncul sebagai suatu solusi. PCM dapat menyimpan dan melepaskan energi panas saat mengalami perubahan fase (kalor laten), membuatnya ideal untuk manajemen termal baterai. Namun, PCM juga mempunyai kelemahan, yaitu konduktivitas termal yang rendah. Untuk mengatasi kelemahan ini, diperlukan penambahan material *filler* berkonduktivitas tinggi seperti serbuk silika, aluminium, grafit, dan tembaga untuk meningkatkan performa termal PCM. Pada penelitian tugas akhir ini dilakukan variasi penambahan material *filler* dan variasi ketebalan PCM dengan perbandingan komposisi *paraffin wax* dengan material *filler* sebesar 0,3. Variasi material *filler* terdiri dari empat material yang berbeda yaitu serbuk grafit, aluminium, silika, dan tembaga. Variasi ketebalan PCM terdiri dari 3 mm, 6 mm, dan 9 mm. Pengujian akan dilakukan secara *discharging* dengan 3 tingkat *C-rate*, yaitu 1C, 2C, dan 3C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pendinginan PCM, baik murni maupun komposit, efektif dalam menjaga temperatur permukaan baterai. Terjadi penurunan temperatur maksimal rata-rata sebesar 14.17 % pada sistem PCM material *filler* silika dan 12.68 % pada PCM murni terhadap sistem *natural convection*. PCM komposit dengan material *filler* grafit menunjukkan performa pendinginan terbaik diikuti oleh aluminium, tembaga, dan silika. Performa PCM komposit berbanding lurus dengan konduktivitas PCM komposit nya, sehingga menghasilkan *thermal diffusivity* yang lebih tinggi, dan memungkinkan transfer panas dari modul baterai yang lebih cepat. PCM material *filler* grafit mengalami penurunan temperatur maksimal rata - rata sebesar 2.7 % terhadap material *filler* aluminium, 5.64 % terhadap material *filler* tembaga dan 9 % terhadap material *filler* silika. Semakin tebal PCM komposit, maka peningkatan temperatur pada permukaan baterai juga semakin rendah. 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. PCM ketebalan 9 mm menunjukkan performa terbaik dalam menurunkan peningkatan temperatur, diikuti oleh 6 mm, dan 3 mm. PCM ketebalan 9 mm mengalami penurunan temperatur maksimal rata-rata sebesar 1.11 % terhadap 6 mm dan 2.91 % terhadap 3 mm. Sistem pendinginan yang mempunyai performa yang terbaik untuk setiap *discharging rate* adalah PCM material *filler* grafit ketebalan 9 mm, dengan temperatur maksimal di 1C sebesar 35.75°C, di 2C sebesar 40.95°C, dan di 3C sebesar 45.45°C.

**Kata kunci : Material Filler, Lithium – ion, Phase Change Material**



# **EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF APPLICATION OF MATERIAL FILLER AND VALUE OF THICKNESS VARIATIONS ON A COMPOSITE PHASE CHANGE MATERIAL WITH RATIO OF 0.3 TO THE INCREASED TEMPERATURE ON THE SURFACE OF THE LITHIUM ION BATTERY DURING THE DISCHARGING PROCESS**

**Student Name / NRP** : Michael JP Siregar / 5007201239  
**Departement** : Teknik Mesin FTIRS - ITS  
**Advisor** : Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng

## **ABSTRACT**

The operation of lithium ion batteries requires maintaining in the proper temperatures, ideally between 30°C - 50°C. This operating temperature is important to ensure the efficiency, capacity, and long life of the battery. However, lithium ion batteries have the disadvantage that they are sensitive to heat. Excessive temperatures can cause internal damage and potentially trigger thermal runaway. Thermal runaway is a phenomenon where excessive temperature increases can lead to battery failure. Therefore, the development of an effective battery thermal management system is very important. The use of PCM as a battery cooling method appears as a solution. PCM can store and release heat energy when undergoing phase changes (latent heat), making it ideal for battery thermal management. However, PCM also has a weakness that they are low in thermal conductivity. To overcome this weakness, it is necessary to add high-conductivity filler materials such as silica, aluminum, graphite, and copper powders to improve the thermal performance of the PCM. In this final project research, variations in the addition of filler materials and variations in the thickness of the PCM were carried out with a ratio of paraffin wax composition to filler material of 0.3. The filler material variations consist of four different materials, which are graphite, aluminum, silica, and copper powders. The PCM thickness variations consist of 3 mm, 6 mm, and 9 mm. The test will be carried out by discharging with 3 levels of C-rate, which are 1C, 2C, and 3C. The research showed that the PCM cooling system, both pure and composite, is effective in maintaining the battery surface temperature. There was an average maximum temperature decrease of 14.17 % in the silica filler PCM system and 12.68 % in the pure PCM against the natural convection system. Composite PCM with graphite filler material showed the best cooling performance followed by aluminum, copper, and silica. The performance of the composite PCM is directly proportional to the conductivity of the composite PCM, resulting in higher thermal diffusivity, and allowing faster heat transfer from the battery module. The graphite filler PCM material experienced an average maximum temperature decrease of 2.7 % against the aluminum filler material, 5.64 % against the copper filler material and 9 % against the silica filler material. The thicker the composite PCM, the lower the temperature increase on the battery surface. This is in accordance with the theory that with a higher thickness can increase the mass of the PCM, so that it can reduce the rate of temperature change with constant sensible heat and specific heat values. PCM with a thickness of 9 mm showed the best performance in reducing the increase in temperature, followed by 6 mm, and 3 mm. PCM with a thickness of 9 mm experienced an average maximum temperature decrease of 1.11 % against 6 mm and 2.91 % against 3 mm. The cooling system that has the best performance for each discharging rate is PCM with a graphite filler material with a thickness of 9 mm, with a maximum temperature at 1C of 35.75°C, at 2C of 40.95°C, and at 3C of 45.45°C.

**Keywords** : Material Filler, Lithium – ion, *Phase Change Material*

## 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 PENGAPLIKASIAN VARIASI MATERIAL *FILLER* DAN NILAI KETEBALAN PADA *PHASE CHANGE MATERIAL* KOMPOSIT DENGAN RASIO 0.3 TERHADAP PENINGKATAN TEMPERATUR PADA PERMUKAAN BATERAI *LITHIUM ION* SELAMA 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. Ayah dan Ibu yang telah memberikan doa restu, bimbingan, semangat, inspirasi dan dukungan penuh selama penulis menempuh jenjang perkuliahan S-1.
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 Dr. Ir. Atok Setiyawan, Meng.Sc., 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 Bambang Pramujati, S.T., M.Sc.Eng, Ph.D. sebagai dosen wali penulis yang selalu memberikan motivasi dan mengarahkan penulis selama menempuh jenjang perkuliahan S1.
5. Seluruh anggota lab kompor yang telah menemani dan membantu penulis selama pengerjaan laporan tugas akhir.
6. Rekan mahasiswa seperjuangan bimbingan selaku patner kerja penulis selama penulisan laporan tugas akhir.
7. Keluarga LBMM dan Anargya ITS yang telah memberi ilmu, pengalaman dan dukungan penuh kepada penulis selama menempuh jenjang perkuliahan di ITS.
8. Teman-teman angkatan M63 yang telah menemani penulis dalam setiap kondisi selama menempuh pendidikan di Teknik Mesin ITS.
9. 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, 31 Juli 2024

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
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.....	xii
DAFTAR TABEL .....	xv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	4
2.1 <i>Lithium – Ion Battery</i> .....	4
2.1.1 Ciri Khas <i>Lithium Ion Battery</i> .....	5
2.1.2 Komponen Baterai <i>Lithium ion</i> .....	7
2.2 Manajemen <i>Thermal</i> dalam baterai .....	8
2.2.1 Pendinginan Baterai secara Aktif .....	9
2.2.2 Pendinginan Termolektrik.....	9
2.2.3 Pendinginan Berbasis Cairan ( <i>Liquid Cooling</i> ).....	10
2.2.4 Pendinginan Baterai secara Pasif.....	11
2.3 <i>Phase change material (PCM)</i> .....	11
2.3.1 <i>Organic PCM</i> .....	12
2.3.2 <i>Inorganic PCM</i> .....	12
2.3.3 Eutektik PCM .....	13
2.4 Material <i>Filler</i> .....	13
2.4.1 Grafit.....	14
2.4.2 Aluminium.....	14
2.4.3 <i>Silica Glass</i> .....	15
2.4.4 Tembaga .....	16
2.5 <i>Heat generation</i> Baterai <i>Lithium ion</i> .....	16
2.5.1 Perhitungan <i>Heat generation</i> Metode Persamaan Bernardi .....	17
2.6 Perpindahan Panas .....	18

2.6.1	Konduksi.....	18
2.6.2	Tahanan <i>Thermal</i> dan <i>Overall Heat transfer Coefficient</i> .....	19
2.6.3	Konveksi.....	22
2.6.4	Radiasi .....	24
2.7	<i>Thermal Conductivity</i> .....	24
2.8	Perhitungan Massa Jenis dan Karakteristik Termal PCM Komposit .....	25
2.9	<i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD).....	26
2.10	Penelitian Terdahulu .....	27
2.10.1	<i>Enhancement of Thermal Conductivity of PCM Using Filler Graphite Powder Materials</i> (Bharadwaj Reddy et al., 2018) .....	27
2.10.2	<i>Study on Thermal runaway Risk Prevention of Lithium ion Battery with Composite Phase Changed Materials</i> (K. Zhang et al., 2023).....	29
2.10.3	<i>A Copper Nanoparticle Enhanced Phase change material with High Thermal Conductivity and Latent Heat for Battery Thermal Management</i> (Ma et al., 2022).....	30
2.10.4	<i>Thermal management of a simulated battery with the compound use of phase change material and fins: Experimental and numerical investigations</i> (Zhiqiang Sun et al., 2021) .....	32
2.10.5	<i>Thermal Management System Using Phase change material for Lithium ion Battery</i> (Grimonia et al., 2021).....	33
2.10.6	<i>Experimental Study of a Passive Thermal Management System Using Expanded Graphite/Polyethylene Glycol Composite for Lithium ion Batteries</i> (Xia et al., 2023) .....	35
2.10.7	<i>Electrochemical thermal modelling and experimental measurements of 18650 cylindrical lithium ion battery during discharge cycle for an EV</i> (Panchal et al., 2018).....	36
BAB III METODOLOGI .....		37
3.1	Diagram alir penelitian .....	37
3.2	Studi Literatur .....	38
3.3	Perumusan Masalah .....	38
3.4	Pengumpulan Data.....	38
3.4.1	Data Spesifikasi Baterai <i>Lithium ion</i> .....	38
3.4.2	Data Spesifikasi <i>Phase Change Material</i> .....	38
3.4.3	Data Spesifikasi Serbuk Grafit .....	39
3.4.4	Data Spesifikasi Serbuk Aluminium .....	39
3.4.5	Data Spesifikasi Serbuk Silika .....	39
3.4.6	Data Spesifikasi Serbuk Tembaga.....	40
3.5	Persiapan Pengujian .....	40
3.5.1	Bahan dan Alat .....	40

3.5.2	Pembuatan Modul baterai .....	45
3.5.3	Perakitan Modul Baterai .....	51
3.6	<i>Set-Up</i> Pengujian .....	52
3.6.1	Skema Peralatan Pengujian .....	52
3.6.2	Prosedur Percobaan .....	53
3.7	Studi Numerik.....	57
3.7.1	<i>Pre processing</i> .....	57
3.7.2	<i>Processing</i> .....	60
3.7.3	<i>Post processing</i> .....	61
3.8	Analisa Data Hasil Percobaan .....	61
3.9	Penarikan Kesimpulan .....	62
3.10	Penutup .....	62
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....		63
4.1	Hasil Pengujian.....	63
4.1.1	Pengujian Baterai dengan Sistem <i>Natural convection</i> .....	63
4.1.2	Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Murni.....	63
4.1.3	Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Grafit .....	63
4.1.4	Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Aluminium .....	63
4.1.5	Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Silika.....	63
4.1.6	Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Tembaga .....	63
4.2	Pengaruh Penambahan PCM dan Material <i>Filler</i> terhadap Kenaikan <i>Temperature</i> Baterai.....	63
4.2.1	Analisa pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 1C dan Ketebalan PCM Komposit 3 mm .....	63
4.2.2	Analisa pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 3C dan Ketebalan PCM Komposit 9mm .....	66
4.3	Pengaruh Variasi Material <i>Filler</i> pada PCM Komposit terhadap Kenaikan <i>Temperature</i> Baterai .....	68
4.3.1	Analisa pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 3mm.....	69
4.3.2	Analisa pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 6mm.....	71
4.3.3	Analisa pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 9 mm.....	74
4.4	Pengaruh Variasi Ketebalan PCM Komposit terhadap Kenaikan <i>Temperature</i> Baterai .....	77
4.4.1	Analisa pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 1C .....	77
4.4.2	Analisa pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 2C .....	79
4.4.3	Analisa pada Baterai dengan <i>Discharging Rate</i> 3C .....	81
4.5	Pengaruh Variasi Ketebalan dan Material <i>Filler</i> pada PCM Komposit terhadap <i>Heat generation</i> Baterai .....	83

4.5.1	Analisa <i>Heat generation</i> pada Baterai dengan <i>Discharging Rate 3C</i> .....	83
4.5.2	Analisa <i>Heat generation</i> pada Baterai dengan <i>Discharging Rate 2C</i> .....	85
4.6	Studi Numerik CFD .....	86
4.6.1	Hasil Simulasi pada Modul Baterai dengan Sistem <i>Natural convection</i> pada <i>Discharging Rate 3C</i> .....	86
4.6.2	Perpindahan Panas pada Modul Baterai dengan Sistem PCM Murni Ketebalan 9 mm pada <i>Discharging Rate 3C</i> .....	88
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		91
5.1	Kesimpulan .....	91
5.2	Saran .....	92
DAFTAR PUSTAKA .....		93
LAMPIRAN .....		95
BIODATA PENULIS .....		155

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> <i>Lithium ion Cell</i> .....	4
<b>Gambar 2.2</b> Kandungan Kimia pada Baterai <i>Lithium ion</i> .....	6
<b>Gambar 2.3</b> Komponen <i>Prismatic</i> pada Baterai <i>Lithium ion</i> .....	7
<b>Gambar 2.4</b> Kandungan Kimia Baterai <i>Lithium ion</i> .....	8
<b>Gambar 2.5</b> Skema <i>Air Cooling</i> pada Baterai.....	9
<b>Gambar 2.6</b> Skema Termolektrik pada Baterai.....	10
<b>Gambar 2.7</b> Pelat dengan <i>Liquid Cooling</i> pada Baterai.....	10
<b>Gambar 2.8</b> Pendinginan Baterai Pasif dengan <i>Fin</i> .....	11
<b>Gambar 2.9</b> Aktivitas Molekular pada Konduksi Akibat Difusi Energi.....	18
<b>Gambar 2.10</b> Perpindahan Panas pada Dinding Silinder dan Rangkaian <i>Thermal</i> .....	19
<b>Gambar 2.11</b> Perpindahan Panas pada Dinding Komposit Silinder dan Rangkaian Tahanan <i>Thermal</i> .....	21
<b>Gambar 2.12</b> <i>Thermal Boundary Layer</i> pada <i>Isothermal</i> Plat Datar .....	22
<b>Gambar 2.13</b> Perpindahan Panas Secara Konveksi Paksa .....	23
<b>Gambar 2.14</b> Perpindahan Panas Secara Konveksi Alamiah.....	23
<b>Gambar 2.15</b> Proses Penelitian Penambahan Serbuk Grafit .....	28
<b>Gambar 2.16</b> Langkah-Langkah Pembuatan PCM Komposit .....	29
<b>Gambar 2.17</b> Grafik Perbandingan <i>Thermal Conductivity</i> PCM Murni dengan Komposit....	30
<b>Gambar 2.18</b> Langkah-Langkah Pembuatan PCM Komposit .....	31
<b>Gambar 2.19</b> Langkah-Langkah Pengujian Baterai <i>Lithium ion</i> .....	31
<b>Gambar 2.20</b> Grafik <i>Thermal Conductivity</i> PCM Komposit .....	32
<b>Gambar 2.21</b> Susunan Pendingin BTMS .....	32
<b>Gambar 2.22</b> Perbandingan <i>thermal management system</i> antara sistem baterai .....	33
<b>Gambar 2.23</b> Geometri Modul Baterai (a) Tanpa PCM (b) PCM Ketebalan 3 mm (c) PCM Ketebalan 6 mm (d) PCM Ketebalan 9 mm .....	33
<b>Gambar 2.24</b> Grafik Perbandingan Temperatur Baterai <i>Lithium ion</i> .....	34
<b>Gambar 2.25</b> <i>Set up</i> Pengujian Baterai <i>Lithium ion</i> .....	35
<b>Gambar 2.26</b> Grafik Temperatur pada Permukaan Baterai <i>Lithium ion</i> .....	35
<b>Gambar 2.27</b> Model Geometri Baterai Lihium Ion 18650 untuk Studi Numerik.....	36
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian.....	37
<b>Gambar 3.2</b> <i>Design</i> 3D Cetakan PCM untuk Baterai (a) Cetakan PCM 3mm (b) Cetakan PCM 6mm (c) Cetakan PCM 9mm .....	47

<b>Gambar 3.3</b> <i>Design 3D</i> Penahan Baterai .....	47
<b>Gambar 3.4</b> Hasil <i>Print-3D</i> dari Cetakan PCM dan Penahan Baterai .....	48
<b>Gambar 3.5</b> Rangkaian Modul Baterai .....	51
<b>Gambar 3.6</b> Skema Pengujian.....	52
<b>Gambar 3.7</b> Alat pengujian yang Telah Dirangkai (a) Rangkaian Baterai <i>Tester</i> , <i>Styrofoam box</i> dan <i>Computer</i> (b) Rangkaian Alat Pengujian Baterai di Dalam <i>Styrofoam box</i> .....	53
<b>Gambar 3.8</b> Lokasi Pemasangan <i>Thermocouple</i> dan Kabel <i>Baterai Tester</i> pada Baterai .....	54
<b>Gambar 3.9</b> <i>Display</i> pada <i>Software</i> Baterai <i>Tester</i> .....	55
<b>Gambar 3.10</b> Modul Baterai dengan Sistem <i>Natural convection</i> (a) Geometri Baterai (b) <i>Modelling</i> Baterai .....	57
<b>Gambar 3.11</b> Modul Baterai dengan PCM Murni Ketebalan 9 mm (a) Geometri Baterai (b) <i>Modelling</i> Baterai .....	58
<b>Gambar 3.12</b> <i>Skewness Mesh Metric Spectrum</i> .....	59
<b>Gambar 3.13</b> <i>Meshing</i> Modul Baterai dengan Sistem <i>Natural convection</i> (a) Geometri <i>Meshing</i> (b) Nilai <i>Skewness</i> .....	59
<b>Gambar 3.14</b> <i>Meshing</i> Modul Baterai dengan Sistem PCM Murni Ketebalan 9 mm (a) <i>Geometri Meshing</i> (b) Nilai <i>Skewness</i> .....	60
<b>Gambar 4.1</b> Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi <i>C-Rate</i> 1C dan Ketebalan PCM 3 mm.....	64
<b>Gambar 4.2</b> Grafik Perbandingan Laju Kenaikan Temperatur terhadap Interval Waktu 100 Sekon pada Variasi <i>C-Rate</i> 1C dan Ketebalan PCM 3mm .....	65
<b>Gambar 4.3</b> Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi <i>C-Rate</i> 3C dan Ketebalan PCM 9mm.....	66
<b>Gambar 4.4</b> Grafik Perbandingan Laju Kenaikan Temperatur terhadap Interval Waktu 100 Sekon pada variasi <i>C-Rate</i> 3 C dan Ketebalan PCM 9mm .....	67
<b>Gambar 4.6</b> Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi Ketebalan PCM 6mm .....	72
<b>Gambar 4.7</b> Grafik Perbandingan Kenaikan <i>Temperature</i> terhadap Waktu pada Variasi Ketebalan PCM 9mm .....	75
<b>Gambar 4.8</b> Grafik Perbandingan kenaikan <i>Temperature</i> terhadap Waktu pada Variasi <i>C-Rate</i> 1C .....	78
<b>Gambar 4.9</b> Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi <i>C Rate</i> 2C .....	80
<b>Gambar 4.10</b> Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi <i>C-Rate</i> 3C .....	82
<b>Gambar 4.11</b> Grafik Perbandingan <i>Heat generation</i> terhadap Waktu pada Variasi <i>C-Rate</i> 3C .....	84
<b>Gambar 4.12</b> Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi <i>C-Rate</i> 2C .....	85



<b>Gambar 4.13</b> Grafik Perbandingan Hasil Eksperimen dan Studi Numerik pada Sistem <i>Natural convection</i> Variasi <i>C-Rate</i> 3C.....	86
<b>Gambar 4.14</b> Hasil Kontur Temperatur pada Modul Baterai di <i>Discharge Rate</i> 3C dengan <i>Natural convection</i> (a)Tampak Isometrik (b)Tampak Samping .....	88
<b>Gambar 4.15</b> Grafik Perbandingan Hasil Eksperimen dan Studi Numerik pada Sistem PCM Murni Ketebalan 9 mm Variasi <i>C-Rate</i> 3C .....	89
<b>Gambar 4.16</b> Hasil Kontur Temperatur pada Modul Baterai di <i>Discharge Rate</i> 3C dengan PCM Murni Ketebalan 9 mm (a)Tampak Isometrik (b)Tampak Samping .....	90

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 2.1</b> Kelebihan dan Kekurangan Baterai <i>Lithium ion</i> .....	6
<b>Tabel 2.2</b> <i>Properties</i> Material Grafit .....	14
<b>Tabel 2.3</b> <i>Properties</i> Material Aluminium .....	15
<b>Tabel 2.4</b> <i>Properties</i> Material <i>Silica</i> .....	16
<b>Tabel 2.5</b> <i>Properties</i> Material Tembaga .....	16
<b>Tabel 2.6</b> Waktu Leleh dan Waktu Pengerasan .....	28
<b>Tabel 2.7</b> Nilai Konduktifitas <i>Thermal</i> pada Variasi <i>Volume Friction</i> .....	29
<b>Tabel 2.8</b> Variasi Kandungan PCM Komposit pada Pengujian.....	30
<b>Tabel 2.9</b> Parameter Simulasi .....	34
<b>Tabel 3.1</b> Spesifikasi baterai <i>Lithium ion</i> .....	38
<b>Tabel 3.2</b> Spesifikasi <i>Phase Change Material</i> .....	39
<b>Tabel 3.3</b> Spesifikasi Serbuk Grafit .....	39
<b>Tabel 3.4</b> Spesifikasi serbuk aluminium.....	39
<b>Tabel 3.5</b> Spesifikasi Serbuk Silika .....	39
<b>Tabel 3.6</b> Spesifikasi Serbuk Tembaga.....	40
<b>Tabel 3.7</b> Alat dan Material yang Digunakan dalam Eksperimen .....	40
<b>Tabel 3.8</b> Massa <i>Paraffin wax</i> Berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai PCM .....	48
<b>Tabel 3.9</b> Massa <i>Paraffin wax</i> dan Serbuk Aluminium Berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM .....	49
<b>Tabel 3.10</b> Massa <i>Paraffin wax</i> dan Serbuk Grafit Berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM.....	49
<b>Tabel 3.11</b> Massa <i>ParaffinWax</i> dan Serbuk Silika Berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM.....	50
<b>Tabel 3.12</b> Massa <i>Paraffin wax</i> dan Serbuk Tembaga Berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM.....	50
<b>Tabel 3.13</b> <i>Set up</i> Arus dan <i>Voltage</i> pada <i>Software</i> Baterai <i>Tester</i> untuk Masing – Masing <i>Discharging Rate</i> .....	55
<b>Tabel 3.14</b> <i>Set up</i> Arus dan <i>Voltage</i> pada <i>Software</i> Baterai <i>Tester</i> untuk Masing – Masing <i>Charging Rate</i> .....	55
<b>Tabel 3.15</b> Parameter Desain Geometri Modul Baterai.....	58
<b>Tabel 3.16</b> <i>Set up</i> ANSYS .....	60
<b>Tabel 3.17</b> Hasil Pengukuran Temperatur untuk Setiap Variasi Modul Baterai .....	61

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>Lampiran 1</b> : Persiapan Pengujian Modul Baterai oleh Penulis .....	95
<b>Lampiran 2</b> : Proses Pengujian Modul Baterai .....	97
<b>Lampiran 3</b> : Rangkaian Modul Baterai Aluminium dengan Ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm .....	98
<b>Lampiran 4</b> : Rangkaian Modul Baterai Grafit dengan Ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm ..	99
<b>Lampiran 5</b> : Rangkaian Modul Baterai Silika dengan Ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm..	99
<b>Lampiran 6</b> : Rangkaian Modul Baterai Tembaga dengan Ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm .....	100
<b>Lampiran 7</b> : Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem Pendinginan <i>Natural convection</i> .....	100
<b>Lampiran 8</b> : Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Murni .....	106
<b>Lampiran 9</b> : Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Grafit .....	115
<b>Lampiran 10</b> : Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Aluminium ..	124
<b>Lampiran 11</b> : Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Silika .....	133
<b>Lampiran 12</b> : Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Tembaga....	142
<b>Lampiran 13</b> : Tabel Hasil Perhitungan Laju Kenaikan Temperatur pada Variasi <i>C-Rate</i> 1C dan Ketebalan PCM 3mm ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ) .....	151
<b>Lampiran 14</b> : Tabel Hasil Perhitungan Laju Kenaikan Temperatur pada Variasi <i>C-Rate</i> 1C dan Ketebalan PCM 3mm ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ) .....	152
<b>Lampiran 15</b> : Tabel Hasil Perhitungan Densitas PCM Komposit <i>Solid &amp; Liquid</i> antar Variasi Material <i>Filler</i> .....	153
<b>Lampiran 16</b> : Tabel Hasil Perhitungan <i>Specific heat</i> ( $C_p$ ) PCM Komposit <i>Solid &amp; Liquid</i> antar Variasi Material <i>Filler</i> .....	153
<b>Lampiran 17</b> : Tabel Hasil Perhitungan Kalor Laten PCM Komposit antar Variasi Material <i>Filler</i> .....	153
<b>Lampiran 18</b> : Tabel Hasil Perhitungan Volume Fraction PCM Komposit <i>Solid &amp; Liquid</i> antar Variasi Material <i>Filler</i> .....	154
<b>Lampiran 19</b> : Tabel Hasil Perhitungan Konduktivitas PCM Komposit <i>Solid &amp; Liquid</i> antar Variasi Material <i>Filler</i> .....	154
<b>Lampiran 20</b> : Tabel Hasil Perhitungan <i>Thermal Diffusivity</i> PCM Komposit <i>Solid &amp; Liquid</i> antar Variasi Material <i>Filler</i> .....	154

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dunia saat ini sedang menghadapi tantangan besar dalam mengelola krisis energi. Kebutuhan akan energi yang bersih dan berkelanjutan telah mendorong peningkatan penelitian dan pengembangan dalam bidang energi terbarukan. Salah satu aspek terpenting dari energi terbarukan adalah elektrifikasi, dan di dalamnya baterai *Lithium ion* memainkan peran kunci. Sebagai komponen vital dalam elektrifikasi, dari kendaraan listrik hingga penyimpanan energi skala besar, baterai *Lithium ion* telah menjadi alat fokus utama dalam upaya menuju masa depan yang lebih ramah lingkungan. Pengoperasian baterai *Lithium ion* yang optimal memerlukan pemeliharaan suhu yang tepat, idealnya antara 20°C hingga 50°C. (Armand et al., 2020) dalam "Journal of Power Sources", suhu operasional yang optimal ini sangat penting untuk memastikan efisiensi, kapasitas, dan umur baterai yang panjang. Namun, baterai *lithium ion* memiliki kelemahan signifikan, yaitu sensitif terhadap panas. Suhu yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan internal dan berpotensi memicu *thermal runaway*. *Thermal runaway* merupakan fenomena di mana peningkatan suhu menyebabkan kerusakan yang semakin parah, bahkan bisa berujung pada kegagalan baterai atau kebakaran.

Pengembangan sistem manajemen termal baterai yang efektif menjadi sangat penting. Terdapat berbagai metode dalam manajemen *thermal* baterai, yaitu *air cooling*, *liquid cooling*, *phase change material* (PCM), dan *thermoelectric cooling*. *Air cooling* merupakan sistem pendinginan baterai yang sederhana dan biayanya relatif rendah, namun memiliki keterbatasan signifikan dalam aplikasi tertentu. Seperti yang ditunjukkan oleh (X. Zhang et al., 2020) dalam "Thermal Science and Engineering Progress", sistem *air cooling* kurang efektif dalam kondisi *charging* dan *discharging* yang cepat, dimana *air cooling* tidak dapat mempertahankan suhu yang diperlukan. Di sisi lain, *liquid cooling* menawarkan efektivitas yang lebih tinggi, tetapi juga memiliki kerumitan dan biaya yang lebih tinggi, seperti yang dijelaskan oleh (W. Q. Li et al., 2021) dalam "Energy Conversion and Management". Meskipun memberikan manajemen termal yang baik, implementasi *liquid cooling* ini seringkali terhalang oleh biaya dan kerumitan desain.

Dalam situasi ini, penggunaan PCM sebagai metode pendinginan baterai muncul sebagai suatu solusi. PCM dapat menyimpan dan melepaskan energi panas saat mengalami perubahan fase, membuatnya ideal untuk aplikasi manajemen termal. Seperti yang diungkapkan oleh (Patel et al., 2017) dalam "Applied Thermal Engineering", PCM mempunyai keunggulan, seperti harga yang terjangkau, kemampuan operasi di suhu ekstrim, efisiensi tinggi, dan distribusi suhu yang seragam. Namun, PCM juga mempunyai beberapa kelemahan, yaitu konduktivitas termal yang rendah, risiko *supercooling*, dan perubahan material volume yang tidak diinginkan. Parafin, misalnya, meskipun merupakan bahan PCM yang paling umum digunakan, namun *paraffin* memiliki laju perpindahan panas yang rendah.

Untuk mengatasi keterbatasan ini, penelitian terbaru telah menggaungkan penggunaan *filler* untuk meningkatkan konduktivitas termal PCM. Penambahan material *filler* berkonduktivitas tinggi seperti serbuk silika, serbuk aluminium, serbuk grafit, dan serbuk tembaga telah menunjukkan peningkatan signifikan dalam performa termal PCM. Penambahan material *filler* dapat meningkatkan konduktivitas termal PCM secara substansial, sehingga meningkatkan efektivitasnya dalam aplikasi manajemen termal.

Penelitian ini bertujuan untuk lebih lanjut menganalisis pengaruh variasi material *filler* pada PCM komposit terhadap laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion*. Penggunaan material *filler* yang berbeda diharapkan dapat mengatasi beberapa keterbatasan utama PCM, seperti konduktivitas termal yang rendah dan risiko *supercooling*. Selain itu,

studi ini juga bertujuan untuk mengeksplorasi efek dari kombinasi *filler* ini pada stabilitas termal dan keandalan baterai *Lithium ion* dalam berbagai kondisi operasional. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan sistem manajemen termal yang lebih efisien untuk baterai *Lithium ion* tetapi juga memberikan wawasan berharga dalam penggunaan PCM komposit sebagai solusi inovatif dalam mengatasi tantangan manajemen termal. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan landasan untuk aplikasi PCM komposit dalam berbagai pengaturan industri, khususnya dalam konteks energi terbarukan dan elektrifikasi, yang merupakan langkah penting menuju masa depan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas pada praktikum ini berdasarkan latar belakang yang ada adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh dari penambahan PCM dan berbagai jenis material *filler* ke dalam campuran material PCM komposit terhadap peningkatan temperatur pada permukaan baterai *Lithium ion* saat proses *discharging* ?
2. Bagaimana pengaruh dari variasi material *filler* (aluminium, grafit, silika, dan tembaga) dalam campuran material PCM komposit terhadap peningkatan temperatur pada permukaan baterai *Lithium ion* saat proses *discharging* ?
3. Bagaimana pengaruh dari variasi ketebalan dari PCM komposit terhadap peningkatan temperatur pada permukaan baterai *Lithium ion* saat proses *discharging* ?
4. Bagaimana pengaruh dari variasi *discharging rate* baterai terhadap peningkatan *temperature* pada permukaan baterai *Lithium ion* ?

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang menjadi titik fokus dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Baterai yang akan digunakan dalam penelitian ini merupakan baterai jenis *Lithium ion* VRK 18650, 3000 mAh, 3.7 V, DC 40 A yang memiliki bentuk silinder.
2. Modul PCM baterai untuk semua variasi material *filler* dalam campuran PCM komposit akan dibuat dengan bentuk silinder, dengan ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm.
3. Dalam penelitian ini, perpindahan panas yang akan dipertimbangkan hanya yang terjadi melalui konveksi dan konduksi.
4. Efek perubahan volume pada PCM saat pengujian diabaikan.
5. Analisis dan pengukuran penelitian akan difokuskan pada peningkatan suhu yang terjadi pada permukaan baterai *lithium ion*.
6. Arus listrik yang disuplai dari baterai *tester* ke rangkaian modul baterai akan dipertahankan secara konstan selama proses penelitian.
7. *C-rate* saat dilakukannya proses *discharging* baterai *Lithium ion* diatur dengan nilai sebesar 1C-3C.

## 1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini berdasarkan rumusan masalah yang akan dibahas adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh dari penambahan PCM dan berbagai jenis material *filler* ke dalam campuran material PCM komposit terhadap peningkatan temperatur pada permukaan baterai *Lithium ion* saat proses *discharging*.

2. Mengetahui pengaruh dari variasi material *filler* (aluminium, grafit, silika, dan tembaga) dalam campuran material PCM komposit terhadap peningkatan temperatur pada permukaan baterai *Lithium ion* saat proses *discharging*.
3. Mengetahui pengaruh dari variasi ketebalan dari PCM komposit terhadap peningkatan temperatur pada permukaan baterai *Lithium ion* saat proses *discharging*.
4. Mengetahui pengaruh dari variasi *discharging rate* baterai terhadap peningkatan temperatur pada permukaan baterai *Lithium ion*.

### **1.5 Manfaat**

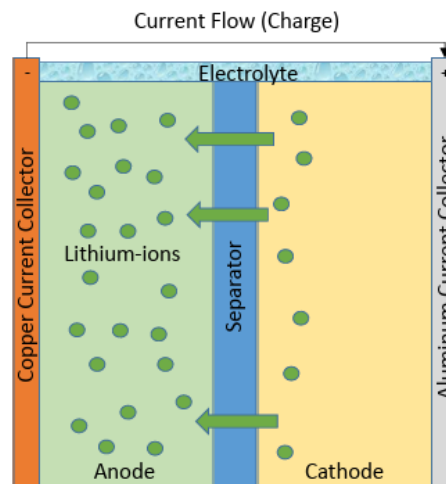
Adapun beberapa manfaat yang didapatkan dari pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menambah literatur ilmiah dengan data dan analisis baru mengenai penggunaan PCM komposit dalam manajemen *thermal* baterai.
2. Memberikan referensi untuk pengembangan desain baterai yang lebih efisien, dengan mempertimbangkan aspek *thermal* sebagai faktor utama.
3. Memberikan wawasan bagaimana berbagai jenis material *filler* dalam PCM komposit dapat mempengaruhi manajemen *thermal* baterai *Lithium ion*.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 *Lithium – Ion Battery*

Baterai *Lithium ion* pertama kali diperkenalkan pada tahun 1990 oleh Dr. John Goodenough dari Universitas Texas. Menurut Trendforce pada tahun 2013, baterai *lithium ion* menjadi jenis baterai dengan permintaan manufaktur tertinggi, dengan permintaan mencapai 660 juta unit untuk baterai silinder dan 700 juta unit untuk baterai tipe *pouch*. Keunggulan utama baterai *lithium ion* adalah densitas energinya yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis baterai lain yang tersedia di pasaran, membuatnya menjadi pilihan populer untuk perangkat elektronik. Cara kerja baterai *lithium ion* serupa dengan baterai lainnya, dimana proses pengisian diawali dengan perpindahan ion litium dari katoda ke anoda melalui elektrolit sebagai medium. Sementara itu, proses pengosongan atau *discharging* ditandai dengan kembali berpindahnya ion-ion litium melalui elektrolit dari anoda ke katoda. Gambar 2.1 menunjukkan reaksi kimia dari baterai *lithium ion*. (Warner, 2015)



**Gambar 2.1** *Lithium ion Cell*  
(Warner, 2015)

Teknologi baterai *Lithium ion* dapat dikatakan baik karena kepadatan energinya yang tinggi dan kemampuan siklusnya. Terdapat berbagai jenis elektrolit yang digunakan dalam baterai *lithium ion* untuk meningkatkan efisiensinya. Elektrolit-elektrolit ini dibagi menjadi elektrolit cair, padat, dan polimer, dan terdapat kombinasi pelarut-elektrolit yang berbeda. Elektrolit berbasis air lebih disukai karena mempunyai keunggulan dibandingkan elektrolit organik, seperti sifat tidak mudah terbakar, biayanya yang rendah, dan faktor keamanan yang lebih tinggi. Namun, berbagai faktor lain seperti pH, proses korosi, reaksi samping oksidasi-reduksi, dan evolusi gas hidrogen menciptakan keterbatasan dalam performanya. Kemudian, baterai *lithium ion* berbasis padat lebih dipilih daripada baterai *lithium ion* berbasis air dan berbasis organik karena kompetensi elektrokimia yang tinggi. Siklus elektrokimia baterai dapat ditingkatkan dengan pembentukan *interface* elektrolit padat. Baterai berbasis padat menunjukkan efisiensi yang cukup dengan adanya elektrolit polimer komposit dengan keunggulan pertumbuhan dendrit yang terhambat. Dalam baterai *lithium ion* berbasis polimer padat, elektrolit polimer gel telah digunakan, yang merupakan kombinasi dari elektrolit padat dan polimer. Penggunaan elektrolit ini meningkatkan performa baterai dan menghasilkan beda potensial hingga 5 Volt. (Kainat et al., 2024)

Baterai *Lithium ion* (Li-ion) telah menjadi sorotan utama dalam beberapa dekade terakhir sebagai salah satu jenis baterai isi ulang yang paling *advanced*. Baterai ini menjadi sumber daya utama untuk perangkat elektronik portabel, seperti ponsel dan laptop, dan dianggap sebagai salah satu kekuatan utama di balik revolusi elektronik alat digital yang dimulai sekitar dua dekade lalu. Kebutuhan akan fungsionalitas yang lebih tinggi dari alat elektronik terus mendorong permintaan akan baterai Lihium-ion yang lebih mutakhir, contohnya kebutuhan akan ponsel yang memiliki daya yang tahan lama sehingga mampu mengurangi intensitas proses *charging* pada ponsel.

Aplikasi penting lainnya untuk baterai Li-ion adalah pada kendaraan listrik dan kendaraan *hybrid*. Kendaraan dengan tipe tersebut yang membutuhkan baterai Li-ion dengan kinerja tinggi, kapasitas tinggi, laju pengisian cepat, umur panjang, serta peningkatan keamanan, namun tetap memiliki biaya yang rendah. Di Amerika Serikat, sejak kepemimpinan Presiden Obama telah menetapkan tujuan ambisius untuk memiliki satu juta kendaraan *hybrid* yang dapat diisi ulang di jalan pada tahun 2015. Selain itu, terdapat juga rencana serupa di seluruh dunia untuk mempromosikan kendaraan listrik dan *hybrid*. Permintaan baterai Li-ion meningkat dengan cepat karena jumlah kendaraan Listrik yang terus meningkat. Diperkirakan hampir 100 GW jam baterai Li-ion diperlukan untuk memenuhi kebutuhan pada masyarakat khususnya untuk kendaraan bertenaga listrik yang menyumbang sekitar 50% penjualan baterai Li-ion pada tahun 2018. Selain itu, baterai Li-ion juga akan digunakan untuk penyimpanan pasokan energi hijau yang tidak menentu dari sumber energi terbarukan, seperti *solar cell* dan turbin angin, untuk meratakan perbedaan antara sumber energi dan permintaan energi. (Deng, 2015)

### **2.1.1 Ciri Khas *Lithium Ion Battery***

Secara umum, baterai *Lithium ion* cenderung memiliki umur siklus yang lebih baik dibandingkan dengan baterai kimia lainnya. Contohnya, baterai asam timbal (PbA) hanya bisa mencapai sekitar 300-500 siklus sebelum mencapai End of Life (EOL), sedangkan baterai *Lithium ion* dapat mencapai ribuan siklus *discharging* secara penuh sebelum mencapai EOL-nya saat melakukan siklus *depth of discharge* (DOD) 100%. Jika kita melihat siklus parsial, baterai *Lithium ion* dapat mencapai puluhan ribu siklus ketika DOD dikurangi. Sebagai contoh, kandungan kimia *Lithium ion* yang dapat mencapai 1000 siklus dengan menggunakan DOD 100%, tetapi jika kita menggunakan hanya 80% dari total energi yang bisa digunakan, kita akan menemukan bahwa kita bisa mendapatkan beberapa ribu siklus.

Gambar 2.2 merangkum beberapa karakteristik kinerja umum dari beberapa jenis bahan kimia yang paling umum digunakan pada baterai *Lithium ion* saat ini, termasuk *nickel manganese cobalt* (NMC), *nickel cobalt aluminum* (NCA), *lithium iron phosphate* (LFP), *lithium titanate* (LTO), *lithium manganese oxide* (LMO), dan *lithium cobalt oxide* (LCO). (Warner, 2015)



	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 2.2** Kandungan Kimia pada Baterai *Lithium ion* (Warner, 2015)

Kandungan kimia pada baterai *Lithium ion* sudah teruji aman dan dapat memberikan kepadatan energi maksimum. Tidak perlu menggunakan memori atau siklus terencana untuk meningkatkan masa pakai baterai. Baterai *Lithium ion* dapat digunakan di ponsel, komputer laptop, kamera, kalkulator, dan perangkat elektronik lainnya. Tipe baterai ini juga semakin banyak digunakan untuk mobilitas energi listrik. Tabel 2.1 memberikan ringkasan kelebihan dan kekurangan dari baterai *lithium ion*. (Kim et al., 2018)

**Tabel 2.1** Kelebihan dan Kekurangan Baterai *Lithium ion*

Kelebihan	Kekurangan
Energi spesifik yang tinggi dan kemampuan beban tinggi dengan daya sel	Perlu adanya sirkuit proteksi untuk mengantisipasi <i>thermal runaway</i>
Siklus dan umur simpan yang panjang dan bebas perawatan	Terjadi degradasi pada temperatur tinggi dan saat digunakan pada tegangan tinggi
Kapasitas besar, resistansi internal kecil, dan efisiensi <i>coulombic</i> yang tinggi	Ketidakmampuan untuk diisi ulang pada temperatur beku ( $< 0^{\circ}\text{C}$ , $< 32^{\circ}\text{F}$ )
Algoritma pengisian daya yang tidak rumit dan waktu pengisian daya yang cepat	Perlu adanya regulasi saat proses pengiriman dalam jumlah yang besar

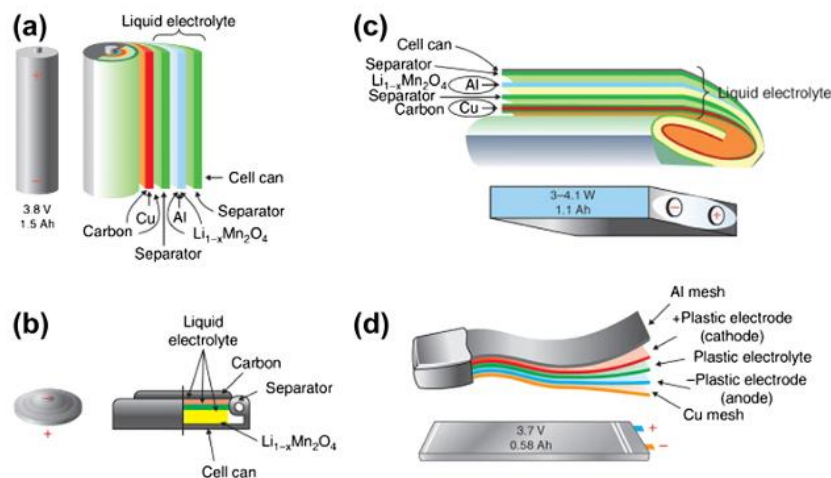
Adapun perbandingan ciri khas baterai *Lithium ion* dengan jenis baterai yang lain dapat dilihat di bawah ini,

1. Kepadatan energi tinggi, hingga  $500 \text{ Wh/dm}^3$  dan  $230 \text{ Wh/kg}$  dalam hal kepadatan energi spesifik per massa dan volume.
2. Dibandingkan dengan baterai tipe Ni-Cd atau Ni-MH, tegangan keluaran rata-rata nya tiga kali lebih tinggi ( $\sim 3,6 \text{ V}$ ).
3. Daya keluaran tinggi dengan periode singkat  $2000 \text{ W/kg}$ .

4. Tingkat *self-discharge* yang lebih rendah (3% per bulan) dibandingkan baterai Ni-Cd atau Ni-MH.
5. Pemrosesan yang cepat dan dapat mengisi hingga 80% kapasitasnya melalui *charging* dan *discharging*.
6. Efisiensi *Coulomb*, yang tinggi dan biasanya tetap dalam kisaran 100% setelah siklus awal
7. Kisaran suhu pengoperasian yang luas -25 hingga 45 derajat Celcius.

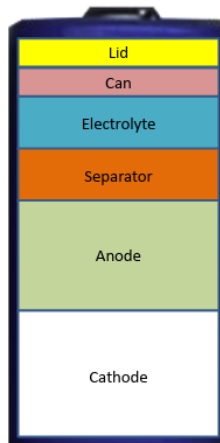
### 2.1.2 Komponen Baterai *Lithium ion*

Baterai *lithium ion* memiliki komponen yang relatif sedikit, karena hanya mempunyai sekitar lima komponen utama dan jika disusun ke dalam *bill of material* hanya memiliki sekitar 10 hingga 20 item dalam satu sel nya. Terlepas dari faktor pembentuknya, komponen utama dari sel baterai ini adalah katoda, yaitu aluminium *foil* yang pada banyak desain yang dilapisi dengan material aktif katoda. Komponen kedua dari sel baterai adalah anoda, sebuah *foil* tembaga yang dilapisi dengan material aktif anoda. Kedua *foil* ini dilapisi dan dipisahkan dengan menggunakan material separator yang biasanya terbuat dari polipropilena (PP) atau plastik polietilena (PE). Pembentukan ini menciptakan *jellyroll*, yang kemudian dimasukkan ke dalam wadah atau *casing*. Wadah tersebut bisa berupa kaleng logam, *plastic enclosure*, atau kantong *foil* logam. Ke dalam perakitan ini kemudian disuntikkan cairan elektrolitik. Seluruh perakitan kemudian disegel secara hermetis dan siap untuk masuk ke tahap berikutnya dari pembuatan sel. Gambar 2.3 menunjukkan komponen pembentuk dari baterai *Lithium ion*. (Warner, 2015)



**Gambar 2.3** Komponen *Prismatic* pada Baterai *Lithium ion* (Warner, 2015)

Istilah "*lithium ion*" merupakan istilah umum yang mencakup berbagai jenis kimia baterai, masing-masing dengan karakteristik kinerja yang berbeda-beda. Beberapa kombinasi kimia yang paling umum digunakan dalam sel baterai *lithium ion* antara lain adalah LFP, NMC, LCO, NCA, dan LMO. Dari kelima kandungan kimia utama ini, setiap produsen sel baterai mungkin menggunakan kombinasi yang berbeda untuk mencapai hasil kinerja yang beragam, atau dalam beberapa kasus, produsen sel dapat menggabungkan berbagai bahan kimia untuk mendapatkan keunggulan dari setiap bahan kimia dalam satu desain sel. Gambar 2.4 menunjukkan kandungan kimia dari baterai *Lithium ion*.(Warner, 2015)



**Gambar 2.4** Kandungan Kimia Baterai *Lithium ion*  
(Warner, 2015)

## 2.2 Manajemen *Thermal* dalam baterai

Manajemen *thermal* baterai terhubung ke sistem pendingin baterai. *Battery Pack Thermal Management System* (BTMS), juga dikenal sebagai Manajemen Termal, adalah jenis sistem kendali baterai yang terdiri dari satu atau lebih pengontrol elektronik yang memantau suhu dan tegangan baterai dan menghubungkannya ke sistem kendaraan listrik, sel keseimbangan, reaksi, dan berfungsi sebagai fitur keselamatan pada baterai. BTMS dirancang untuk melindungi baterai *Lithium ion* dari berbagai bentuk kerusakan, seperti korsleting, suhu ekstrem, pengisian daya berlebih, pengosongan daya berlebih, serta suhu rendah dan tinggi. Meskipun baterai *lithium ion* memiliki karakteristik yang sensitif terhadap suhu, BTMS sangat penting karena banyak peralatan elektronik, seperti laptop, digunakan di area dengan suhu yang berfluktuasi. (Warner, 2015)

Adapun beberapa metode dari BTMS dalam manajemen *thermal* baterai dapat dilihat di bawah ini :

1. Mencegah baterai dari *Overcharge*  
*Overcharge* terjadi ketika baterai terus diisi meskipun tegangan pengisian sudah melebihi batas maksimum yang ditentukan. Kondisi ini menyebabkan reaksi kimia yang tidak diinginkan dan dapat merusak elektrolit baterai. Oleh karena itu, diperlukan *Battery Management System* (BMS) untuk mengontrol tegangan pada setiap sel baterai selama pengisian.
2. Mencegah baterai dari *Overdischarge*  
*Overdischarge* terjadi ketika baterai dikeluarkan energinya melebihi batas aman, yaitu saat tegangan pengeluaran daya berada di bawah batas minimum yang ditentukan meskipun baterai masih dalam keadaan digunakan. Kondisi ini bisa merusak komponen di dalam sel baterai dan memperpendek umur baterai.
3. Memantau suhu selama pengisian dan pengeluaran daya  
Pemantauan suhu sangat penting selama proses pengisian (*charging*) dan pengeluaran daya (*discharging*) untuk mencegah baterai menjadi terlalu panas atau *overheating*. *Overheating* bisa merusak baterai dan bahkan menyebabkan kegagalan fungsi atau kerusakan yang lebih serius.

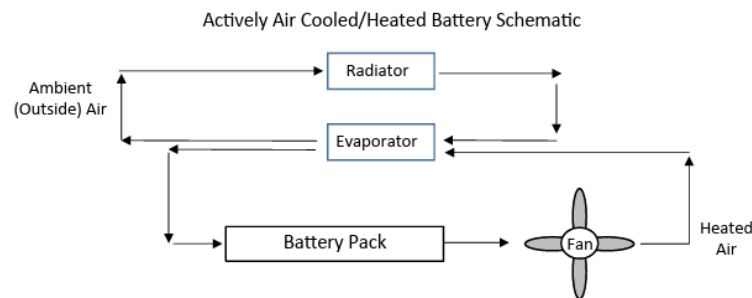
Dalam manajemen termal baterai, terdapat beberapa metode yang umum digunakan untuk menjaga kinerja baterai, khususnya baterai *Lithium ion* pada suhu optimal. Berikut adalah beberapa metode tersebut beserta penjelasannya:

### 2.2.1 Pendinginan Baterai secara Aktif

Manajemen termal aktif melibatkan penggunaan beberapa media seperti udara, cairan, atau zat pendingin yang dipaksa melewati kemasan dan melewati sel untuk mengurangi suhu. Dua metode yang paling umum adalah pendinginan udara menggunakan udara dingin yang diarahkan ke seluruh kemasan dan ke seluruh sel baterai serta elektronik untuk mengurangi suhu sel baterai dan pendinginan cair. Berikut merupakan penjelasan masing – masing jenis pendinginan baterai secara aktif. (Warner, 2015)

#### 2.2.1.1 Pendinginan Berbasis Udara (*Air Cooling*)

Metode pendinginan berbasis udara adalah salah satu teknik manajemen termal yang paling sederhana dan umum digunakan. Dalam metode ini, aliran udara digunakan untuk menyerap dan membawa panas jauh dari sel baterai. Cara kerjanya cukup sederhana, yaitu udara dingin ditiupkan melalui atau di sekitar modul baterai, dan panas dari baterai ditransfer ke udara tersebut, yang kemudian dikeluarkan dari sistem. Kelebihan utama dari metode ini adalah kesederhanaan dan biayanya yang rendah, serta keandalannya dalam aplikasi dengan beban termal yang lebih ringan. Pada gambar 2.5 merupakan contoh skema penerapan *air cooling* pada baterai

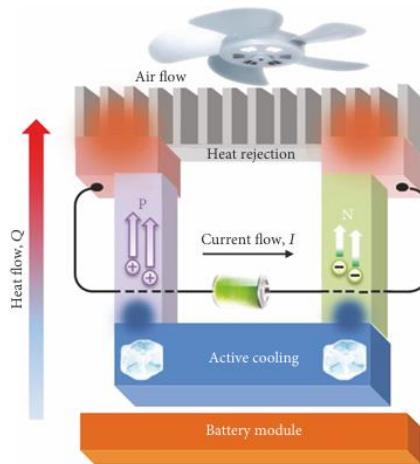


**Gambar 2.5** Skema *Air Cooling* pada Baterai  
(Warner, 2015)

Namun, pendekatan pendinginan berbasis udara memiliki keterbatasan dalam penanganan beban termal yang tinggi. Metode ini kurang efektif dalam menghilangkan panas berlebih pada aplikasi berdaya tinggi atau pada modul baterai yang besar, seperti yang ditemukan dalam kendaraan listrik atau penyimpanan energi skala besar. Selain itu, efisiensi pendinginan udara dapat berkurang dalam kondisi lingkungan yang panas, karena perbedaan suhu antara baterai dan udara luar yang lebih kecil membuat transfer panas menjadi kurang efektif. (Warner, 2015)

### 2.2.2 Pendinginan Termoelektrik

Efek termoelektrik dalam semikonduktor telah dipelajari secara luas dalam beberapa tahun terakhir karena kemampuannya menghasilkan gradien suhu pada permulaan arus listrik. Selain itu, *thermoelectric generator* (TEG) dengan kemampuan pendinginan dapat dengan cepat menghasilkan suhu yang lebih rendah dari suhu sekitar, sehingga dapat meniadakan kebutuhan akan komponen bergerak tanpa tambahan saat mengubah kapasitas listrik menjadi kapasitas pendinginan. Ditentukan pada ukuran yang ada, menyesuaikan tingkat pendinginan dengan termoelektrik sangatlah mudah. Pelestarian efek pendinginan dalam jangka panjang juga dimungkinkan tanpa memerlukan perawatan tambahan. Fitur ini dapat menyederhanakan arsitektur sistem untuk manajemen panas selain meningkatkan keandalan sistem. Oleh karena itu, salah satu metode efisien untuk mengontrol suhu modul baterai adalah dengan menggunakan pendingin generator termoelektrik (TEG). Pada gambar 2.6 merupakan contoh skema penerapan pendinginan termoelektrik pada baterai. (X. Li et al., 2019)

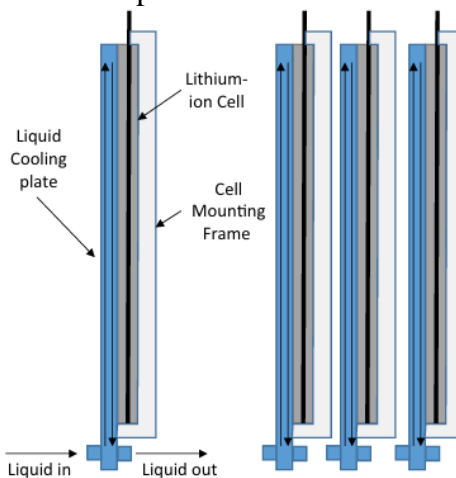


**Gambar 2.6** Skema Termoelektrik pada Baterai  
(X. Li et al., 2019)

Alat termoelektrik lain yang telah dievaluasi oleh beberapa ilmuwan adalah pendinginan termoelektrik mengandalkan efek Peltier, di mana aliran listrik menyebabkan perbedaan suhu antara dua material, yang dapat digunakan untuk menghasilkan pendinginan atau pemanasan. Dalam konteks baterai, pendinginan termoelektrik dapat digunakan untuk secara aktif mengontrol suhu sel-sel baterai dengan menggunakan modul Peltier yang terpasang dekat atau langsung pada sel-sel baterai. Modul-modul ini, ketika diberi daya, dapat menyerap panas dari baterai dan memindahkannya ke lingkungan luar atau ke medium pendinginan. (Warner, 2015)

### 2.2.3 Pendinginan Berbasis Cairan (*Liquid Cooling*)

Pendinginan berbasis cairan menggunakan cairan seperti air atau larutan glikol untuk menghilangkan panas dari baterai. Dalam sistem ini, cairan pendingin disirkulasikan melalui pipa atau saluran yang berdekatan atau berada di dalam paket baterai. Cairan menyerap panas dari sel baterai dan kemudian dipompa keluar dari paket untuk didinginkan, biasanya melalui radiator atau sistem pertukaran panas lainnya. Metode ini sangat efektif untuk pengelolaan panas karena cairan memiliki kapasitas termal yang lebih tinggi dibandingkan udara, yang memungkinkan transfer panas yang lebih efisien. Pada gambar 2.7 merupakan contoh skema penerapan pendinginan berbasis cairan pada baterai.

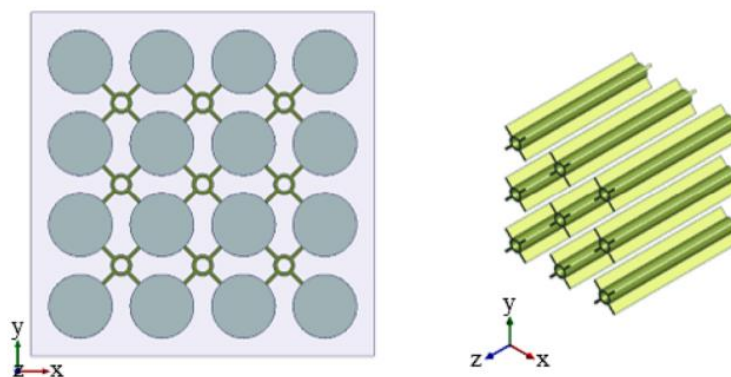


**Gambar 2.7** Pelat dengan *Liquid Cooling* pada Baterai  
(Warner, 2015)

Keuntungan utama dari pendinginan berbasis cairan adalah kemampuannya untuk menangani beban termal yang lebih besar, menjadikannya ideal untuk aplikasi berdaya tinggi seperti kendaraan listrik. Sistem ini juga memungkinkan kontrol suhu yang lebih presisi, yang sangat penting untuk memperpanjang umur baterai dan menjaga kinerjanya. Namun, sistem pendinginan cairan cenderung lebih rumit dan mahal untuk diimplementasikan dibandingkan dengan pendinginan udara. Selain itu, ada risiko kebocoran cairan yang bisa merusak baterai dan komponen elektronik lainnya. (Warner, 2015)

#### 2.2.4 Pendinginan Baterai secara Pasif

Proses mengendalikan suhu sel dan kemasan baterai tanpa menambahkan cairan, udara, atau media pendingin lainnya dikenal sebagai manajemen termal pasif. Ada banyak metode dalam pendinginan baterai secara pasif. Cara paling umum untuk melakukan pendinginan secara pasif adalah dengan menggunakan wadah yang terbuat dari aluminium atau logam untuk memindahkan panas dari sel baterai ke wadah yang terbuat dari aluminium atau logam. Akibatnya, panas mampu memancar ke lingkungan sekitar dan didistribusikan ke seluruh wadah logam. Dikenal sebagai sinkronisasi panas, pendinginan pasif bekerja dengan baik pada wadah dengan tingkat *discharges rates* yang rendah karena menghasilkan lebih sedikit panas. Menambahkan *fin* pada penutup wadah sehingga udara dapat berhembus ke atasnya saat kendaraan bergerak, mendinginkan wadah, merupakan teknik pendinginan pasif lainnya. Keuntungan utama manajemen termal pasif adalah efektivitas biaya, karena menghilangkan kebutuhan perangkat keras material untuk pendinginan sistem dan lebih murah dibandingkan sistem yang menggunakan pendingin cair atau udara. Tetapi pendinginan secara pasif mempunyai kelemahan, yaitu hanya dapat mendinginkan suhu udara di sekitarnya dan bereaksi lambat terhadap aplikasi dengan permintaan tinggi. (Warner, 2015). Adapun contoh skema dari pendinginan baterai secara pasif dapat dilihat pada gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Pendinginan Baterai Pasif dengan *Fin*  
(Liu et al., 2023)

#### 2.3 Phase change material (PCM)

PCM merupakan salah satu metode dari pendinginan baterai secara pasif. PCM dalam manajemen termal baterai bekerja dengan memanfaatkan sifat material yang berubah fase dari padat menjadi cair atau sebaliknya untuk menyerap atau melepaskan panas. Namun istilah tersebut agak keliru karena PCM tidak benar-benar menjadi cair, namun akan lebih akurat jika dikatakan bahwa PCM melunak. PCM umumnya berupa balok material padat, seringkali bermaterial dasar lilin dan grafit, yang dikerjakan atau dicetak sesuai design model baterai dan dapat mengelilingi sel baterai. Ketika suhu baterai meningkat, PCM menyerap panas berlebih dan menyebabkan material melunak atau meleleh. Proses ini menstabilkan suhu

baterai dengan menyimpan panas berlebih. Ketika suhu baterai turun, PCM melepaskan panas yang disimpan saat mengembalikan dirinya ke fase padat, membantu menjaga suhu baterai tetap stabil dalam berbagai kondisi operasi.

Keuntungan utama dari menggunakan PCM adalah kemampuannya untuk menyerap panas dalam jumlah besar tanpa perubahan suhu yang signifikan, menjadikannya ideal untuk aplikasi di mana fluktuasi suhu harus diminimalisir. Selain itu, PCM dapat membantu mengurangi kebutuhan akan sistem pendinginan aktif, mengurangi beban pada sistem dan potensi biaya operasional. Namun tantangan dalam menggunakan PCM adalah mengintegrasikan material ini dengan modul baterai dan mengatur proses perubahan fase agar efisien. Selain itu, PCM mungkin memiliki konduktivitas termal yang rendah dan memerlukan tambahan material atau desain untuk meningkatkan distribusi panas. (Warner, 2015)

PCM dibagi menjadi tiga kategori utama berdasarkan komposisinya, diantaranya organik, anorganik, dan eutektik. Adapun penjelasan untuk – masing kategorinya adalah sebagai berikut :

### 2.3.1 *Organic PCM*

Material organik dapat mengalami peleburan kongruen yang berarti meleleh dan membeku berulang kali tanpa degradasi fase dan akibatnya dapat menurunkan kalor latennya. Nukleasi secara tersendiri berarti material organik dapat mengkristal dengan sedikit atau tanpa *supercooling* dan biasanya tidak bersifat korosif. Berikut ini merupakan material PCM yang tergolong dalam material organik : (Sharma et al., 2009)

#### 1. Parafin

Lilin parafin sebagian besar terdiri dari campuran rantai lurus n alkana. Kristalisasi rantai (CH<sub>3</sub>) melepaskan panas laten yang berjumlah besar. *Melting point* dan kalor laten keduanya meningkat seiring dengan panjang rantai. Material parafin memenuhi syarat sebagai wadah penyimpanan panas gabungan karena kemampuannya yang dapat tersedia dalam *range temperature* yang besar. karena biaya Namun hanya *technical grade parafin* yang dapat digunakan sebagai sistem penyimpanan panas laten PCM pada sistem penyimpanan kalor laten. Material parafin dapat dikatakan aman, tahan lama, biayanya murah, dan tidak korosif. Parafin bersifat *inert* secara kimia dan stabil di bawah 500 C, hanya mengalami perubahan volume sedikit saat meleleh dan memiliki tekanan uap yang rendah saat meleleh.

#### 2. Non parafin

Material organik non-parafin adalah material PCM yang paling banyak jumlahnya dan memiliki sifat yang sangat bervariasi. Masing-masing material ini akan mempunyai sifat tersendiri, tidak seperti parafin, yang mempunyai sifat yang sangat mirip.

### 2.3.2 *Inorganic PCM*

Adapun material yang termasuk dalam *inorganic PCM* diantaranya adalah : (Sharma et al., 2009)

#### 1. *Salt Hydrates*

*Salt Hydrates* adalah kelompok material PCM yang paling penting, yang telah dipelajari secara ekstensif untuk penggunaannya dalam sistem penyimpanan energi kalor laten. Sifat yang dimiliki oleh *salt hydrates* diantaranya :

- Mempunyai kalor laten yang tinggi per satuan volume
- Mempunyai konduktivitas termal yang relatif tinggi (hampir dua kali lipat dari konduktivitas termal parafin)
- Perubahan volume yang kecil pada saat meleleh.

- Tidak terlalu korosif, kompatibel dengan plastik
- Memiliki nilai toksivitas yang kecil

Masalah utama dalam penggunaan *salt hydrates* sebagai PCM adalah sebagian besar yang digunakan dalam penyimpanan termal dapat meleleh secara bersamaan. Karena  $n$  mol air hidrasi tidak cukup untuk melarutkan satu mol garam, larutan yang dihasilkan bersifat jenuh pada *melting point*. Garam yang kepadatannya lebih tinggi, mengendap di dasar wadah dan tidak dapat tercampur dengan air selama proses pembekuan. Hal ini menghasilkan peleburan-pembekuan *salt hydrates* yang bersifat ireversibel dan terus menurun pada setiap siklus *charge-discharge*.

## 2. Logam

Material dalam kategori ini merupakan logam yang memiliki titik leleh rendah dan logam eutektik. Logam-logam ini cukup jarang dijadikan sebagai material PCM karena massanya yang berat. Namun, jika volume menjadi pertimbangan, kemungkinan besar material adalah pilihan material PCM yang baik karena tingginya konduktivitas panas per satuan volume. Logam memiliki konduktivitas termal yang tinggi daripada material PCM yang lainnya, sehingga tidak diperlukan *filler material*.

### 2.3.3 Eutektik PCM

Eutektik adalah komposisi titik leleh minimum dari dua atau lebih komponen, dimana masing-masing komponen meleleh dan membeku secara bersamaan dan membentuk campuran kristal selama kristalisasi. Eutektik hampir selalu meleleh dan membeku tanpa pemisahan karena membeku menjadi campuran kristal yang rapat, dan hanya menyisakan sedikit kesempatan bagi komponen untuk terpisah. Saat meleleh, kedua komponen akan mencair secara bersamaan tanpa adanya pemisahan. Beberapa fenomena pemisahan komposisi PCM terkadang salah disebut sebagai eutektik, karena memiliki *melting point* yang kecil. Dikarenakan komponen-komponen tersebut mengalami reaksi peritektik selama transisi fasa, seharusnya komponen-komponen tersebut lebih tepat disebut peritektik. (Sharma et al., 2009)

### 2.4 Material Filler

Material *filler* dalam PCM komposit adalah bahan tambahan yang dicampur dengan material PCM (*Phase change material*) untuk meningkatkan sifat-sifat tertentu, seperti konduktivitas termal, stabilitas, dan durabilitas. Perlu diketahui PCM mempunyai kelemahan, yaitu konduktivitas termalnya yang rendah. Parafin, misalnya, meskipun merupakan PCM yang paling umum digunakan, memiliki konduktivitas *thermal* dibawah 0,4 W/mK, sehingga membuatnya sulit untuk mentransfer panas disaat kalor yang tinggi keluar dari sel baterai. Untuk mengatasi keterbatasan ini, adanya penambahan *filler* dengan konduktivitas termal yang tinggi pada PCM. *Filler* dapat membantu menyebarkan panas lebih efisien di seluruh material PCM. Hal ini sangat penting dalam aplikasi di mana pengelolaan panas yang efektif diperlukan, seperti dalam baterai *Lithium ion*, sistem elektronik, dan aplikasi energi terbarukan.

Material yang dapat dijadikan sebagai *filler* komposit adalah salah satunya adalah serbuk grafit. Penambahan *filler* serbuk grafit ke dalam PCM, dengan komposisi 70 % Parafin dan 30% grafit dapat menghasilkan konduktivitas sebesar 2,77 W/mk jika dibandingkan dengan komposisi 100 % Parafin yang hanya menghasilkan konduktivitas sebesar 0.4 W/mk. Hal ini membuktikan bahwa dengan menggunakan material *filler* yang memiliki konduktivitas yang tinggi dapat meningkatkan konduktivitas *thermal* dari PCM. (Bharadwaj Reddy et al., 2018) Metode alternatif untuk meningkatkan transfer panas dalam sistem manajemen termal baterai berbasis PCM adalah melalui pemasangan sirip logam di dalam



PCM. Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki kinerja sistem manajemen termal dengan menggunakan desain sirip baru, yang menggabungkan sirip longitudinal dan cincin silinder, untuk meningkatkan konduktivitas termal PCM. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem PCM dengan sirip dapat meningkatkan kinerja sistem manajemen termal baterai dibandingkan hanya dengan menggunakan PCM tanpa *filler*. Sistem ini mampu mengatur peningkatan suhu baterai hingga pada laju pembangkitan panas 20 W. Desain struktur sirip ini berhasil memperluas area pertukaran panas dan memperbaiki jaringan konduktivitas termal di dalam PCM. (Liu et al., 2023)

Variasi material yang dapat dijadikan sebagai *filler* pada PCM dapat dilihat di bawah ini :

#### 2.4.1 Grafit

Grafit adalah material *allotrop* karbon yang dikenal karena struktur kristalnya yang unik dan berbagai sifat fisik yang menguntungkan. Struktur grafit terdiri dari lapisan-lapisan atom karbon yang tersusun dalam pola heksagonal, dengan lapisan-lapisan tersebut yang lemah terikat satu sama lain. Hal ini membuat grafit memiliki sifat pelumas yang baik dan juga mudah terkelupas atau terpisah menjadi lembaran tipis. Grafit terbentuk ketika batuan organik kaya karbon menjadi sasaran panas dan tekanan tinggi baik di kerak bumi maupun pada mantel bumi. Grafit dapat terbentuk dari batuan sedimen kaya karbon seperti serpih dan batu gamping yang terpapar panas dan tekanan metamorfosis regional. Ketika terkena panas dan tekanan tinggi, serpih dan batugamping berubah menjadi batuan metamorf dalam bentuk marmer, sekis, dan gneiss yang banyak mengandung kristal kecil dan serpihan grafit.

Salah satu sifat yang paling penting dari grafit adalah konduktivitas termalnya yang tinggi, terutama sepanjang bidang lapisannya. Sifat ini menjadikannya material yang sangat efektif dalam aplikasi yang memerlukan disipasi panas yang efisien, seperti dalam komponen elektronik atau sistem manajemen termal. Selain itu, grafit juga memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, menjadikannya bermanfaat dalam berbagai aplikasi elektrokimia dan komponen elektronik. Grafit juga digunakan dalam berbagai aplikasi lain, termasuk sebagai bahan bakar nuklir, bahan penghantar panas, bahan pelapis, dan dalam pembuatan pensil. (Callister & Rethwisch, 2010). *Properties* dari material grafit dapat dilihat pada tabel 2.2

**Tabel 2.2** *Properties* Material Grafit  
(Bharadwaj Reddy et al., 2018)

<i>Properties</i>	Nilai
<i>Density</i>	2.25 g/cc
<i>Hardness (Mohs)</i>	1.0 – 2.0
<i>Tensile Modulus</i>	4.80 GPa
<i>Electrical Resistivity</i>	0.00600 ohm-cm
<i>Heat of Fusion</i>	9741 J/g
<i>Coefficient Thermal Expansion (CTE)</i>	0.600 - 4.30 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$
<i>Specific heat Capacity</i>	0.7077 J/g $^\circ\text{C}$
<i>Thermal Conductivity</i>	80.0 W/m-K
<i>Maximum Service Temperature</i>	3650 $^\circ\text{C}$

#### 2.4.2 Aluminium

Aluminium adalah logam ringan, tahan karat, dan memiliki konduktivitas termal serta listrik yang tinggi. Ini membuatnya ideal untuk berbagai aplikasi industri, termasuk pembuatan peralatan elektronik, komponen otomotif, dan konstruksi bangunan. Sifat ringannya berkontribusi pada efisiensi bahan bakar yang lebih baik dalam dunia transportasi,

sementara kekuatan dan daya tahannya dapat meningkatkan keandalan produk. Selain itu, aluminium mudah dibentuk dan dapat didaur ulang tanpa kehilangan kualitasnya, dan mendukung praktik berkelanjutan dalam manufaktur. Daur ulang aluminium menghemat energi dan mengurangi emisi, menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan logam lain. Paduan aluminium dibagi menjadi dua kategori utama berdasarkan proses pembuatannya: paduan yang dibentuk melalui proses tempa dan paduan yang dibuat melalui proses pengecoran. Karena ada beragam jenis paduan aluminium yang terus berkembang, sistem penamaan yang berdasarkan komposisi dan karakteristik paduan telah dikembangkan untuk memudahkan proses klasifikasi dan identifikasi masing-masing jenis paduan tersebut. Di tingkat molekuler, aluminium memiliki struktur kristal yang memberikannya sifat fleksibilitas dan ketahanan terhadap deformasi. Selain itu aluminium mempunyai ketahanan terhadap korosi, menjadikan aluminium logam yang sangat serbaguna, digunakan dalam berbagai aplikasi. (Callister & Rethwisch, 2010). *Properties* dari material aluminium dapat dilihat pada tabel 2.3.

**Tabel 2.3** *Properties* Material Aluminium  
(Elshaer et al., 2024)

<i>Properties</i>	Nilai
<i>Density</i>	2.698 g/cc
<i>Hardness (Vickers)</i>	15
<i>Modulus of Elasticity</i>	370 GPa
<i>Poissons Ratio</i>	0.36
<i>Electrical Resistivity</i>	2.70e-6 ohm-cm
<i>Heat of Fusion</i>	386.9 J/g
<i>Specific heat Capacity</i>	0.9 J/g-°C
<i>Thermal Conductivity</i>	210.0 W/m-K
<i>Maximum Service Temperature</i>	660.37 °C

### 2.4.3 Silica Glass

Silika silika, dikenal pula sebagai silika kuarsa, adalah material yang terbuat dari silikon dioksida dalam bentuk amorf. Material ini terkenal karena transparansinya yang tinggi terhadap spektrum cahaya, termasuk ultraviolet dan beberapa sinar inframerah, membuatnya ideal untuk berbagai aplikasi optik. Silika silika juga memiliki titik leleh yang sangat tinggi dan ketahanan yang luar biasa terhadap perubahan suhu, menjadikannya material yang cocok untuk penggunaan dalam kondisi ekstrem. Selain itu, silika silika memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan ketahanan terhadap korosi kimia, yang memungkinkan penggunaannya dalam bidang elektronik dan laboratorium. Silika jenis ini tidak bereaksi dengan sebagian besar bahan kimia kecuali hidrofluorik asam dan basa kuat, yang menjamin integritasnya dalam kondisi yang menuntut.

Penggunaannya yang luas termasuk dalam pembuatan serat optik, instrumen laboratorium, dan komponen dalam industri semikonduktor. Sifat-sifat uniknya, seperti ketahanan terhadap suhu tinggi dan transparansi optik, menjadikan silika silika sebuah material yang sangat berharga di berbagai bidang teknologi canggih. (Callister & Rethwisch, 2010). *Properties* dari material *silica glass* dapat dilihat pada tabel 2.4.

**Tabel 2.4 Properties Material Silica**  
(Intang, 2020)

<b>Properties</b>	<b>Nilai</b>
<i>Density</i>	2.8 g/cc
<i>Modulus of Elasticity</i>	68.0 GPa
<i>Tensile Modulus</i>	4.80 GPa
<i>Electrical Resistivity</i>	5.00e+9 ohm-cm
<i>Coefficient Thermal Expansion (CTE)</i>	0.750 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$
<i>Specific heat Capacity</i>	1.2 J/g $^\circ\text{C}$
<i>Thermal Conductivity</i>	1.5 W/m-K
<i>Maximum Service Temperature</i>	1200 $^\circ\text{C}$

#### 2.4.4 Tembaga

Tembaga adalah logam transisi dengan konduktivitas termal dan listrik yang sangat tinggi, menjadikannya material penting dalam industri listrik dan elektronik. Sifat anti korosi dan keuletannya yang baik membuat tembaga ideal untuk digunakan dalam pipa, kabel, dan bahkan sebagai bahan bangunan. Tembaga juga memiliki sifat anti mikroba yang membuatnya bermanfaat dalam aplikasi medis dan sanitasi.

Dalam aplikasi teknik, tembaga sering digunakan dalam bentuk paduan untuk meningkatkan kekerasannya tanpa mengorbankan konduktivitasnya. Misalnya, perunggu dan kuningan adalah paduan tembaga yang populer digunakan dalam permesinan dan pembuatan alat musik. Secara historis, tembaga telah digunakan oleh banyak peradaban kuno dan terus menjadi komponen penting dalam berbagai teknologi baru, termasuk energi terbarukan dan sistem transportasi yang efisien. Potensi daur ulangnya yang hampir tak terbatas juga menjadikan tembaga sebagai pilihan yang berkelanjutan untuk masa depan. (Callister & Rethwisch, 2010)

**Tabel 2.5 Properties Material Tembaga**  
(Xie, 2023)

<b>Properties</b>	<b>Nilai</b>
<i>Density</i>	8.93 g/cc
<i>Modulus of Elasticity</i>	110 GPa
<i>Hardness (Vickers)</i>	50
<i>Ultimate Tensile Strength</i>	210 MPa
<i>Electrical Resistivity</i>	0.00000170 ohm-cm
<i>Heat of Fusion</i>	204.8 J/g
<i>Heat of Vaporization</i>	5234 J/g
<i>Coefficient Thermal Expansion (CTE)</i>	16.4 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$
<i>Specific heat Capacity</i>	0.385 J/g $^\circ\text{C}$
<i>Thermal Conductivity</i>	398 W/m-K
<i>Melting Point</i>	1083.2 - 1083.6 $^\circ\text{C}$

#### 2.5 Heat generation Baterai Lithium ion

*Heat generation* pada baterai adalah fenomena yang terjadi saat baterai mengalami *charging* dan *discharging*, di mana reaksi kimia di dalam sel baterai menghasilkan arus listrik dan panas. Energi yang hilang sebagai panas selama proses ini dapat meningkatkan suhu baterai, yang berdampak pada kinerja dan keawetan baterai. Kondisi suhu yang terlalu tinggi

dapat mempercepat kerusakan pada baterai dan berisiko menimbulkan kegagalan baterai yang serius seperti meledak atau terbakar. Oleh karena itu, penting untuk mengelola dan mengontrol pembangkitan panas pada baterai. Perhitungan *Heat generation* pada baterai dapat dilakukan dengan menggunakan dua metode, diantaranya :

### 2.5.1 Perhitungan *Heat generation* Metode Persamaan Bernardi

Panas yang dihasilkan oleh reaksi elektrokimia ( $Q_r$ ) dalam baterai dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1. (Jindal et al., 2022)

$$Q_{rev} = I.(T.\Delta S \frac{1}{nF}) \quad (2.1)$$

$$Q_{rev} = I.(T.\frac{dE}{dT}) \quad (2.2)$$

Dimana :

$Q_{rev}$  = panas hasil reaksi elektrokimia (*reversible heat*) (W)

T = Temperatur (K)

$\Delta S$  = perubahan entropi (J/s.K)

I = arus *charging* (A)

n = jumlah *electron* yang berpindah

F = konstanta faraday (9658,5 C/mol)

$\frac{dE}{dT}$  = koefisien entropi

Selanjutnya, panas yang dihasilkan dari adanya pertukaran arus dalam resistansi ( $Q_j$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.2

$$Q_{ir} = I(OCV - U) \quad (2.3)$$

Dimana :

$Q_{ir}$  = panas hasil pertukaran arus (*irreversible heat*) (W)

I = arus *charging* (A)

OCV = tegangan sirkuit terbuka (Volt)

U = tegangan operasi (Volt)

Dari persamaan 2.2 dan 2.3 dapat dibentuk model persamaan untuk menentukan *heat generation* dari baterai *Lithium ion* selama beroperasi, persamaan tersebut dikenal dengan persamaan Bernardi. Persamaan ini membutuhkan parameter kelistrikan dan termal dari baterai untuk menentukan laju *heat generation* . Adapun persamaan Bernardi dapat dilihat pada persamaan 2.4.

$$Q = I(OCV - U) - I.(T.\frac{dE}{dT}) \quad (2.4)$$

Dimana :

Q = Total *heat generation* baterai *Lithium ion* (W)

*Heat generation* pada baterai Lithium – Ion dapat dilakukan perhitungan secara volumetric, yaitu dengan menggunakan persamaan 2.5.

$$Q = \frac{1}{vb} [I(OCV - U)] - I.(T.\frac{dE}{dT}) \quad (2.5)$$

Dimana :

$V_b$  = Volume baterai *Lithium ion* ( $m^3$ )

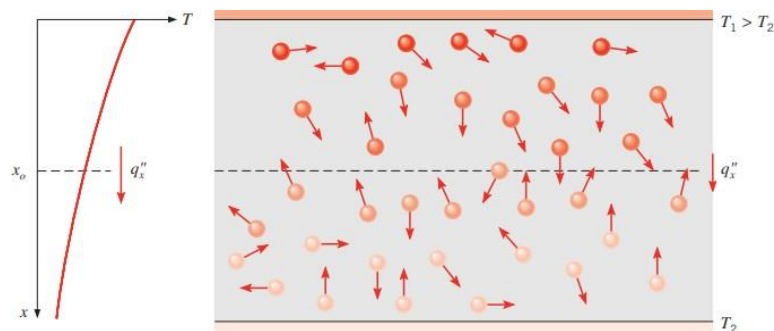
## 2.6 Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan salah satu dari tiga jenis fenomena perpindahan yang dipelajari dalam bidang teknik mesin, selain perpindahan massa dan perpindahan momentum. Pada perpindahan massa, penyebab terjadinya perpindahan adalah perbedaan konsentrasi, perpindahan momentum disebabkan oleh adanya perbedaan kecepatan, sedangkan perpindahan panas disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur. Terdapat tiga macam cara transfer energi, yaitu: radiasi (sinaran), konveksi (aliran fluida) dan konduksi (hantaran). Semua proses transfer panas memerlukan satu atau lebih dari tiga tipe transfer energi tersebut. (Bergman et al., 2011)

### 2.6.1 Konduksi

Konduksi merupakan proses perpindahan panas dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah dari suatu bagian benda padat atau material konduktor ke bagian lainnya, molekul- molekul benda padat atau material konduktor ini tidak ada yang berpindah, molekul- molekul tersebut menabrak molekul- molekul yang berada didekatnya dan menyalurkan sebagian panas molekul tersebut ke molekul didekatnya.

Hal yang sama terjadi pada cairan. Ketika cairan memiliki ikatan molekul yang lebih erat, interaksi antar molekul lebih kuat dan seringkali menyebabkan proses transfer energi yang lebih besar. Contoh dari proses ini adalah ketika *ladle spoon* digunakan untuk mengaduk sup panas dan *spoon* tersebut kemudian dibiarkan di dalam panci. Setelah beberapa saat, ujung *spoon* yang tidak terendam sup akan terasa panas. Karena energi panas pada panci akan dipindahkan melalui molekul *ladle spoon* bermaterial logam, sehingga ujung lainnya juga ikut memanas. Pada gambar 2.9 menunjukkan aktivitas difusi molekul pada proses konduksi.



**Gambar 2.9** Aktivitas Molekular pada Konduksi Akibat Difusi Energi (Bergman et al., 2011)

Proses perpindahan panas dapat didefinisikan sebagai laju energi yang ditransfer terhadap satuan waktu. Kondisi  $T_1 > T_2$  menyebabkan partikel yang dekat dengan  $T_1$  akan bergerak secara acak (berputar dan bergetar) dan saling bertumbukan, sehingga terjadi perpindahan energi panas dari  $T_1$  ke  $T_2$ . Besarnya laju perpindahan panas dapat dinyatakan dalam bentuk *Heat flux*,  $Q''$  ( $W/m^2$ ), yaitu perpindahan panas tiap satuan luas yang arahnya tegak lurus dengan luasan dan besarnya sebanding dengan gradien temperaturnya. Untuk proses konduksi, laju energi ( $q$  konduksi) dihitung menggunakan persamaan *fourier* yang dapat dilihat pada persamaan 2.6. (Bergman et al., 2011)

$$Q \text{ konduksi} = -k.A \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

Dimana :

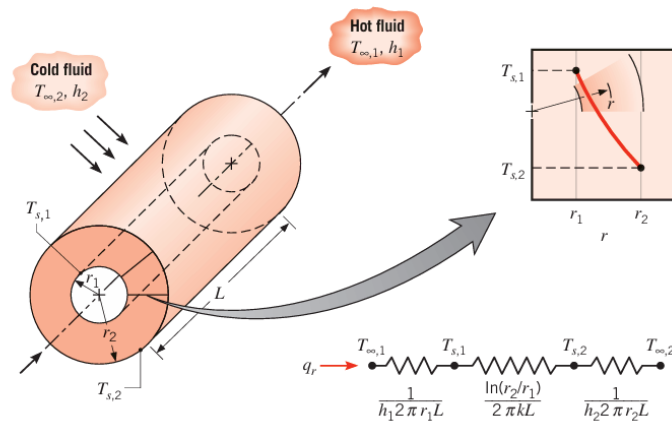
- Q konduksi = Laju aliran panas melalui konduksi (W)
- k = Konduktivitas termal dari material ( $W/m^2.K$ )
- A = Luas penampang dari material yang dilalui panas ( $m^2$ )
- $\frac{dT}{dx}$  = Gradien suhu di sepanjang arah perpindahan panas (K/m)

### 2.6.2 Tahanan Thermal dan Overall Heat transfer Coefficient

Tahanan atau hambatan biasa dijumpai pada aliran listrik. Hambatan pada kelistrikan mempengaruhi besaran arus listrik yang mengalir. Hal serupa juga terjadi pada perpindahan panas yang disebut dengan tahanan *thermal* atau *thermal resistance* (Bergman et al., 2011)

#### 2.6.2.1 Tahanan thermal pada Silinder

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



**Gambar 2.10** Perpindahan Panas pada Dinding Silinder dan Rangkaian Thermal (Bergman et al., 2011)

Gambar 2.10 menjelaskan distribusi panas pada silinder berongga dengan permukaan konvektif. Persamaan panas yang sesuai adalah :

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \tag{2.7}$$

Dimana :

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

Persamaan (2.7) dapat dihubungkan dengan *Fourier's Law* dari persamaan (2.6), sehingga dapat dibentuk persamaan laju perpindahan panas :

$$q_r = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2.8)$$

Dimana :

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

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

$$q_r = \frac{T_{s,1}-T_{s,2}}{R_{t,cond}} \quad (2.9)$$

Dimana :

- $T_{s,1}$  = *Temperature* pada jari-jari dalam (K)  
 $T_{s,2}$  = *Temperature* pada jari-jari luar (K)  
 $R_{t,cond}$  = Tahanan *thermal* (K/W)

Tahanan *thermal* dapat didefinisikan sebagai rasio energi dan laju perpindahan panas. Rumus tahanan termal pada silinder ditulis pada persamaan 2.10

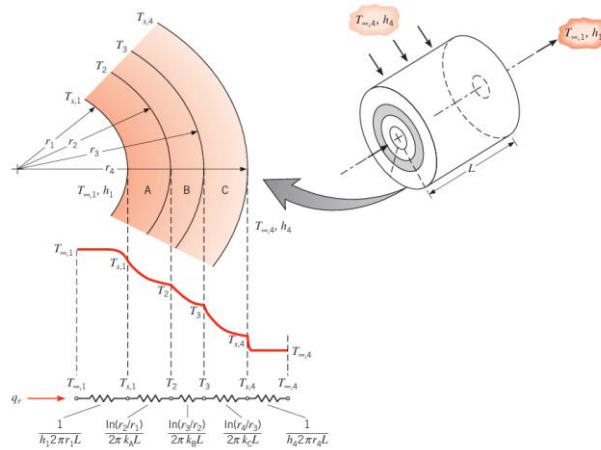
$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (2.10)$$

Dimana :

- $r_1$  = Jari-jari dalam dinding silinder (K)  
 $r_2$  = Jari-jari luar dinding silinder (K)  
 $L$  = Tinggi silinder (m)  
 $k$  = Konduktivitas termal material dinding silinder (K)

### 2.6.2.2 Overall Heat transfer Coefficient

*Overall heat transfer coefficient* berhubungan dengan total tahanan *thermal*. 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 silinder dapat dilihat pada gambar 2.11. (Bergman et al., 2011)



**Gambar 2.11** Perpindahan Panas pada Dinding Komposit Silinder dan Rangkaian Tahanan *Thermal* (Bergman et al., 2011)

Perhitungan tahanan termal total untuk silinder komposit melibatkan penjumlahan resistansi dari masing-masing lapisan, dan dituliskan pada persamaan (2.11)

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_A} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_B} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi L k_C} + \frac{1}{h_4 2\pi r_4 L} \quad (2.11)$$

Dimana :

- h1 = Koefisien perpindahan panas pada permukaan dalam silinder (W/m<sup>2</sup>.K)
- h4 = Koefisien perpindahan panas pada permukaan luar silinder (W/m<sup>2</sup>.K)
- r1 = Jari – jari dalam silinder (m)
- r2,r3,r4 = Jari – jari pada batas-batas lapisan silinder komposit (m)
- kA,kB,kC = Konduktivitas termal untuk masing – masing lapisan komposit (W/m.K)
- L = Tinggi silinder (m)

Dari persamaan 2.11, maka laju perpindahan panas untuk silinder komposit adalah :

$$q_r = \frac{T_{s,1} - T_{s,4}}{R_{tot}} \quad (2.12)$$

Dimana :

- Ts,1 = *Temperature* pada suhu permukaan dalam (K)
- Ts,2 = *Temperature* pada suhu permukaan luar (K)
- R<sub>tot</sub> = Tahanan *thermal* total (K/W)

Koefisien perpindahan panas keseluruhan (*overall heat transfer coefficient*) didefinisikan berdasarkan area dalam A1=2π.r1.L, yaitu :

$$U = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_1} + \left(\frac{r_1 \ln(r_2/r_1)}{k_A}\right) + \left(\frac{r_1 \ln(r_3/r_2)}{k_B}\right) + \left(\frac{r_1 \ln(r_4/r_3)}{k_C}\right) + \left(\frac{1}{h_4}\right)\right]} \quad (2.13)$$

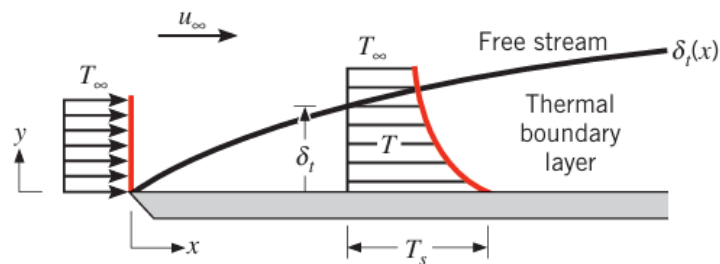


### 2.6.3 Konveksi

Konveksi merupakan bentuk perpindahan panas dimana molekul-molekul benda membawa energi panas dari satu titik ke titik lainnya. Umumnya terjadi pada benda cair dan gas. Aliran konveksi dipengaruhi beberapa faktor, diantaranya :

- Permukaan rata atau melengkung
- Aliran horizontal atau vertikal
- Jenis fluidanya, zat cair atau gas
- Aliran laminar atau turbulen
- Sifat - sifat fluida seperti viskositas, kalor jenis, dsb

*Thermal boundary layer* pada pelat datar ditunjukkan oleh gambar 2.12



**Gambar 2.12** *Thermal Boundary Layer* pada *Isothermal* Plat Datar (Bergman et al., 2011)

Pada gambar 2.12 merupakan *thermal boundary layer* pada pelat datar, dimana pada bilangan Reynolds yang bernilai tinggi, *boundary layer flow* dari aliran *incompressible* digambarkan oleh persamaan Blasius, yang solusinya mempunyai kemiripan dengan persamaan momentum *boundary layer*. Jika pelat dipanaskan atau didinginkan relatif terhadap *ambient flow*, maka *thermal boundary layer* akan tumbuh di sepanjang pelat. Untuk *thermal properties* secara konstan, *thermal boundary layer* dapat diselesaikan dengan persamaan Blasius. *Heat flux* pada permukaan pelat dapat ditentukan dari *thermal boundary layer* lapisan batas termal dan korelasi yang diperlukan untuk *Nusselt number* dapat ditemukan untuk *Prandtl arbitrary number*. Laju perpindahan panas secara konveksi dapat dirumuskan seperti persamaan 2.14.

$$Q \text{ konveksi} = h.A.\Delta T \quad (2.14)$$

Dimana :

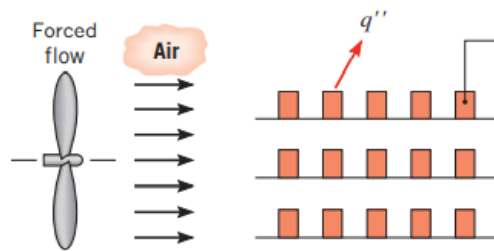
- h = Koefisien *heat transfer* ( $\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$ )
- A = Luas permukaan tempat terjadinya pertukaran panas ( $\text{m}^2$ )
- $\Delta T$  = Selisih temperatur permukaan dan temperatur *ambient* (K)

Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya di atas suhu fluida sekitarnya berlangsung dalam beberapa tahap. Pertama, panas akan mengalir dengan cara konduksi dari permukaan ke partikel-partikel fluida yang berbatasan. Energi yang berpindah dengan cara demikian akan menaikkan suhu dan energi dalam partikel-partikel fluida ini. Kemudian partikel-partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bersuhu rendah didalam fluida di mana mereka akan bercampur dengan, dan memindahkan sebagian energinya kepada partikel-partikel fluida lainnya.

Perpindahan panas konveksi dapat dibagi menjadi dua :

- *Force convection*

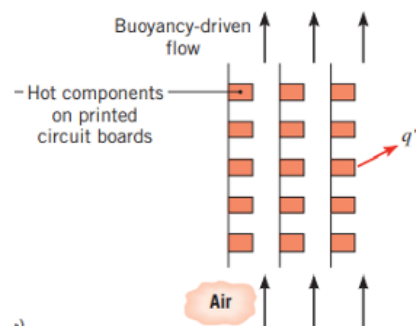
*Force convection* (konveksi paksa) adalah perpindahan panas karena adanya faktor kerja dari luar terhadap fluida perantara, misalnya konveksi dengan adanya bantuan *fan*, *blower*, *air conditioning* dan sebagainya. Konveksi paksa memiliki mekanisme yang lebih rumit daripada cara alami. Dalam jenis konveksi ini, kita harus mempertimbangkan dua faktor, yaitu gerak fluida dan konduksi panas. Kedua faktor ini memiliki hubungan yang kuat karena gerakan fluida dapat meningkatkan perpindahan panas. Semakin tinggi laju gerak fluida, semakin tinggi perpindahan panasnya, begitu juga sebaliknya. Contoh perpindahan panas secara konveksi paksa dapat dilihat pada gambar 2.13.



**Gambar 2.13** Perpindahan Panas Secara Konveksi Paksa  
(Bergman et al., 2011)

- *Natural convection*

*Natural convection* (konveksi alamiah) adalah perpindahan panas tanpa ada faktor luar melainkan karena *buoyancy force*. *Buoyancy force* merupakan gaya tekan keatas dari fluida terhadap sebuah benda, yang arah gayanya berlawanan terhadap massa benda dan efek gravitasi. Adanya pergerakan molekul dalam fluida yang disebabkan oleh perbedaan massa jenis di berbagai wilayah fluida yang sama. Massa jenis fluida berkurang saat fluida dipanaskan dan sebaliknya. Hal ini terjadi karena kecepatan molekul fluida meningkat seiring dengan kenaikan suhu, yang berakibat pada peningkatan volume fluida. Walaupun volume bertambah, massa fluida tetap konstan, dan menyebabkan densitas menurun. Saat fluida dipanaskan dalam wadah dari dasarnya, kerapatan lapisan bawah fluida tersebut berkurang. Kemudian daerah kepadatan yang lebih rendah cenderung berpindah ke bagian atas wadah. Kemudian fluida yang lebih dingin di bagian atas wadah menggantikan bagian bawah. Proses ini terus berlanjut dan terjadinya konveksi alamiah. Contoh perpindahan panas secara konveksi alamiah dapat dilihat pada gambar 2.14.



**Gambar 2.14** Perpindahan Panas Secara Konveksi Alamiah  
(Bergman et al., 2011)

#### 2.6.4 Radiasi

Radiasi adalah salah satu mekanisme perpindahan panas yang terjadi karena radiasi elektromagnetik. Ketika benda memiliki suhu yang berbeda, mereka akan memancarkan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Proses ini disebut radiasi panas atau radiasi termal. Radiasi termal dapat terjadi bahkan di ruang hampa udara karena tidak memerlukan medium untuk menghantarkan panas. Ini berbeda dari mekanisme perpindahan panas lainnya, yaitu konduksi dan konveksi, yang membutuhkan medium (seperti padatan, cairan, atau gas) untuk menghantarkan panas dari satu tempat ke tempat lain.

Pemanasan matahari ke bumi adalah salah satu contoh paling jelas dari radiasi termal. Matahari sebagai benda dengan suhu yang sangat tinggi memancarkan energi panas dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Ketika radiasi ini mencapai atmosfer bumi, sebagian diserap oleh permukaan bumi dan objek lain, sedangkan sebagian lainnya dipantulkan kembali ke atmosfer. Proses pemanasan ini menjadi salah satu pendorong utama iklim dan kondisi cuaca di bumi. Selain pemanasan dari matahari, radiasi termal juga sering dimanfaatkan dalam teknologi dan industri. Misalnya, pemanasan dengan sinar inframerah dalam oven listrik atau pemanasan dengan lampu pijar merupakan contoh penggunaan radiasi termal dalam kehidupan sehari-hari.

Laju perpindahan panas secara radiasi dapat dirumuskan seperti persamaan berikut :

$$Q \text{ radiation} = \sigma \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.15)$$

Dimana :

$\sigma$  = Konstanta proporsionalitas / konstanta boltzman ( $5,669 \times 10^{-8} \cdot W/m^2 \cdot K^4$ )

A = Luas permukaan tempat terjadinya pertukaran panas ( $m^2$ )

T = Temperatur (K)

(Bergman et al., 2011)

#### 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 :

$$\phi = \frac{\frac{m_{filler}}{\rho_{filler}}}{\frac{m_{filler}}{\rho_{filler}} + \frac{m_{paraffin}}{\rho_{paraffin}}} \quad (2.16)$$

$$K = \frac{(1+A \cdot B \cdot \phi)}{(1-B \cdot \phi \cdot \phi)} \quad (2.17)$$

$$B = \frac{\frac{k_f}{k_p} - 1}{\frac{k_f}{k_p} + A} \quad (2.18)$$

$$\varphi = 1 + \frac{(1 - \varnothing m)\varnothing}{\varnothing^2 m} \quad (2.19)$$

Dimana,

K	= Thermal conductivity dari komposit (W/mk)
K <sub>p</sub>	= Thermal conductivity dari <i>paraffin wax</i> (W/mk)
K <sub>f</sub>	= Thermal conductivity dari <i>filler material</i> (W/mk)
∅	= Volume fraction dari <i>filler material</i>
∅m	= Ukuran serbuk dari <i>filler material</i> (m)
φ	= Konstanta berdasarkan <i>volume fraction</i> dari <i>filler material</i>
m <sub>filler</sub>	= Massa material <i>filler</i> (kg)
ρ <sub>filler</sub>	= Nilai massa jenis material <i>filler</i> (J/kg)
m <sub>paraffin</sub>	= Massa <i>paraffin</i> (kg)
ρ <sub>paraffin</sub>	= Nilai massa jenis <i>paraffin</i> (J/kg)
A	= Konstanta yang menentukan bentuk dari material <i>filler</i>
B	= Konstanta yang didapatkan berdasarkan <i>thermal conductivity</i> dari material <i>filler</i> 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*, dan *heat generation* nya. Ketiga nilai tersebut dapat dihitung berdasarkan perhitungan *mass fraction* dari PCM komposit. *Mass fraction* dari PCM dengan material *filler* dapat menentukan seberapa besar panas yang dapat diserap oleh PCM. Nilai *mass fraction* dapat digunakan untuk menentukan massa jenis PCM komposit, yang ditentukan dengan persamaan 2.20. (Samimi et al., 2016)

$$\rho_{comp} = \varphi \rho_{filler} + (1 - \varphi) \rho_{paraffin} \quad (2.20)$$

Dimana :

ρ <sub>comp</sub>	= Densitas PCM komposit (J/kg.K)
ρ <sub>paraffin</sub>	= Densitas <i>paraffin</i> (kg/m <sup>3</sup> )
ρ <sub>filler</sub>	= Densitas material <i>filler</i> (kg/m <sup>3</sup> )
φ	= <i>Mass fraction filler</i>

Untuk perhitungan *specific heat* PCM komposit (C<sub>pcomp</sub>) dapat menggunakan persamaan 2.21

$$C_{pcomp} = C_{pParaffin} \frac{\varphi (C_{pFiller} \cdot \rho_{filler}) + (1 - \varphi) (C_{pParaffin} \cdot \rho_{paraffin})}{\rho_{comp}} \quad (2.21)$$

Dimana :

C <sub>pFiller</sub>	= <i>Specific heat</i> material <i>filler</i> (J/kg.K)
C <sub>pcomp</sub>	= <i>Specific heat</i> PCM komposit (J/kg.K)
C <sub>pParaffin</sub>	= <i>Specific heat paraffin wax</i> (J/kg.K)
φ	= <i>Mass fraction filler</i>

Nilai kalor laten PCM komposit ( $L_{comp}$ ) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.22

$$L_{comp} = \frac{(1-\varphi) \cdot L_{paraffin}}{\rho_{comp}} \quad (2.22)$$

Dimana :

- $L_{comp}$  = Nilai kalor laten komposit (J/kg.K)  
 $\varphi$  = *Mass fraction filler*  
 $\rho_{filler}$  = Nilai massa jenis material *filler* (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 ( $\alpha_{comp}$ ) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.23.

$$\alpha_{comp} = \frac{k_{comp}}{\rho_{comp} \cdot C_{pcomp}} \quad (2.23)$$

Dimana :

- $\alpha_{comp}$  = *Thermal diffusivity* (kJ.kg.K)  
 $k_{comp}$  = *Thermal conductivity* dari komposit (W/mk)  
 $\rho_{comp}$  = Densitas PCM komposit (J/kg.K)  
 $C_{pcomp}$  = *Specific heat* PCM komposit (J/kg.K)

Nilai *Heat generation* dari PCM komposit dapat dihitung berdasarkan besar massa dari PCM komposit. Total massa dari PCM dan material *filler* dapat menentukan seberapa besar panas yang dapat dihasilkan oleh PCM komposit. Nilai *Heat generation* nya ditentukan dengan persamaan 2.24. (Zeyu Sun et al., 2023)

$$Q = m_{comp} C_{pcomp} (T_c - T_o) + m_{comp} L_{comp} \quad (2.24)$$

Dimana :

- $m_{comp}$  = Massa total PCM komposit (kg)  
 $C_{pcomp}$  = *Specific heat* PCM komposit (J/kg.K)  
 $T_c$  = Temperatur awal sel baterai (K)  
 $T_o$  = Temperatur akhir sel baterai (K)  
 $L_{comp}$  = Kalor laten PCM komposit

## 2.9 Computational Fluid Dynamic (CFD)

*Computational fluid dynamics* (CFD) adalah salah satu bidang yang paling cepat berkembang dalam sains. CFD lebih ekonomis dibandingkan eksperimen. Pada abad dua puluh era komputer bergerak dengan perubahan-perubahan mutakhir, dan permasalahan atau eksperimen yang sebelumnya tidak pernah dianggap mungkin dilakukan secara eksperimental atau sulit dilakukan karena sumber daya yang terbatas kini dapat dilakukan dengan teknologi modern salah satunya CFD. Dapat dikatakan CFD lebih ekonomis dibandingkan eksperimen. Dengan kemajuan teknologi komputer modern, persamaan dinamika fluida yang rumit dapat dianalisis dengan cepat dan efisien.

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*

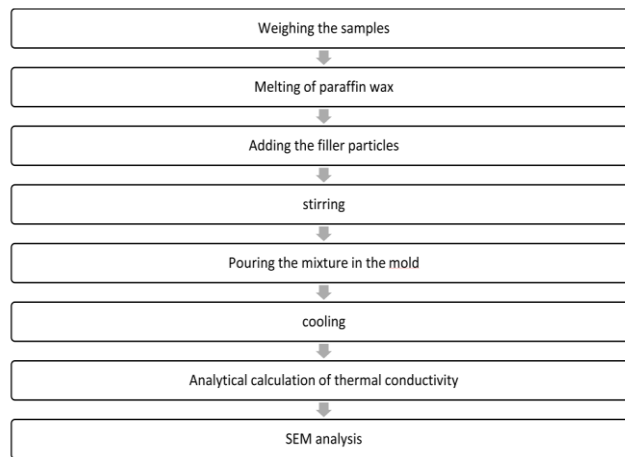
Ketika solusi dinyatakan konvergen, variabel aliran seperti kecepatan dan tekanan dapat di analisa dalam bentuk grafik. Selain itu, beberapa *software* CFD dilengkapi dengan kemampuan grafis yang dibutuhkan untuk menampilkan hasil termasuk kemampuan visual yang lain seperti animasi sehingga sering disebut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

## 2.10 Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang telah meneliti mengenai pengaplikasian material *filler* pada PCM komposit terhadap laju pemanasan baterai *Lithium ion*. Berikut beberapa penelitian yang menjadi referensi dari penulisan ini.

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

Penelitian yang dilakukan oleh Bharadwaj et al (2018) meneliti tentang peningkatan nilai konduktivitas dari PCM karena adanya penambahan serbuk grafit. Untuk proses dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.15.



**Gambar 2.15** Proses Penelitian Penambahan Serbuk Grafit  
(Bharadwaj Reddy et al., 2018)

*Parrafin wax* dipanaskan secara perlahan hingga mencapai suhu *melting point* nya, yaitu 60°C. Serbuk grafit perlahan ditambahkan ke lelehan *parrafin wax* dan diaduk secara perlahan. Campuran lalu dituang ke dalam cetakan dan didinginkan agar menjadi komposit. Waktu yang dibutuhkan saat campuran PCM meleleh dan mengeras kembali dicatat untuk setiap komposisi. Persamaan Nielsen digunakan untuk menghitung konduktivitas *thermal* pada komposit. Kita dapat membuat Grafik perbandingan *melting point* vs *volume fraction* dan *solidification time* vs *volume fraction* . Terdapat berbagai variasi hasil perhitungan waktu leleh dan waktu pengerasan yang terjadi yang dapat dilihat pada tabel 2.6.

**Tabel 2.6** Waktu Leleh dan Waktu Pengerasan  
(Bharadwaj Reddy et al., 2018)

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

Terdapat tren kenaikan *heating time* seiring meningkatnya kandungan serbuk grafit dalam *paraffin* . Ini membuktikan bahwa semakin banyak serbuk grafik dalam PCM , maka PCM akan semakin sulit untuk meleleh. Selain itu, setelah dilakukannya perhitungan konduktivitas *thermal* dengan persamaan Nielsen, dapat dibentuknya grafik perbandingan *thermal* konduktivitas dengan kandungan *parrafin* yang dapat dilihat pada tabel 2.7.

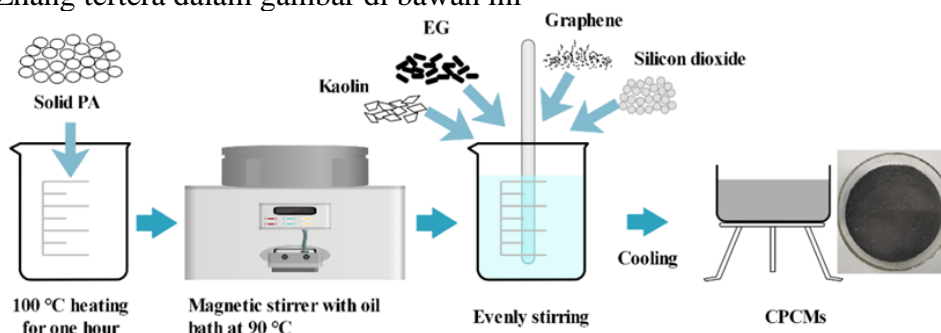
**Tabel 2.7** Nilai Konduktifitas *Thermal* pada Variasi *Volume Friction* (Bharadwaj Reddy et al., 2018)

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	-2.1

Dari tabel, dapat terlihat adanya peningkatan konduktifitas *thermal* yang signifikan dari 80 % ke 70 % kandungan paraffin. Lebih jauh lagi jika kita menambah kandungan *filler* grafit, *thermal* konduktivitas dari paraffin meningkat. Hasil ini membuktikan bahwa dengan menggunakan *filler* yang memiliki *thermal* konduktivitas yang tinggi sangat efektif untuk meningkatkan *thermal* konduktifitas dari PCM. Nilai konduktifitas termal yang tertinggi dihasilkan oleh paraffin kandungan 70 % dan nilai konduktifitas termalnya adalah 2.77 W/mk. (Bharadwaj Reddy et al., 2018)

### 2.10.2 Study on Thermal runaway Risk Prevention of Lithium ion Battery with Composite Phase Changed Materials (K. Zhang et al., 2023)

Penelitian ini dilakukan oleh (K. Zhang et al., 2023) yang membahas mengenai kemampuan dari konduktivitas termal material komposit dalam meningkatkan konduktivitas termal dari PCM *paraffin wax*. Selain itu, dalam artikel ini juga dibahas mengenai kemampuan PCM komposit dalam menurunkan temperatur permukaan dari baterai *lithium ion*. Pengujian dalam artikel ini menggunakan baterai *lithium ion* 26650 pada 3 C dengan arus *discharging*. Pada artikel ini, *paraffin* ditambahkan dengan enhanced graphene (EG), kaolin, silica, dan graphene. EG dan kaolin digunakan sebagai material support, sementara silica dan graphene digunakan sebagai *thermal conductive filler* untuk meningkatkan termal konduktivitas. Proses pembuatan variasi dan jumlah variasi yang digunakan dalam pengujian oleh Kai Zhang tertera dalam gambar di bawah ini



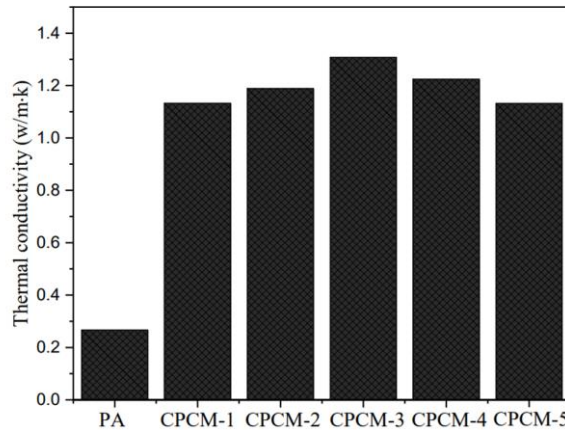
**Gambar 2.16** Langkah-Langkah Pembuatan PCM Komposit (K. Zhang et al., 2023)



**Tabel 2.8** Variasi Kandungan PCM Komposit pada Pengujian  
(K. Zhang et al., 2023)

Samples	PA	EG	Kaolin	Graphene	Silicon Dioxide
CPCM-1	75%	7%	3%	0%	15%
CPCM-2	75%	7%	3%	5%	10%
CPCM-3	75%	7%	3%	7.5%	7.5%
CPCM-4	75%	7%	3%	10%	5%
CPCM-5	75%	7%	3%	15%	0%

Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan data konduktivitas termal pada masing – masing variasi PCM komposit dapat dilihat pada gambar 2.17.

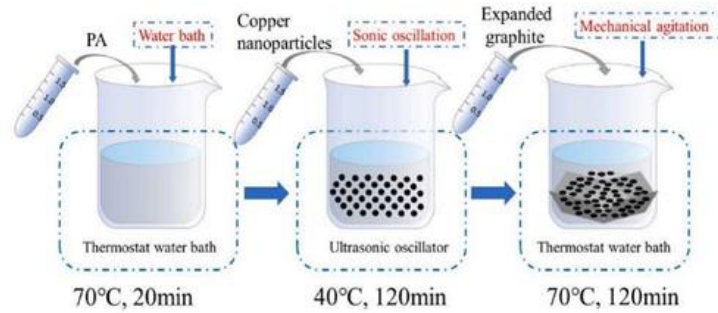


**Gambar 2.17** Grafik Perbandingan *Thermal Conductivity* PCM Murni dengan Komposit  
(K. Zhang et al., 2023)

Dari gambar 2.28, pada variasi CPCM - 1 dan CPCM - 2, terlihat terjadi peningkatan nilai konduktivitas termal sebesar 325,5 % dan 325,1 % yang lebih tinggi dibandingkan dengan *paraffin* murni. Konduktivitas termal tertinggi berada pada variasi CPCM – 3 di mana ditambahkan material *hybrid thermally conductive fillers* dengan rasio silika dan grafite sebesar 1 : 1. Hal ini dikarenakan penambahan *hybrid thermally conductive filler* dapat mengurangi kelemahan konduksi termal *paraffin* yang rendah sekaligus memperluas area kontak dari *paraffin* murni.

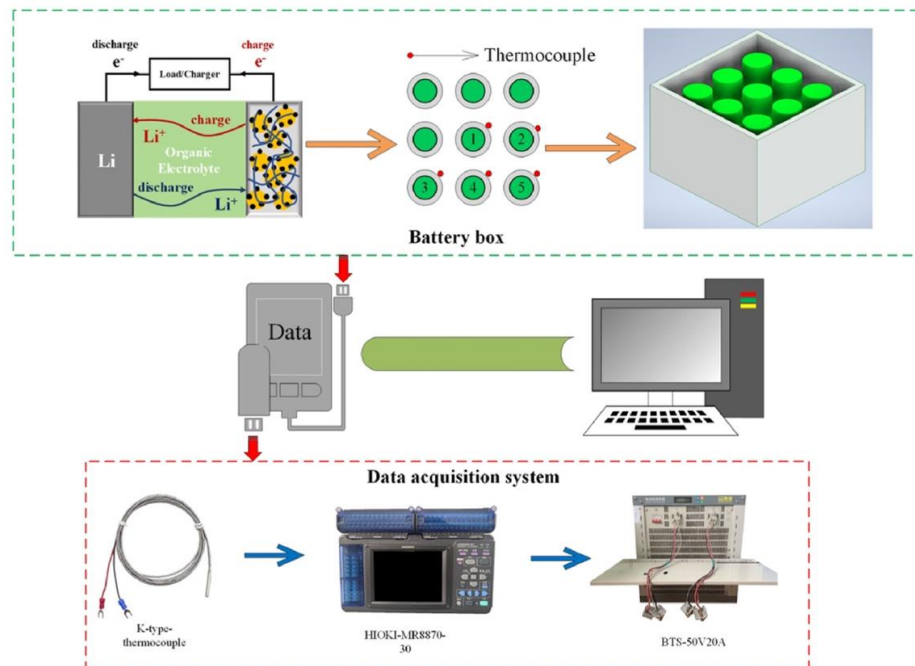
### 2.10.3 A Copper Nanoparticle Enhanced Phase change material with High Thermal Conductivity and Latent Heat for Battery Thermal Management (Ma et al., 2022)

Penelitian yang dilakukan oleh (Ma et al., 2022) telah meneliti tentang penggunaan PCM dari campuran *paraffin*, serbuk grafit dan serbuk tembaga, dimana penelitian ini menghasilkan peningkatan nilai konduktivitas dari PCM komposit. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa campuran dari *paraffin*, serbuk grafit, dan serbuk tembaga dapat mengontrol suhu baterai dengan baik dalam kisaran yang aman. Untuk proses dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.18.



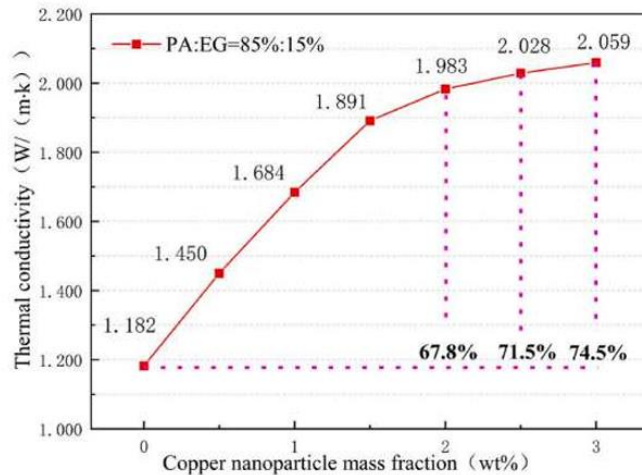
**Gambar 2.18** Langkah-Langkah Pembuatan PCM Komposit (Ma et al., 2022)

PCM komposit dibuat dengan metode dua langkah pencampuran leleh. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.18, *paraffin* dicairkan dalam pemanas air bersuhu 70°C selama 20 menit, kemudian Copper Nanoparticle ditambahkan ke dalam osilator ultrasonik pada suhu 40°C selama 120 menit, dan Expanded Graphite ditambahkan untuk pengadukan mekanis selama 120 menit. Oleh karena itu, ketiga material tersebut digabungkan untuk mendapatkan material perubahan fasa komposit PA/EG/CN.



**Gambar 2.19** Langkah-Langkah Pengujian Baterai *Lithium ion* (Ma et al., 2022)

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19, sistem eksperimen baterai terdiri dari kotak baterai, sistem pengujian baterai (BTS) dan sistem akuisisi data. Struktur baterai disusun dalam rangkaian sebanyak 9 buah baterai, jarak antar baterai yang berdekatan adalah 7 mm, dan ukuran kotak baterai adalah 102 × 102 × 80 mm<sup>3</sup>. Termokopel tipe K mengukur suhu baterai litium, dan selnya dibungkus dengan aluminium *foil*. PCM komposit bubuk diisi ke dalam kotak baterai yang dirancang.

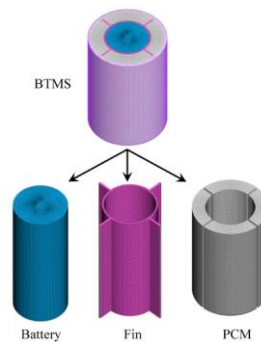


**Gambar 2.20** Grafik *Thermal Conductivity* PCM Komposit (Ma et al., 2022)

Pada gambar 2.20 menunjukkan bahwa konduktivitas termal tanpa penambahan serbuk tembaga adalah 1,182 W/m.K, konduktivitas termal meningkat secara linier setelah penambahan serbuk tembaga. Konduktivitas termal meningkat sebesar 67,8% ketika penambahan serbuk tembaga sebesar 2,0%. Jika jumlah penambahannya melebihi 2,0% maka peningkatan konduktivitas termalnya tidak signifikan, yaitu hanya meningkat sebesar 8%. Menambahkan nanopartikel tembaga dapat secara efektif meningkatkan konduktivitas termal PCM komposit, namun konduktivitas termal cenderung bernilai konstan. Oleh karena itu, rasio penambahan optimal nanopartikel tembaga adalah lebih dari 2,0% berat.

**2.10.4 Thermal management of a simulated battery with the compound use of phase change material and fins: Experimental and numerical investigations** (Zhiqiang Sun et al., 2021)

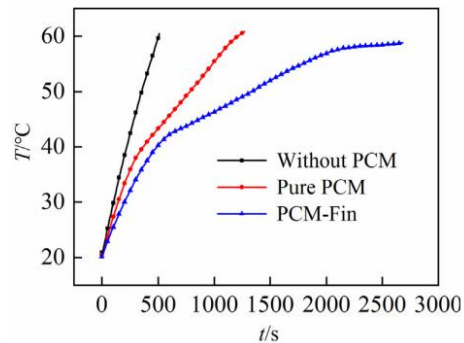
Penelitian yang dilakukan oleh (Sun et al, 2021) merancang sistem manajemen termal berbasis material perubahan fase (PCM) yang biasanya memiliki konduktivitas termal yang rendah. Untuk meningkatkan transfer panas, penulis menyarankan struktur sirip baru yang terdiri dari sirip longitudinal dan cincin silinder. Struktur sirip yang dirancang oleh penulis dapat dilihat pada gambar 2.21.



**Gambar 2.21** Susunan Pendingin BTMS (Zhiqiang Sun et al., 2021)

Eksperimen dilakukan untuk membandingkan performa termal dari beberapa sistem BTMS yang berbeda, dan hasilnya menunjukkan bahwa sistem PCM-*Fin* lebih baik daripada sistem baterai murni dan sistem PCM lainnya. Simulasi numerik juga dilakukan, yang menunjukkan bahwa struktur sirip meningkatkan luas transfer panas dan memperkenalkan

jaringan konduktif termal dalam PCM, yang meningkatkan perforasi. Selain itu, penelitian ini menyelidiki dampak posisi cincin, jumlah sirip dan cincin, dan laju penghasilan panas terhadap kinerja manajemen termal.

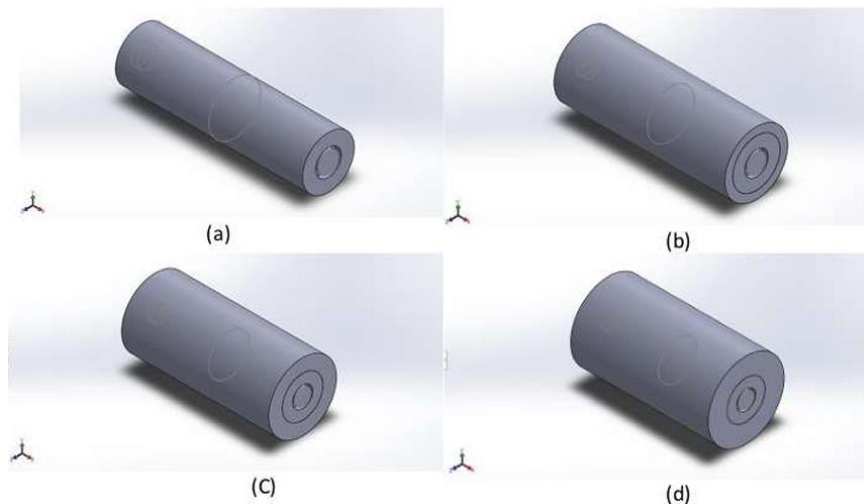


**Gambar 2.22** Perbandingan *thermal management system* antara sistem baterai (Zhiqiang Sun et al., 2021)

Pada gambar 2.22, hasilnya menunjukkan bahwa sistem PCM-Fin dapat mengontrol kenaikan suhu baterai bahkan dengan laju penghasilan panas 20 W lebih baik daripada sistem baterai murni dan sistem PCM lainnya. Selain itu, struktur sirip dapat meningkatkan luas transfer panas dan meningkatkan jaringan konduktif termal dalam PCM. (Zhiqiang Sun et al., 2021)

### 2.10.5 *Thermal Management System Using Phase change material for Lithium ion Battery* (Grimonia et al., 2021)

Penelitian yang dilakukan oleh Grimonia et al., (2021) telah meneliti tentang studi numerik variasi ketebalan PCM terbaik untuk sistem pendinginan baterai *lithium 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 2.23.



**Gambar 2.23** Geometri Modul Baterai (a) Tanpa PCM (b) PCM Ketebalan 3 mm (c) PCM Ketebalan 6 mm (d) PCM Ketebalan 9 mm (Grimonia et al., 2021)

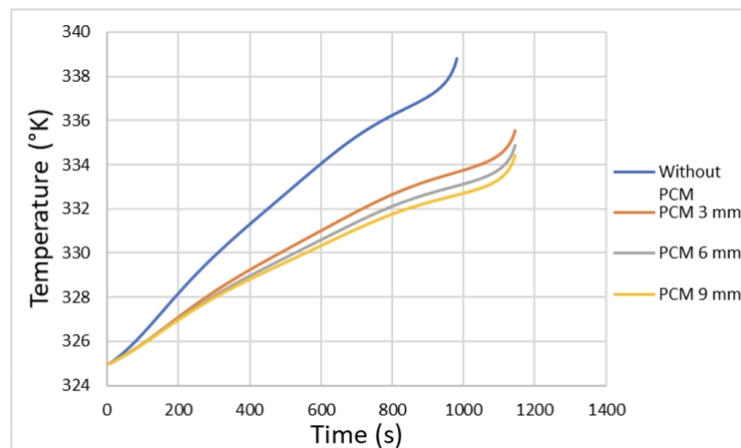
Studi numerik dalam penelitian ini menggunakan *Computational Fluid Dynamic* untuk menghitung dan menganalisis *heat transfer* dari sistem manajemen baterai. *Meshing* dilakukan dengan menggunakan *Tetrahedral mesh*. Dinding luar dari baterai *lithium ion* ditetapkan sebagai *free convection*. Keefisien *heat transfer* dan input lain dalam studi numerik tercantum dalam tabel berikut ini.

**Tabel 2.9** Parameter Simulasi  
(Grimonia et al., 2021)

Data	Besar	Satuan
<i>Cell Capacity</i>	2	Ah
<i>Discharge Rate</i>	3	-
<i>Initial DoD</i>	0	-
Densitas	2604.92	Kg/m <sup>3</sup>
<i>Specific heat</i>	894	J/Kg.K
Konduktivitas <i>Thermal</i>	1.035	W/m.K
<i>Convection Heat Rate</i>	7	W/m <sup>2</sup> .K
<i>Free Stream Temperature</i>	306	K
<i>Heat generation Rate</i>	181466.2	W/m <sup>3</sup>

Untuk memastikan keabsahan dalam melakukan studi numerik, dilakkan pula eksperimen dengan menggunakan model, set up, dan baterai *lithium ion* yang sama. Setelah didapatkan data temperatur maksimum dari eksperimen dan numerik, kedua data temperatur kemudian dibandingkan dan dicari rentan *error* di antara kedua data tersebut. Kalkulasi *error* antara hasil eksperimen dan numerik sebesar 8,3 yang tergolong kecil.

Dari hasil simulasi meggunakan CFD, didapatkan hubungan antara ketebalan dan temperatur baterai *lithium ion* yang tergambarkan pada gambar 2.24.



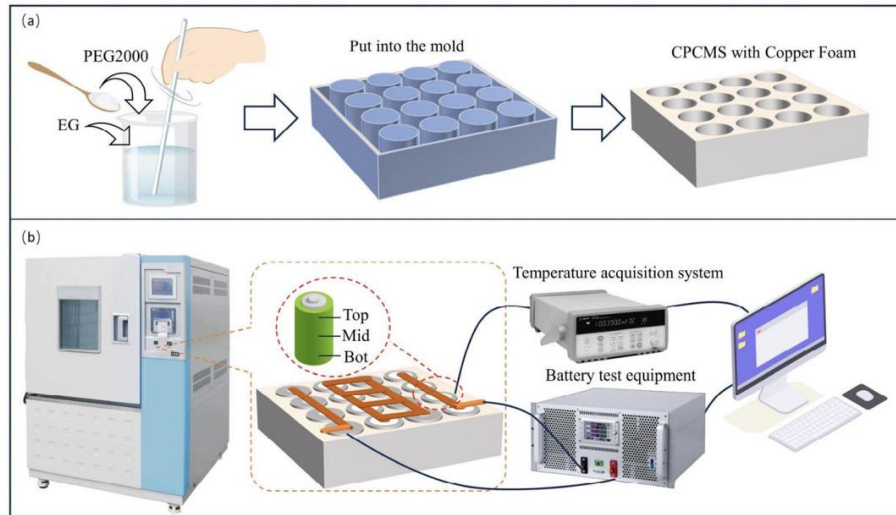
**Gambar 2.24** Grafik Perbandingan Temperatur Baterai *Lithium ion*  
(Grimonia et al., 2021)

Pada gambar 2.24, PCM mampu mendinginkan baterai dengan baik daripada baterai yang tidak menggunakan PCM. Walaupun demikian, PCM murni masi belum mampu untuk menjaga baterai berada pada temperatur operasional baterai yang direkomendasikan oleh manufaktur sebesar 50°C. Diantara ketiga ketebalan PCM, ketebalan 3 mm menghasilkan temperatur maksimal paling tinggi diantara ketebalan lainnya. Sementara itu, temperatur

maksimal paling rendah pada baterai *lithium ion* berhasil dicapai oleh PCM dengan ketebalan 9 mm.

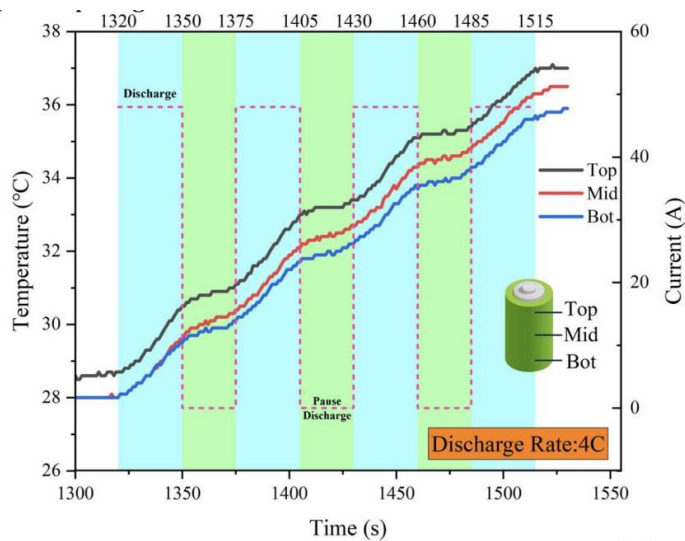
**2.10.6 Experimental Study of a Passive Thermal Management System Using Expanded Graphite/Polyethylene Glycol Composite for Lithium ion Batteries** (Xia et al., 2023)

Penelitian yang dilakukan oleh (Xia et al., 2023) telah meneliti mengenai efektivitas PCM komposit dalam menurunkan temperatur kedua baterai, meminimalkan perbedaan temperatur pada masing-masing baterai *lithium ion* pada *c-rate* yang meningkat secara bertahap, dan menurunkan temperatur maksimal dari baterai *lithium ion*. Langkah persiapan yang dilakukan untuk membuat PCM komposit ditunjukkan oleh gambar 2.25.



**Gambar 2.25** Set up Pengujian Baterai *Lithium ion* (Xia et al., 2023)

Pengujian temperatur baterai disesuaikan dengan kondisi testing baterai PCM. Penggunaan dari kendaraan listrik pada umumnya menggunakan *discharge rate* yang tidak lebih dari 4C sehingga eksperimen dilakukan pengujian pada 4C dengan kondisi dinamis. Pengujian ini menghasilkan hubungan antara kenaikan temperatur pada posisi *thermocouple* yang berbeda pada permukaan baterai. Hubungan tersebut digambarkan pada gambar 2.26.

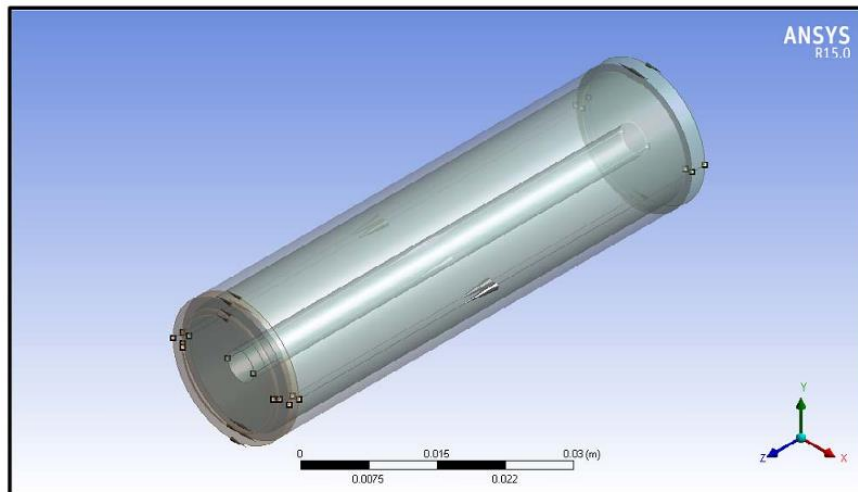


**Gambar 2.26** Grafik Temperatur pada Permukaan Baterai *Lithium ion* (Xia et al., 2023)

Dari gambar 2.26, diketahui bahwa temperatur maksimal pada *thermocouple* pada posisi atas, tengah, dan bawah masing-masing adalah 37 °C, 36,5 °C, dan 35,9 °C. Dari sini, disimpulkan bahwa selama pengujian dengan rapid *discharge*, suhu pada bagian atas baterai selalu lebih besar dibandingkan pada tengah dan bawah.

### 2.10.7 *Electrochemical thermal modelling and experimental measurements of 18650 cylindrical lithium ion battery during discharge cycle for an EV* (Panchal et al., 2018)

Penelitian yang dilakukan oleh (Panchal et al., 2018) meneliti tentang studi numerik yang dilakukan pada sel baterai silindris 18650 menggunakan model elektrokimia termal untuk memverifikasi hasil eksperimen. Geometri baterai yang diteliti termasuk sejumlah sel individu yang terhubung secara paralel, di mana setiap sel mengandung elektroda negatif, separator, dan elektroda positif, yang dikelilingi oleh kolektor arus di kedua sisinya. Model geometri dari studi numerik ditunjukkan oleh gambar 2.27



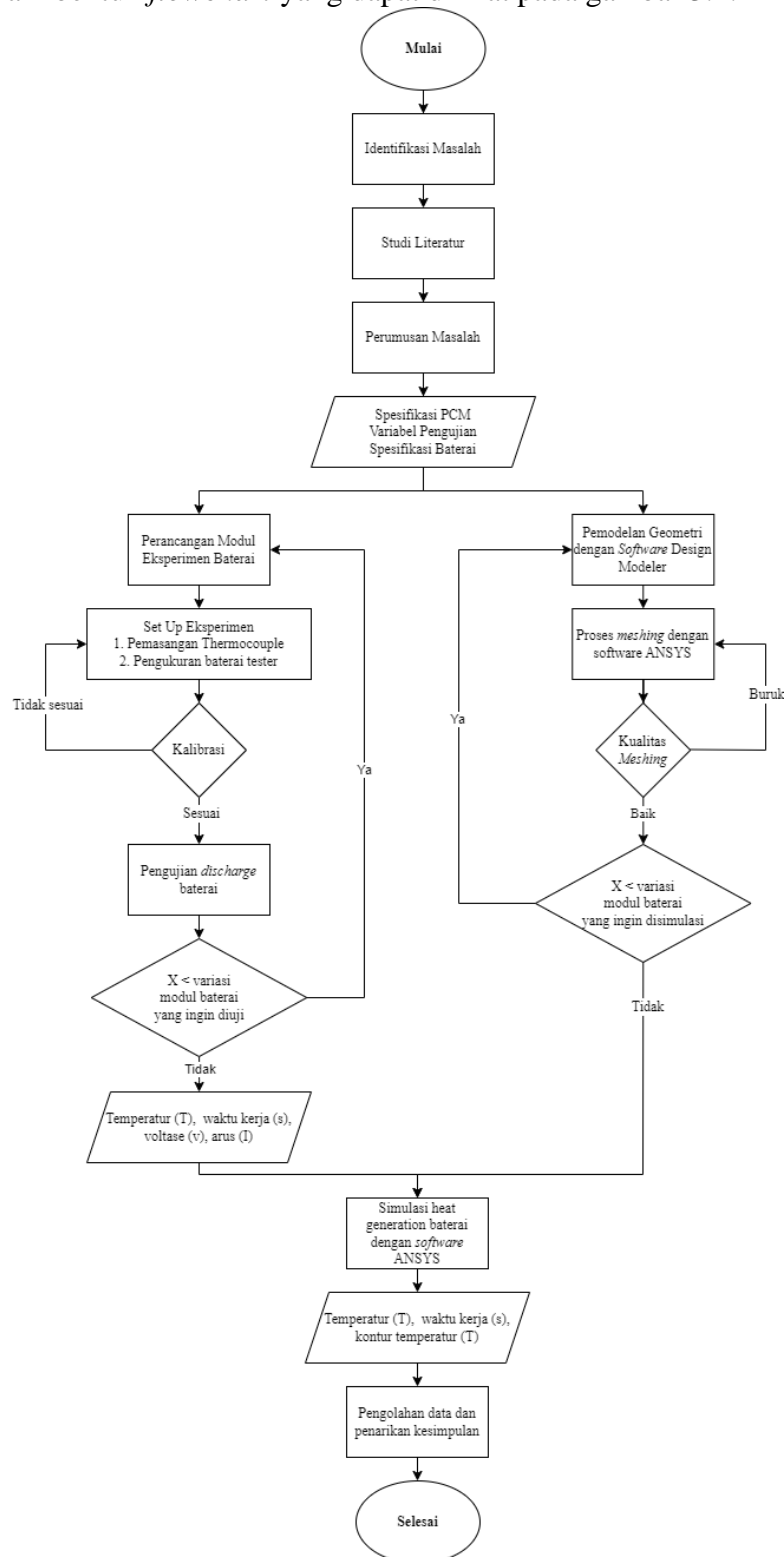
**Gambar 2.27** Model Geometri Baterai Lihium Ion 18650 untuk Studi Numerik (Panchal et al., 2018)

Dari hasil simulasi, panas dihasilkan hanya dari katoda baterai, lalu merambat ke bagian luar baterai, yang menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan ini memfokuskan sumber panas pada komponen spesifik di dalam sel baterai.

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Diagram alir penelitian

Adapun eksperimen dilakukan dengan tahapan yang sistematis dan terstruktur serta digambarkan dalam bentuk *flowchart* yang dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



### 3.2 Studi Literatur

Pada tahapan ini, berbagai macam literatur yang berhubungan dengan tugas akhir akan dipelajari oleh penulis. Pada tahap ini juga, studi dengan mengumpulkan jurnal, buku, maupun artikel yang berhubungan dengan topik penelitian yang dilakukan dilakukan oleh penulis. Dari studi yang dilakukan, penulis memperoleh informasi tentang sistem manajemen termal pada baterai, material metal-fin, karakteristik baterai *Lithium ion*, karakterististik dan jenis – jenis PCM.

### 3.3 Perumusan Masalah

Pada tahapan ini masalah yang ditemukan dari proses studi literatur dirumuskan oleh penulis untuk dipecahkan dalam penelitian. Tahapan ini bertujuan untuk memfokuskan tujuan penelitian dan membantu peneliti untuk dapat memecahkan masalah secara jelas dan terinci melalui pengumpulan dan analisa 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 *lithium 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*, serbuk aluminium, serbuk silika, serbuk tembaga dan serbuk grafit

#### 3.4.1 Data Spesifikasi Baterai *Lithium ion*

Baterai lithium-ion yang dipakai untuk pengujian adalah *lithium ion* jenis VRK 18650. Data spesifikasi baterai ditunjukkan pada tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Spesifikasi baterai *Lithium ion*

Besaran	Besaran	Data
m	Massa	60 gram
D	Diameter	65 mm
h	Tinggi	18 mm
Tb	Temperatur operasional baterai	-10 °C s/d 60 °C
I	<i>Continuous Discharge Current</i>	26,5 A
I <sub>m</sub>	<i>Maximum Discharge Current</i>	40 A
It	Kapasitas baterai	3000 mAh
C-rate	<i>Maximum Charging rate</i>	5 C+
V	Nominal <i>Voltage</i>	3,7 Volt
E	<i>Open Circuit Voltage</i>	4,2 Volt
CC	<i>Charging Capacity</i>	1.5 A
Cycle	Umur <i>cycle</i>	300 <i>cycles</i>

#### 3.4.2 Data Spesifikasi *Phase Change Material*

Berdasarkan jurnal ilmiah yang dipublikasikan (Bharadwaj Reddy et al., 2018) tentang penambahan partikel pengisi berupa bubuk grafit untuk meningkatkan konduktivitas termal dari *paraffin wax* sebagai PCM komposit ditunjukkan dalam tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Spesifikasi *Phase Change Material*

Besaran	Besaran	Data
$\rho_{solid}$	Densitas <i>solid</i>	910 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{liquid}$	Densitas <i>liquid</i>	790 kg/m <sup>3</sup>
$C_p_{solid}$	<i>Specific heat Capacity (Solid)</i>	2 kJ/Kg.K
$C_p_{liquid}$	<i>Specific heat Capacity (Liquid)</i>	2.15 kJ/Kg.K
k	Konduktivitas Termal	0,24 W/mK
Q Laten	Kalor Laten	190 kJ/kg
$T_{melting}$	Suhu leleh	44°C

### 3.4.3 Data Spesifikasi Serbuk Grafit

Berdasarkan jurnal ilmiah yang dipublikasikan (Bharadwaj Reddy et al., 2018) tentang penambahan partikel pengisi berupa bubuk grafit untuk meningkatkan konduktivitas termal dari *paraffin wax* sebagai PCM komposit, diperoleh data spesifikasi bubuk grafit seperti ditunjukkan dalam tabel 3.3.

**Tabel 3.3** Spesifikasi Serbuk Grafit

Besaran	Besaran	Data
$\rho$	Densitas	2250 kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	<i>Specific heat</i>	707,7 J/kgK
k	Konduktivitas Termal	80 W/mK
$T_{melting}$	<i>Temperature leleh</i>	3650°C

### 3.4.4 Data Spesifikasi Serbuk Aluminium

Berdasarkan jurnal ilmiah yang dipublikasikan (Elshaer et al., 2024) tentang pengaruh penambahan *aluminium* terhadap PCM berbasis garam pada *thermal managment* benda elektronik didapatkan data spesifikasi yang terbuat dari material aluminium ditunjukkan pada tabel 3.4.

**Tabel 3.4** Spesifikasi serbuk aluminium

Besaran	Besaran	Data
$\rho$	Densitas	2698 kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	<i>Specific heat</i>	900 J/KgK
k	Konduktivitas Termal	210 W/mK
$T_{melting}$	<i>Temperature Leleh</i>	660.37°C

### 3.4.5 Data Spesifikasi Serbuk Silika

Berdasarkan jurnal ilmiah yang dipublikasikan (Intang, 2020) tentang pengaruh berbagai jenis silika dengan ketebalan yang bervariasi, diperoleh data spesifikasi serbuk silika seperti ditunjukkan dalam tabel 3.5.

**Tabel 3.5** Spesifikasi Serbuk Silika

Besaran	Besaran	Data
$\rho$	Densitas	2800 kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	<i>Specific heat</i>	1200 J/kgK
k	Konduktivitas Termal	1,5 W/mK
$T_{melting}$	<i>Temperature Leleh</i>	1200°C

### 3.4.6 Data Spesifikasi Serbuk Tembaga

Berdasarkan jurnal ilmiah yang dipublikasikan (Xie, 2023) tentang PCM yang memakai serbuk tembaga untuk *Battery Thermal Management System*, diperoleh data spesifikasi serbuk silika seperti ditunjukkan dalam tabel 3.6.

**Tabel 3.6** Spesifikasi Serbuk Tembaga

Besaran	Besaran	Data
$\rho$	Densitas	8930 kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	<i>Specific heat</i>	385 J/kgK
k	Konduktivitas Termal	398 W/mK
$T_{melting}$	Temperatur Leleh	1083.2 – 1083.6°C


### 3.5 Persiapan Pengujian

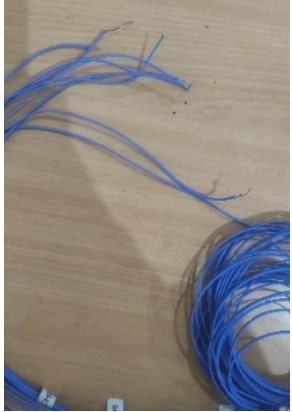
Sebelum melakukan eksperimen, terlebih dahulu dilakukan persiapan dan pembuatan modul baterai yang akan dianalisa.

#### 3.5.1 Bahan dan Alat





Pada percobaan ini diperlukan beberapa peralatan untuk menunjang proses berlangsungnya percobaan yang akan dilakukan. Berikut peralatan dan material yang diperlukan disajikan dalam tabel 3.7.




**Tabel 3.7** Alat dan Material yang Digunakan dalam Eksperimen





No.	Bahan dan Alat	Fungsi	Gambar
1.	Baterai <i>Lithium ion</i>	Sebagai objek yang akan digunakan untuk meneliti keandalan PCM komposit dalam menurunkan laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai <i>Lithium ion</i>	
2.	Baterai Tester (ZKETECH, EBC-A40L)	Alat yang digunakan untuk melakukan proses <i>charging</i> dan <i>discharging</i> pada baterai <i>lithium ion</i> . Alat ini juga berperan sebagai <i>data logger</i> yang mencatat nilai tegangan ( <i>voltage</i> ) dan arus ( <i>current</i> ) selama proses <i>discharging</i> .  <b>Spesifikasi :</b> - <i>Voltage Range</i> : 0 – 5V	

		<p>-Voltage Capacity : 0.1 – 40 A</p> <p>- Discharging mode : CC (Constan Curent discharge)/CP (Constan Power)</p> <p>- Charging mode : CV (constan current) and constant voltage charging.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacity measurement : Within 10 Ah, resolution 0.01 Ah.</li> <li>• 10 Ah – 100 Ah, resolution 0.01 Ah.</li> <li>• 100 Ah or more, resolution 0.1 Ah.</li> </ul> <p>- Heat dissipation : fan active cooling</p> <p>- Tester power supply : AC 200-240v</p> <p>-Weight : 4.2 kg</p> <p>- Voltage : 0.2% ± 0.03 V</p> <p>- Discharge power : Maks 200 W</p> <p>- Manufacture : ZKE</p>	
3.	<p><i>Thermocouple 8 Channel</i> Applent AT4808</p>	<p>Digunakan untuk mengukur suhu pada permukaan baterai selama proses <i>discharging</i>. <i>Thermocouple</i> ini terdiri dari beberapa kabel yang mampu mendeteksi perubahan suhu secara akurat pada beberapa titik berbeda secara simultan.</p> <p><b>Spesifikasi :</b></p> <p>-Accuracy : 0.2 % ± 1°C</p> <p>-Range : -200 °C - 1800 °C</p> <p>-Resolution : 0.1°C</p> <p>-Channel : 8</p>	

4.	<i>Temperature Data logger</i>	<p>Digunakan untuk mencatat data suhu yang terdeteksi oleh <i>thermocouple</i> setiap satuan waktu.</p> <p><b>Spesifikasi :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-<i>Maximum speed</i> : 100 ms/channel</li> <li>-<i>Interface</i> RS232C, U-disc, USB</li> <li>-<i>Software</i> : ATS45</li> <li>-<i>Cold junction accuracy</i> : 0.5°C</li> <li>-<i>Power supply voltage</i> : 85VAC~260VAC</li> <li>-<i>Power supply frequency</i> : 50Hz/60Hz</li> <li>-<i>Power supply power</i> : 10VA</li> <li>-<i>Dimension &amp; Weight</i> : 216 x 88 x 300 mm &amp; 3kg</li> </ul>	
5.	<i>Flashdisk</i>	<p>Digunakan untuk menyimpan data suhu yang diperoleh dari <i>temperature data logger</i>. Fungsi utama alat ini adalah sebagai media penyimpanan portabel yang memungkinkan transfer data suhu dari <i>temperature data logger</i> ke komputer.</p>	
6.	<i>Styrofoam box</i>	<p>Digunakan untuk wadah pengujian baterai selama proses <i>discharging</i>. Fungsi utama dari box ini adalah untuk mengisolasi baterai dari pengaruh suhu ruangan, sehingga menjaga kondisi suhu di dalam kotak tetap adiabatik.</p> <p><b>Dimensi :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Panjang luar : 0.34 m</li> <li>-Lebar luar : 0.25 m</li> <li>-Tinggi luar : 0.305 m</li> <li>-Panjang dalam : 0.295 m</li> <li>-Lebar dalam : 0.205 m</li> <li>-Tinggi dalam : 0.255 m</li> <li>-Tebal : 0.045 m</li> </ul>	

7.	AVO meter	Digunakan untuk melihat tegangan baterai dan arus yang mengalir pada modul baterai.	
8.	Solder	Digunakan untuk merangkai dan menyambungkan kutub positif dan negatif baterai dengan kabel.	
9.	Timbangan berbasis digital	Digunakan untuk menimbang massa dari <i>paraffin wax</i> dan material <i>filler</i> .	
10.	<i>Paraffin wax</i>	Digunakan sebagai material berubah fase (PCM) untuk mengisi celah antar sel baterai dengan PCM komposit.	

11.	Serbuk Silika	Digunakan sebagai partikel pengisi ( <i>material filler</i> ) kedalam matriks <i>paraffin wax</i> untuk pembuatan PCM komposit.	
12.	Serbuk Aluminium	Digunakan sebagai partikel pengisi ( <i>material filler</i> ) kedalam matriks <i>paraffin wax</i> untuk pembuatan PCM komposit.	
13.	Serbuk Grafit	Digunakan sebagai partikel pengisi ( <i>material filler</i> ) kedalam matriks <i>paraffin wax</i> untuk pembuatan PCM komposit .	
14.	Serbuk Tembaga	Digunakan sebagai partikel pengisi ( <i>material filler</i> ) kedalam matriks <i>paraffin wax</i> untuk pembuatan PCM komposit.	

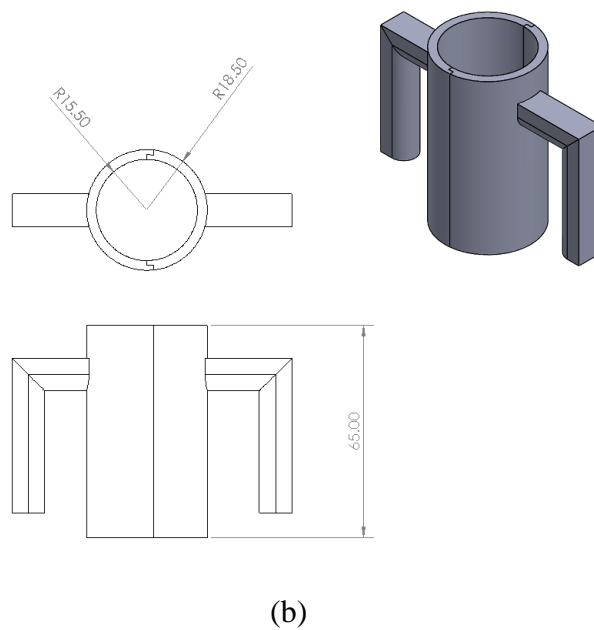
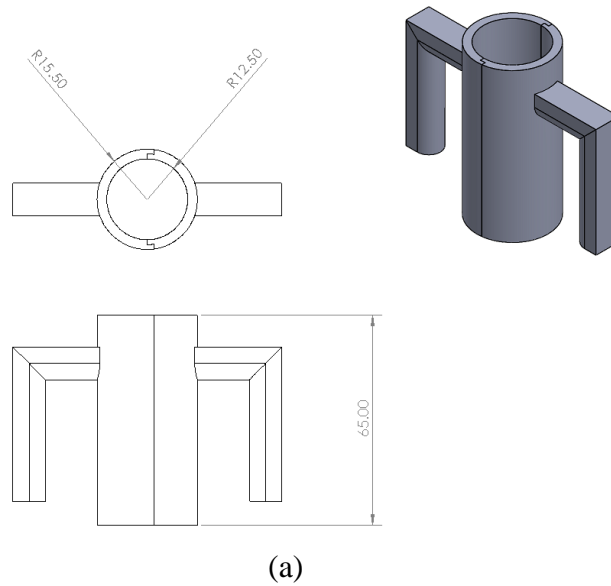
15.	Akrilik	<p>Digunakan untuk penyangga baterai di dalam <i>Styrofoam box</i> agar baterai tetap berdiri tegak dan stabil di tengah-tengah kotak.</p> <p><b>Dimensi :</b>          -Panjang : 0.04 m          -Lebar : 0.015 m          -Tinggi : 0.14 m          -Tebal : 0.002 m</p>	
16.	Komputer	<p>Digunakan sebagai tempat pengolahan data <i>temperature</i>, <i>voltage</i>, dan arus.</p>	
17.	<i>Thermal Gun</i>	<p>Digunakan untuk mengukur suhu permukaan baterai sebelum dilakukan pengujian. Fungsi utama alat ini adalah memastikan bahwa suhu awal baterai seragam antar berbagai variasi material <i>filler</i>.</p>	
18	Kompor	<p>Digunakan untuk memanaskan PCM hingga mencapai suhu lelehnya, sehingga PCM berubah menjadi cairan dan bisa dicampur secara homogen dengan material <i>filler</i>.</p>	

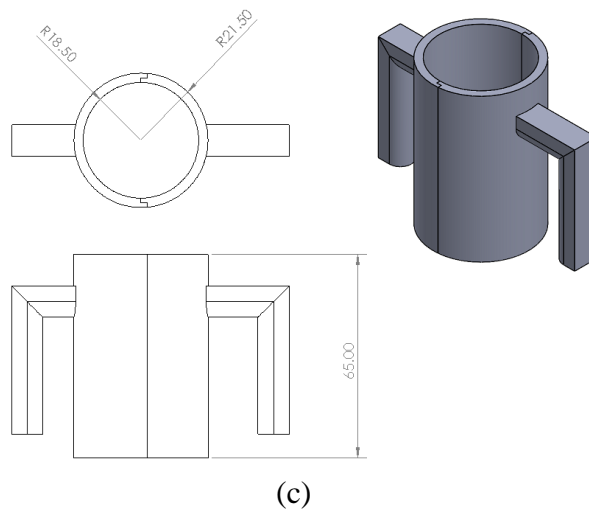
### 3.5.2 Pembuatan Modul baterai

#### A. Desain cetakan PCM untuk rangkaian baterai

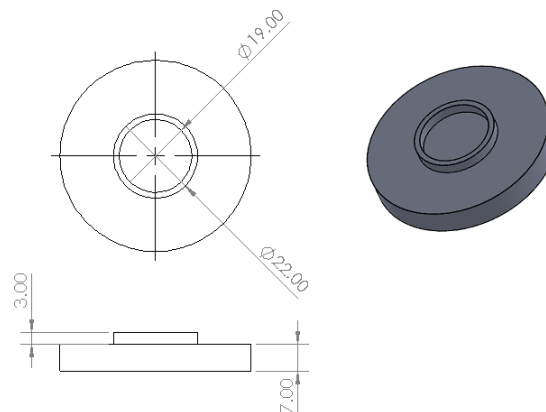


Tahap ini merupakan perancangan cetakan PCM (*Phase change material*) agar PCM dapat menempel dengan baik pada permukaan baterai. PCM digunakan sebagai bahan untuk sistem pendinginan baterai sehingga dapat mengoptimalkan penyerapan dan pelepasan panas selama pengujian. Cetakan PCM dibuat menggunakan 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. Adapun desain 3D dari cetakan PCM dan penahan baterai ditunjukkan pada gambar 3.2 dan gambar 3.3.





**Gambar 3.2** *Design 3D* Cetakan PCM untuk Baterai (a) Cetakan PCM 3mm (b) Cetakan PCM 6mm (c) Cetakan PCM 9mm



**Gambar 3.3** *Design 3D* Penahan Baterai

Adapun bentuk dari cetakan PCM dan penahan baterai yang telah dicetak oleh *print 3D* dapat dilihat pada gambar 3.3



**Gambar 3.4** Hasil *Print-3D* dari Cetakan PCM dan Penahan Baterai

#### B. Pembuatan Komposit PCM

Berdasarkan jurnal ilmiah yang berjudul “Enhancement of Thermal Conductivity of PCM Using Filler Grafit Powder” yang dipublikasikan oleh (Bharadwaj Reddy et al., 2018) prosedur pembuatan Komposit PCM dengan material campuran *paraffin wax* dan bubuk grafit adalah sebagai berikut :

- a) Pembuatan PCM dengan *Paraffin wax* Murni
  1. Material bahan baku yang terdiri dari *paraffin wax* dipersiapkan.
  2. Massa *paraffin wax* ditimbang sesuai dengan ketebalan cetakan baterai dan PCM. Tabel berikut (Tabel 3.8) menunjukkan massa *paraffin wax* yang dibutuhkan untuk masing-masing ketebalan cetakan.

**Tabel 3.8** Massa *Paraffin wax* Berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai PCM

Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM (mm)	Massa <i>Paraffin wax</i> (gram)
3	15
6	30
9	45

3. *Paraffin wax* yang telah ditimbang dipanaskan menggunakan kompor sampai mencapai suhu 60°C. Proses pemanasan harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan *paraffin wax* mencair sepenuhnya tanpa terbakar atau mengalami degradasi termal.
4. Setelah *paraffin wax* mencair, cairan *wax* tersebut dituangkan ke dalam cetakan baterai dan PCM. Pastikan penuangan dilakukan secara merata
- b) Pembuatan PCM Komposit dengan material *filler* serbuk Aluminium
  1. Bahan baku yang terdiri dari *paraffin wax* dan serbuk Aluminium dipersiapkan terlebih dahulu. Pastikan kedua bahan dalam kondisi bersih dan siap untuk dicampur.
  2. Massa *paraffin wax* dan serbuk Aluminium ditimbang sesuai dengan ketebalan cetakan baterai dan PCM serta rasio *filler* yang digunakan, yaitu 0.3. Tabel berikut (Tabel 3.9) menunjukkan massa *paraffin wax* dan serbuk Aluminium yang dibutuhkan untuk masing-masing ketebalan cetakan.

**Tabel 3.9** Massa *Paraffin wax* dan Serbuk Aluminium Berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM

Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM (mm)	Rasio <i>Filler</i>	Massa Serbuk Aluminium (gram)	Massa <i>Paraffin wax</i> (gram)
3	0.3	4.5	15
6	0.3	9	30
9	0.3	13.5	45

3. *Paraffin wax* yang telah ditimbang dipanaskan menggunakan kompor sampai mencapai suhu 60°C. Proses pemanasan harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan *paraffin wax* mencair sepenuhnya tanpa terbakar atau mengalami degradasi termal.
4. Serbuk Aluminium ditambahkan ke dalam panci yang berisi *paraffin wax* yang sudah mencair.
5. Campuran *paraffin wax* dan serbuk Aluminium diaduk menggunakan sendok selama 3 menit. Pengadukan harus dilakukan secara merata untuk memastikan distribusi serbuk Aluminium dalam *paraffin wax* homogen.
6. Setelah tercampur dengan baik, campuran *paraffin wax* dan serbuk Aluminium dituangkan ke dalam cetakan baterai dan PCM. Pastikan penuangan dilakukan secara merata.

c) Pembuatan PCM Komposit dengan material *filler* serbuk Grafit

1. Bahan baku yang terdiri dari *paraffin wax* dan serbuk Grafit dipersiapkan terlebih dahulu. Pastikan kedua bahan dalam kondisi bersih dan siap untuk dicampur.
2. Massa *paraffin wax* dan serbuk Grafit ditimbang sesuai dengan ketebalan cetakan baterai dan PCM serta rasio *filler* yang digunakan, yaitu 0.3. Tabel berikut (Tabel 3.10) menunjukkan massa *paraffin wax* dan serbuk Grafit yang dibutuhkan untuk masing-masing ketebalan cetakan.

**Tabel 3.10** Massa *Paraffin wax* dan Serbuk Grafit Berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM

Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM (mm)	Rasio <i>Filler</i>	Massa Serbuk Grafit (gram)	Massa <i>Paraffin wax</i> (gram)
3	0.3	4.5	15
6	0.3	9	30
9	0.3	13.5	45

3. *Paraffin wax* yang telah ditimbang dipanaskan menggunakan kompor sampai mencapai suhu 60°C. Proses pemanasan harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan *paraffin wax* mencair sepenuhnya tanpa terbakar atau mengalami degradasi termal.
4. Serbuk Grafit ditambahkan ke dalam panci yang berisi *paraffin wax* yang sudah mencair.
5. Campuran *paraffin wax* dan serbuk Grafit diaduk menggunakan sendok selama 3 menit. Pengadukan harus dilakukan secara merata untuk memastikan distribusi serbuk Aluminium dalam *paraffin wax* homogen.

6. Setelah tercampur dengan baik, campuran *paraffin wax* dan serbuk Grafit dituangkan ke dalam cetakan baterai dan PCM. Pastikan penuangan dilakukan secara merata.
- d) Pembuatan PCM Komposit dengan material *filler* serbuk Silika
1. Bahan baku yang terdiri dari *paraffin wax* dan serbuk Silika dipersiapkan terlebih dahulu. Pastikan kedua bahan dalam kondisi bersih dan siap untuk dicampur.
  2. Massa *paraffin wax* dan serbuk Silika ditimbang sesuai dengan ketebalan cetakan baterai dan PCM serta rasio *filler* yang digunakan, yaitu 0.3. Tabel berikut (Tabel 3.11) menunjukkan massa *paraffin wax* dan serbuk Silika yang dibutuhkan untuk masing-masing ketebalan cetakan.

**Tabel 3.11** Massa *ParaffinWax* dan Serbuk Silika Berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM

Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM (mm)	Rasio <i>Filler</i>	Massa Serbuk Silika (gram)	Massa <i>Paraffin wax</i> (gram)
3	0.3	4.5	15
6	0.3	9	30
9	0.3	13.5	45

3. Parafin wax yang telah ditimbang dipanaskan menggunakan kompor sampai mencapai suhu 60°C. Proses pemanasan harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan *paraffin wax* mencair sepenuhnya tanpa terbakar atau mengalami degradasi termal.
  4. Serbuk silika ditambahkan ke dalam panci yang berisi *paraffin wax* yang sudah mencair.
  5. Campuran *paraffin wax* dan serbuk Silika diaduk menggunakan sendok selama 3 menit. Pengadukan harus dilakukan secara merata untuk memastikan distribusi serbuk Silika dalam *paraffin wax* homogen.
  6. Setelah tercampur dengan baik, campuran *paraffin wax* dan serbuk Silika dituangkan ke dalam cetakan baterai dan PCM. Pastikan penuangan dilakukan secara merata.
- e) Pembuatan PCM Komposit dengan material *filler* serbuk tembaga
1. Bahan baku yang terdiri dari *paraffin wax* dan serbuk tembaga dipersiapkan terlebih dahulu. Pastikan kedua bahan dalam kondisi bersih dan siap untuk dicampur.
  2. Massa *paraffin wax* dan serbuk tembaga ditimbang sesuai dengan ketebalan cetakan baterai dan PCM serta rasio *filler* yang digunakan, yaitu 0.3. Tabel berikut (Tabel 3.12) menunjukkan massa *paraffin wax* dan serbuk tembaga yang dibutuhkan untuk masing-masing ketebalan cetakan.

**Tabel 3.12** Massa *Paraffin wax* dan Serbuk Tembaga Berdasarkan Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM

Ketebalan Cetakan Baterai dan PCM (mm)	Rasio <i>Filler</i>	Massa Serbuk Tembaga(gram)	Massa <i>Paraffin wax</i> (gram)
3	0.3	4.5	15
6	0.3	9	30

9	0.3	13.5	45
---	-----	------	----

3. *Paraffin wax* yang telah ditimbang dipanaskan menggunakan kompor sampai mencapai suhu 60°C. Proses pemanasan harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan *paraffin wax* mencair sepenuhnya tanpa terbakar atau mengalami degradasi termal.
4. Serbuk Tembaga ditambahkan ke dalam panci yang berisi *paraffin wax* yang sudah mencair.
5. Campuran *paraffin wax* dan serbuk tembaga diaduk menggunakan sendok selama 3 menit. Pengadukan harus dilakukan secara merata untuk memastikan distribusi serbuk Tembaga dalam *paraffin wax* homogen.
6. Setelah tercampur dengan baik, campuran *paraffin wax* dan serbuk tembaga dituangkan ke dalam cetakan baterai dan PCM. Pastikan penuangan dilakukan secara merata.

### 3.5.3 Perakitan Modul Baterai

Setelah baterai dan PCM komposit dicetak, kedua kutub baterai, yaitu kutub positif (+) dan negatif (-), disolder untuk memastikan koneksi arus listrik yang stabil. Selanjutnya, modul baterai diberi label sesuai dengan variasi rasio *filler* dan ketebalan PCM yang digunakan. Tampilan dari modul baterai yang telah dirangkai dapat dilihat pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Rangkaian Modul Baterai

Adapun modul baterai yang akan dirangkai dalam eksperimen terdiri dari 13 rangkaian, diantaranya :

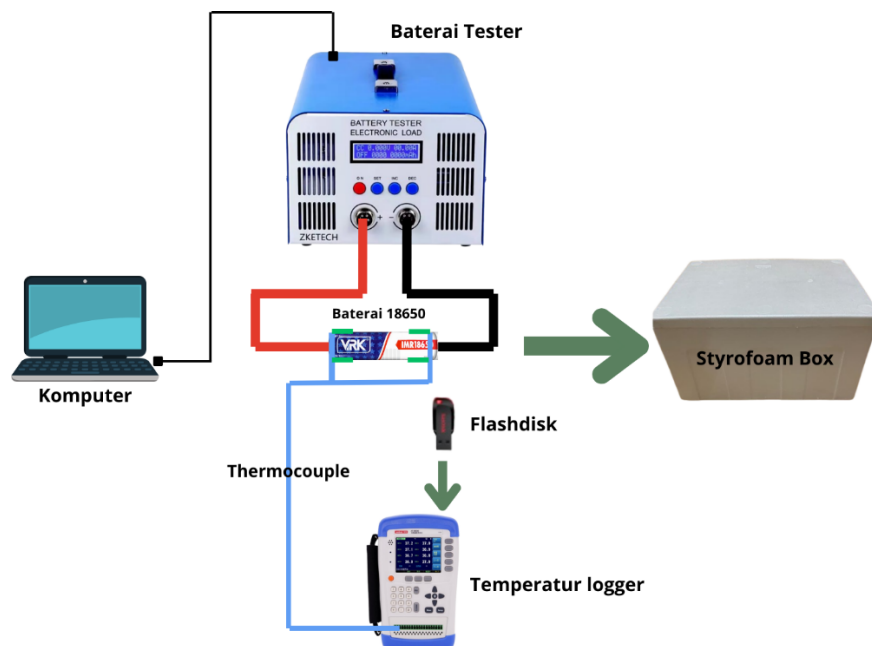
1. Modul baterai tanpa PCM *paraffin wax*.
2. Modul baterai dengan PCM murni dengan ketebalan 3 mm.
3. Modul baterai dengan PCM murni dengan ketebalan 6 mm.
4. Modul baterai dengan PCM murni dengan ketebalan 9 mm.
5. Modul baterai dengan PCM komposit grafit dengan rasio 0.3 dan ketebalan 3 mm.
6. Modul baterai dengan PCM komposit grafit dengan rasio 0.3 dan ketebalan 6 mm.
7. Modul baterai dengan PCM komposit grafit dengan rasio 0.3 dan ketebalan 9 mm.
8. Modul baterai dengan PCM komposit aluminium dengan rasio 0.3 dan ketebalan 3 mm.
9. Modul baterai dengan PCM komposit aluminium dengan rasio 0.3 dan ketebalan 6 mm.

10. Modul baterai dengan PCM komposit aluminium dengan rasio 0.3 dan ketebalan 9 mm.
11. Modul baterai dengan PCM komposit silika dengan rasio 0.3 dan ketebalan 3 mm.
12. Modul baterai dengan PCM komposit silika dengan rasio 0.3 dan ketebalan 6 mm.
13. Modul baterai dengan PCM komposit silika dengan rasio 0.3 dan ketebalan 9 mm
14. Modul baterai dengan PCM komposit tembaga dengan rasio 0.3 dan ketebalan 3 mm.
15. Modul baterai dengan PCM komposit tembaga dengan rasio 0.3 dan ketebalan 6 mm.
16. Modul baterai dengan PCM komposit tembaga dengan rasio 0.3 dan ketebalan 9 mm

### 3.6 Set-Up Pengujian

#### 3.6.1 Skema Peralatan Pengujian

Setelah persiapan pengujian selesai, langkah berikutnya adalah melakukan *set up* peralatan pengujian. Skema pengujian yang akan dilakukan digambarkan pada Gambar 3.6.

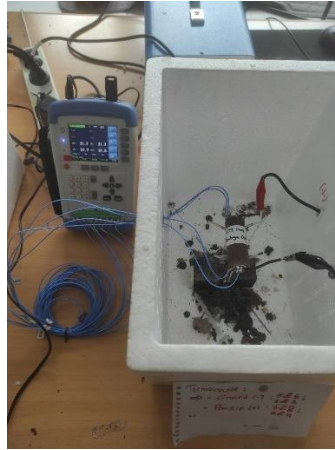


Gambar 3.6 Skema Pengujian

Berdasarkan skema pengujian tersebut, *set up* pengujian baterai yang telah dirangkai dapat dilihat pada Gambar 3.7.



(a)



(b)

**Gambar 3.7** Alat pengujian yang Telah Dirangkai (a) Rangkaian Baterai *Tester*, *Styrofoam box* dan *Computer* (b) Rangkaian Alat Pengujian Baterai di Dalam *Styrofoam box*

Modul baterai dihubungkan dengan *battery tester* (ZKETEC) dan *thermocouple data logger*. *Thermocouple Data logger* digunakan untuk mengukur temperatur pada permukaan atas dan bawah baterai, dengan setiap sel baterai dilengkapi dengan 4 sensor. Data temperatur yang diperoleh dari *thermocouple* direkam melalui *thermocouple data logger* dan *flashdisk*. Kemudian, data temperatur yang terdapat pada *flashdisk* akan ditransfer ke laptop dalam bentuk file Microsoft Excel.

Gambar 3.6 menunjukkan skema pengujian dan alat pengujian yang telah dirangkai. Gambar 3.6 (a) menggambarkan koneksi antara *battery tester*, *thermocouple data logger*, baterai, *flashdisk*, dan laptop. Sedangkan Gambar 3.7 (b) (a) menunjukkan rangkaian alat pengujian di dalam *styrofoam box* yang berfungsi sebagai wadah isolasi termal.

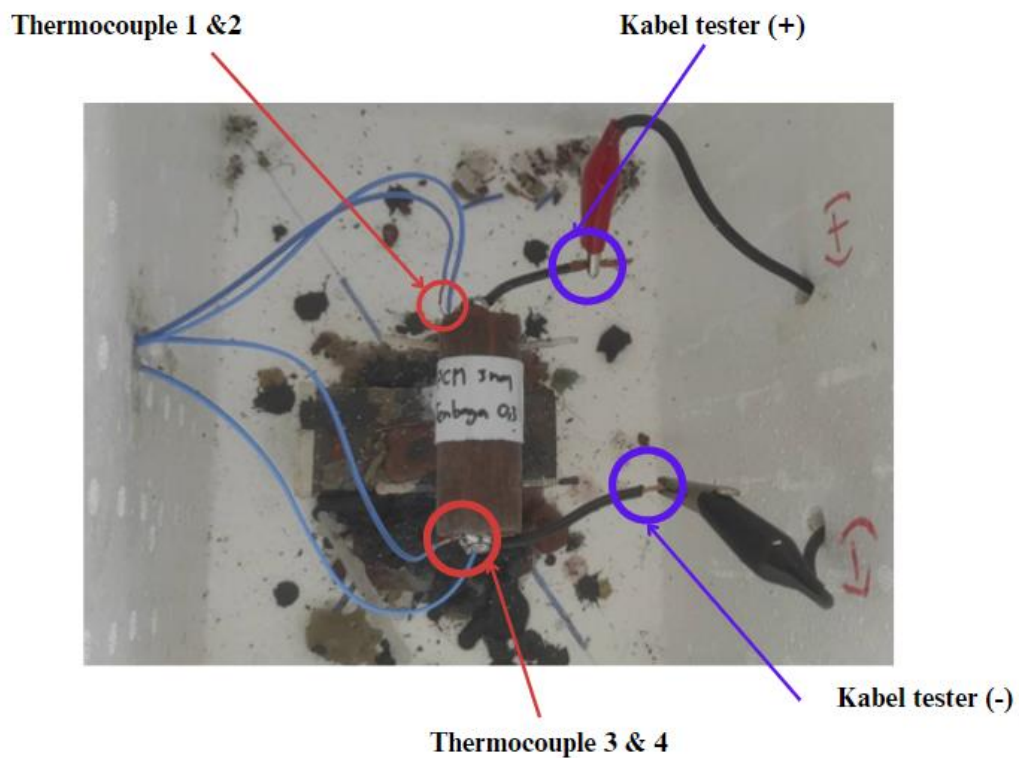
### 3.6.2 Prosedur Percobaan

Berikut tahapan-tahapan yang dilakukan untuk melakukan percobaan :

- A. Modul baterai dipersiapkan, antara lain:
  - a. Modul baterai tanpa PCM *paraffin wax*.
  - b. Modul baterai dengan PCM murni dengan ketebalan 3 mm.
  - c. Modul baterai dengan PCM murni dengan ketebalan 6 mm.
  - d. Modul baterai dengan PCM murni dengan ketebalan 9 mm.
  - e. Modul baterai dengan PCM komposit grafit dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 3 mm.
  - f. Modul baterai dengan PCM komposit grafit dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 6 mm.
  - g. Modul baterai dengan PCM komposit grafit dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 9 mm.
  - h. Modul baterai dengan PCM komposit aluminium dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 3 mm.
  - i. Modul baterai dengan PCM komposit aluminium dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 6 mm.
  - j. Modul baterai dengan PCM komposit aluminium dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 9 mm.
  - k. Modul baterai dengan PCM komposit silika dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 3 mm.



- l. Modul baterai dengan PCM komposit silika dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 6 mm.
  - m. Modul baterai dengan PCM komposit silika dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 9 mm
  - n. Modul baterai dengan PCM komposit tembaga dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 3 mm.
  - o. Modul baterai dengan PCM komposit tembaga dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 6 mm.
  - p. Modul baterai dengan PCM komposit tembaga dengan rasio massa 0.3 dan ketebalan 9 mm
2. *Holder* akrilik dimasukkan ke dalam *styrofoam box* dan diletakkan tepat di posisi tengah box
  3. Modul baterai diletakkan diatas *holder* akrilik
  4. *Thermocouple* sebanyak 4 channel dipasang pada masing-masing kutub positif (+) dan negatif (-) baterai. Pemasangan dilakukan dua di kutub positif dan dua di kutub negatif baterai. Instalasi *thermocouple* dapat dilihat pada gambar 3.7
  5. Kabel baterai *tester* dihubungkan dengan modul baterai sesuai dengan kutub nya. Instalansi baterai *tester* dapat dilihat pada gambar 3.8



**Gambar 3.8** Lokasi Pemasangan *Thermocouple* dan Kabel *Baterai Tester* pada *Baterai*

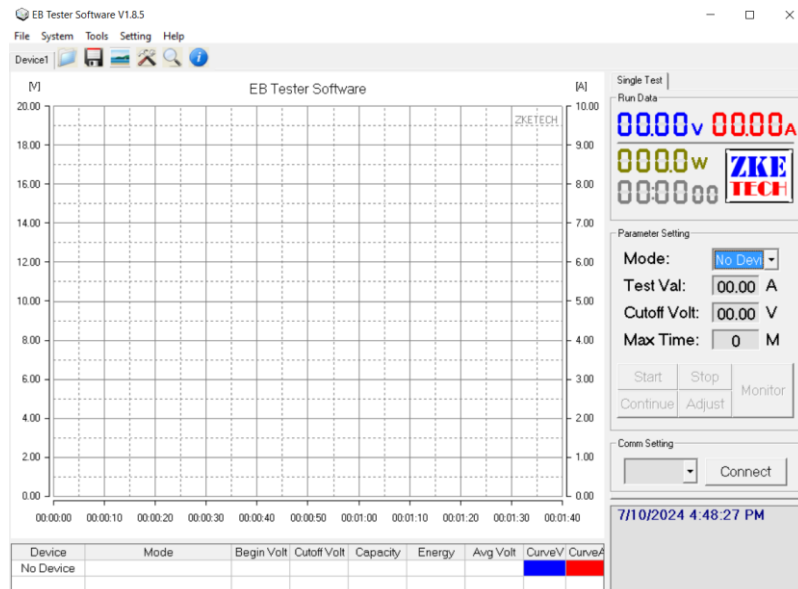
3. Temperatur *housing* (*Styrofoam box*) dan temperatur lingkungan (sekitar 31°C) diukur menggunakan *Thermal Gun* sebagai referensi.
4. Setting *software* battery *tester* yang sudah di-install pada *computer* diatur sesuai dengan variasi *C-Rate*, yaitu 3A; 6A; 9A. Tampilan awal *software* sebelum pengujian dapat dilihat pada gambar 3.9. Adapun *set up* baterai *tester* pada *software* disesuaikan dengan tabel 3.13 dan 3.14 berikut ini.

**Tabel 3.13** *Set up* Arus dan Voltage pada Software Baterai Tester untuk Masing – Masing Discharging Rate

C-Rate	Test Val	Cutoff Voltage	Max Time
1C	3 Ampere	2.5 Volt	0
2C	6 Ampere	2.5 Volt	0
3C	9 Ampere	2.5 Volt	0

**Tabel 3.14** *Set up* Arus dan Voltage pada Software Baterai Tester untuk Masing – Masing Charging Rate

C-Rate	Test Val	Voltage	Cutoff Curent
1C	3 Ampere	4.2 Volt	0.1 Ampere
2C	6 Ampere	4.2 Volt	0.1 Ampere
3C	9 Ampere	4,2 Volt	0.1 Ampere



**Gambar 3.9** Display pada Software Baterai Tester

5. *Flashdisk* dihubungkan pada *temperature data logger*.
6. Interval pengukuran *temperature data logger* diatur menjadi setiap 10 detik.
7. Percobaan dimulai ketika temperatur permukaan baterai mencapai temperatur lingkungan (31°C) dan percobaan diakhiri ketika kapasitas baterai sudah kosong.
8. Proses *discharge* dimulai melalui *software* battery tester dan mengamati nilai suhu yang terbaca pada permukaan modul paket baterai tanpa PCM *paraffin wax* (Modul (1)) hingga kapasitas baterai kosong.
9. Proses *discharge* dimulai melalui *software* battery tester dan mengamati nilai suhu yang terbaca pada permukaan modul paket baterai dengan PCM murni dengan ketebalan 3 mm (Modul (2)) hingga kapasitas baterai kosong.
10. Proses *discharge* dimulai melalui *software* battery tester dan mengamati nilai suhu yang terbaca pada permukaan modul paket baterai dengan PCM murni dengan ketebalan 6 mm (Modul (3)) hingga kapasitas baterai kosong.
11. Proses *discharge* dimulai melalui *software* battery tester dan mengamati nilai suhu yang terbaca pada permukaan modul paket baterai dengan PCM murni dengan ketebalan 9 mm (Modul (4)) hingga kapasitas baterai kosong.

12. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk grafit dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 3 mm (Modul (5)) hingga kapasitas baterai kosong.
13. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk grafit dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 6 mm (Modul (6)) hingga kapasitas baterai kosong.
14. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk grafit dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 9 mm (Modul (7)) hingga kapasitas baterai kosong.
15. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk aluminium dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 3 mm (Modul (8)) hingga kapasitas baterai kosong.
16. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk aluminium dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 6 mm (Modul (9)) hingga kapasitas baterai kosong.
17. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk aluminium dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 9 mm (Modul (10)) hingga kapasitas baterai kosong.
18. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 3 mm (Modul (11)) hingga kapasitas baterai kosong.
19. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 6 mm (Modul (12)) hingga kapasitas baterai kosong.
20. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk silika dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 9 mm (Modul (13)) hingga kapasitas baterai kosong.
21. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk tembaga dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 3 mm (Modul (14)) hingga kapasitas baterai kosong.
22. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk tembaga dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 6 mm (Modul (15)) hingga kapasitas baterai kosong.
23. Proses *discharge* dimulai melalui *software battery tester* dan nilai suhu yang terbaca diamati pada permukaan modul paket baterai dengan PCM komposit serbuk tembaga dengan variasi rasio 0.3 dengan ketebalan 9 mm (Modul (16)) hingga kapasitas baterai kosong.
24. Data hasil pengamatan temperatur dicatat pada tabel hasil pengamatan (Tabel 3.8)

25. Analisa data dilakukan dan penarikan kesimpulan

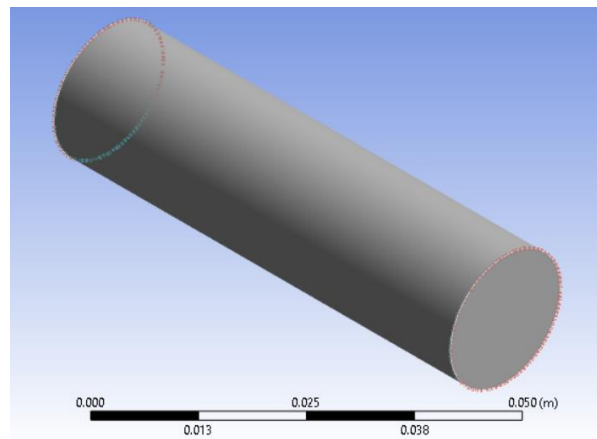
### 3.7 Studi Numerik

#### 3.7.1 Pre processing

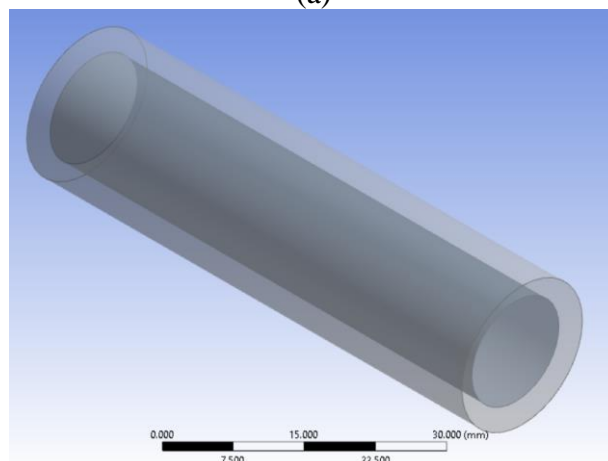
Sebelum melakukan studi numerik analisis perpindahan panas untuk baterai *lithium ion* dengan PCM, perlu dilakukan pembuatan geometri serta perlakuan *meshing* untuk simulasi, yang dijelaskan sebagai berikut. Permodelan geometri untuk modul baterai dilakukan dengan *software* Design Modeler. Geometri baterai dimodelkan semirip mungkin dengan bentuk dan ukuran dari model modul eksperimen.

##### A. Geometri Modul Baterai

Pembuatan geometri baterai yang digunakan pada simulasi ini mereferensi dari skema eksperimen baterai pada penelitian oleh (Panchal et al., 2018) Permodelan geometri untuk modul baterai dilakukan dengan *software* Design Modeler. Geometri baterai dimodelkan semirip mungkin dengan bentuk dan ukuran dari model modul eksperimen. Adapun geometri dan *modelling* modul baterai yang sudah dibuat ditunjukkan pada gambar 3.10 dan 3.11.

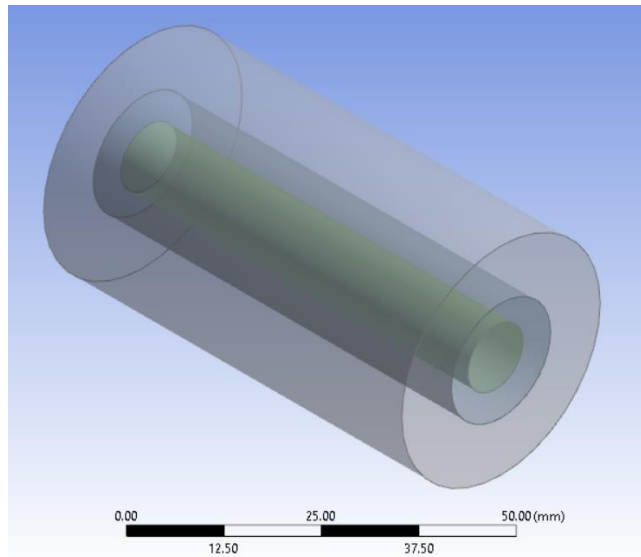


(a)

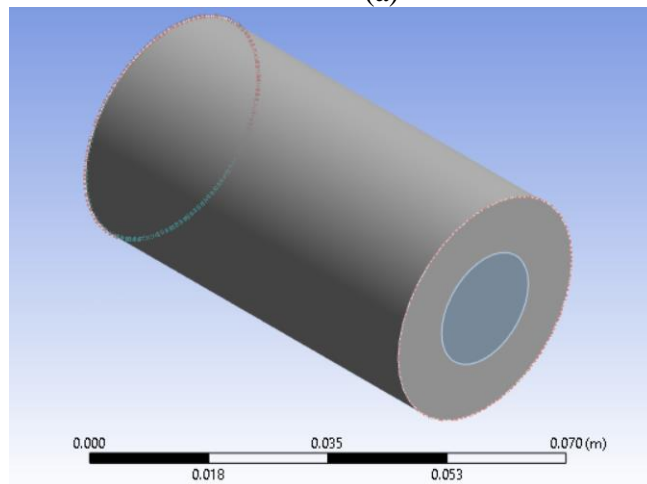


(b)

**Gambar 3.10** Modul Baterai dengan Sistem *Natural convection* (a) Geometri Baterai (b) *Modelling* Baterai



(a)



(b)

**Gambar 3.11** Modul Baterai dengan PCM Murni Ketebalan 9 mm (a) Geometri Baterai (b) *Modelling* Baterai

Pada Gambar 3.10 dan Gambar 3.11, spesifikasi dari geometri modul baterai dibuat berdasarkan parameter desain berdasarkan tabel berikut.

**Tabel 3.15** Parameter Desain Geometri Modul Baterai

Variasi	Parameter Desain	Nilai (mm)
<i>Natural convection</i>	<i>Inner Battery Diameter</i>	10
	<i>Wall Battery Diameter</i>	18
PCM Murni 9 mm	<i>Inner Battery Diameter</i>	10
	<i>Wall Battery Diameter</i>	18
	<i>Wall PCM Diameter</i>	9

### B. *Meshing*

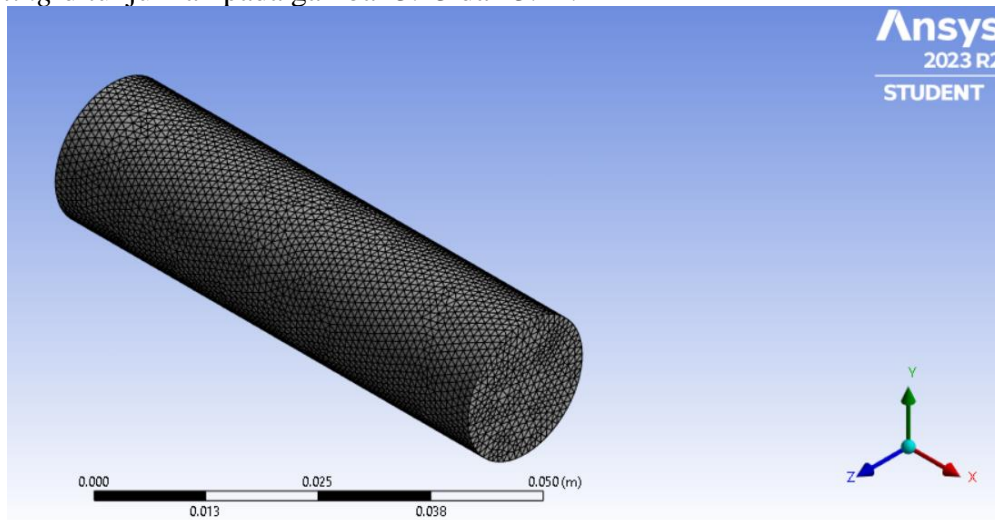
*Meshing* merupakan tahapan untuk mendiskritisasi geometri menjadi elemen-elemen yang lebih kecil atau membagi domain fluida yang kontinyu untuk memudahkan dan mengakuratkan perhitungan numerik. Element size dari *meshing* yang dilakukan sebesar 0,001 m untuk *natural convection* dan PCM murni ketebalan 9 mm.. Kualitas dari *mesh* dapat

diketahui dengan mengacu pada *skewness*. *Skewness* merupakan kemiringan atau ketidak-samaan sisi elemen. Semakin rendah nilai *skewness*, maka kualitas *meshing* akan semakin baik seperti ditunjukkan pada gambar 3.12. Hasil *meshing* yang baik adalah *meshing* yang nilai *skewness* nya tidak melebihi dari kategori *acceptable*.

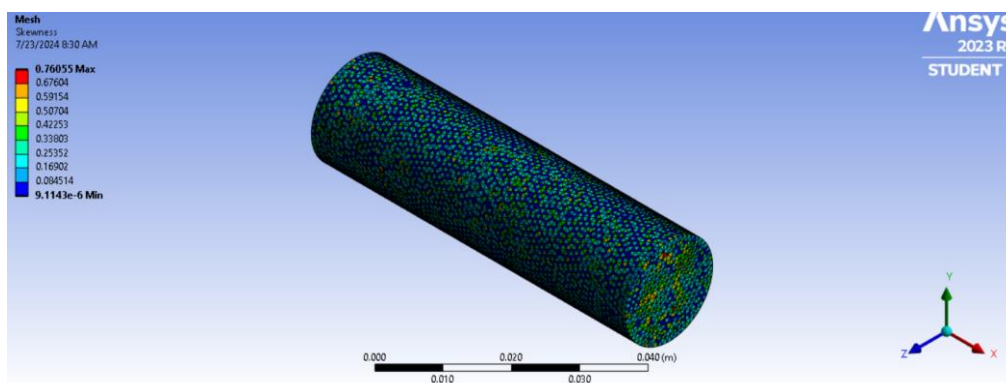
Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

**Gambar 3.12** *Skewness Mesh Metric Spectrum*

Dari *meshing* yang telah dilakukan, diketahui nilai *skewness* untuk *natural convection* adalah sebesar 0,76 dan PCM murni sebesar 0,775. Kedua nilai *skewness* tersebut termasuk dalam kategori *good* menurut panduan dari Ansys sehingga dapat dilakukan simulasi terhadap kedua geometri tersebut. Adapun *meshing* dan analisis *skewness* modul baterai yang sudah *dimodelling* ditunjukkan pada gambar 3.13 dan 3.14.

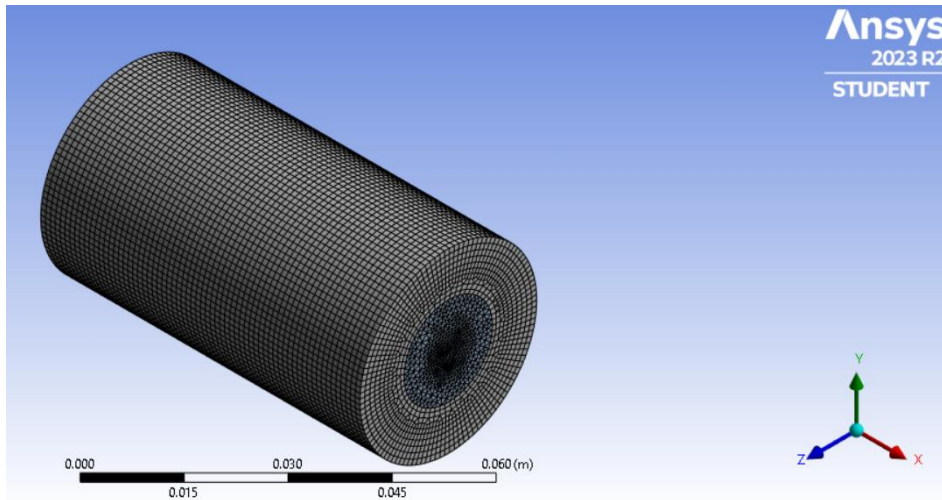


(a)

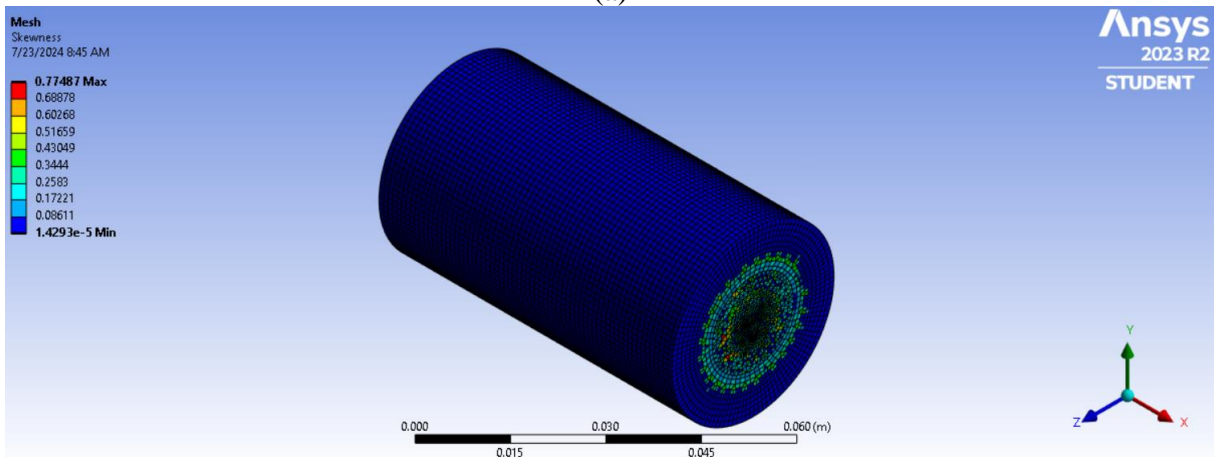


(b)

**Gambar 3.13** *Meshing Modul Baterai dengan Sistem Natural convection (a) Geometri Meshing (b) Nilai Skewness*



(a)



(b)

**Gambar 3.14** Meshing Modul Baterai dengan Sistem PCM Murni Ketebalan 9 mm (a) Geometri Meshing (b) Nilai Skewness

### 3.7.2 Processing

Merupakan tahap pengaturan *software* ANSYS Fluent 2023 R2 untuk menjalankan simulasi dari geometri yang sudah diberi *meshing*. Pengaturan pada ANSYS/*solver* dilakukan dengan penentuan model *solver*, material pada geometri, kondisi batas konvergensi, dan jumlah perhitungan iterasi yang diharap sudah konvergen. Pengaturan pada ANSYS dilakukan seperti pada tabel 3.16. Setelah semua pengaturan dilakukan, dijalankanlah simulasi.

**Tabel 3.16** Set up ANSYS

<b>Simulation Model</b>	<i>Energy</i>	<i>On</i>
	<i>Solidification and Melting</i>	<i>On</i>
<b>Material Properties and Boundary conditions</b>	<i>Initial Temperature</i>	301 K
	<i>Convective Heat transfer Coefficient</i>	4.7269 W/m <sup>2</sup> .K
<b>Materials Type</b>	<i>Solid</i>	PCM_Material
	<i>Solid</i>	Cell_Material
<b>Solver Settings</b>	<i>Type</i>	<i>Pressure-Based</i>
	<i>Time</i>	<i>Transient</i>

	<i>Velocity Formulation</i>	<i>Absolute</i>
	<i>Add-on Module</i>	<i>Energy, Solidification and Melting</i>
<b>Calculation Parameters</b>	<i>Number of Time Steps</i>	<i>Based on experimental data</i>
	<i>Time Step Size</i>	1 s
	<i>Max Iterations / Time Step</i>	10
	<i>Reporting Interval</i>	1
	<i>Profile Update Interval</i>	1

### 3.7.3 Post processing

Luaran dari studi numerik dengan *software* ANSYS pada penelitian ini berupa total temperatur pada permukaan baterai *Lithium ion* dan *temperature* pada PCM murni. Berdasarkan data hasil simulasi, akan didapatkan grafik temperatur (K) terhadap waktu (s).

### 3.8 Analisa Data Hasil Percobaan

Proses analisa 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 jenis material pada PCM komposit yang diistilahkan sebagai material *filler* dan hubungannya terhadap laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion*. Pada tahap ini, data yang diperoleh meliputi waktu yang diperlukan oleh baterai *lithium ion* untuk mengosongkan kapasitasnya, yang disebut sebagai waktu kerja. Selain itu, data temperatur baterai selama proses *discharging* hingga kapasitas baterai kosong juga dicatat. Waktu kerja dan temperatur yang teramati untuk masing-masing modul baterai akan dicatat dalam tabel hasil pengamatan seperti Tabel 3.17.

**Tabel 3.17** Hasil Pengukuran Temperatur untuk Setiap Variasi Modul Baterai

<i>Temperature (°C)</i>				<b>Waktu Kerja (s)</b>	<i>Temperature Rata – rata (°C)</i>
<b>Channel 1</b>	<b>Channel 2</b>	<b>Channel 3</b>	<b>Channel 4</b>		

Tabel 3.17 berisi hasil pengukuran waktu kerja untuk setiap modul baterai, termasuk data temperatur dari empat channel *Thermocouple* pada permukaan baterai. Temperatur rata-rata dihitung dari keempat channel tersebut, dan dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai performa termal dari masing-masing modul baterai selama proses *discharging*.

Berdasarkan data – data yang sudah didapatkan dari pengujian, maka dapat dilakukan perhitungan pada setiap temperatur variasi modul baterai untuk mendapatkan nilai laju kenaikan temperatur dari masing-masing sistem pendinginan. Berikut ini merupakan persamaan yang akan digunakan untuk menemukan laju kenaikan temperatur

$$\text{Laju temperatur} = \frac{\Delta T}{t}$$

Dimana :

Laju temperatur = *Rate* peningkatan *temperature* (°C/s)

$\Delta T$  = Selisih temperatur rata-rata dengan interval waktu 100 s (°C)



t = Interval waktu 100 s (s)

### **3.9 Penarikan Kesimpulan**

Dilakukan penarikan kesimpulan sesuai dengan hasil analisa 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.

## **BAB IV**

### **ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Hasil Pengujian**

Pada sub bab ini, akan disajikan hasil pengujian dari eksperimen yang telah dilakukan. Telah dilakukannya pengambilan data untuk berbagai variasi, yaitu *natural convection*, PCM murni, dan PCM komposit dengan material *filler* berupa grafit, aluminium, silika, dan tembaga pada setiap ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan material *filler* pada PCM komposit dan pengaruh variasi ketebalan PCM terhadap laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion*. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan efektivitas dan performa PCM dalam upaya pendinginan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion*. Di akhir analisis, seluruh hasil eksperimen dibandingkan sehingga dapat ditentukan material *filler* dan nilai ketebalan PCM yang paling optimal dalam meningkatkan kinerja PCM untuk menurunkan laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion*.

##### **4.1.1 Pengujian Baterai dengan Sistem *Natural convection***

(Terlampir)

##### **4.1.2 Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Murni**

(Terlampir)

##### **4.1.3 Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Grafit**

(Terlampir)

##### **4.1.4 Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Aluminium**

(Terlampir)

##### **4.1.5 Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Silika**

(Terlampir)

##### **4.1.6 Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Tembaga**

(Terlampir)

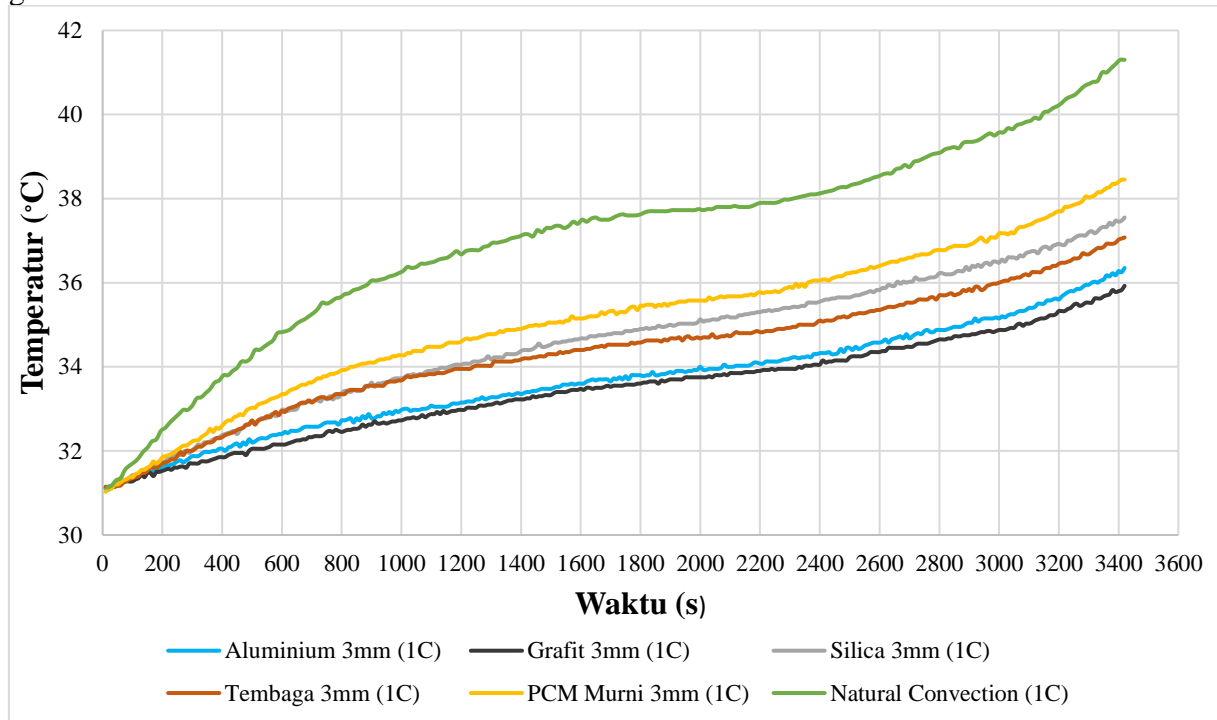
#### **4.2 Pengaruh Penambahan PCM dan Material *Filler* terhadap Kenaikan *Temperature* Baterai**

Pada sub bab ini, akan dibahas pengaruh penambahan PCM (*Phase change material*) dan material *filler* terhadap kenaikan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion* selama proses *discharging*. Sistem natural konveksi yang merupakan sistem dengan mengandalkan udara dari luar sebagai pendinginan akan dibandingkan dengan sistem PCM murni dan PCM komposit. Perbandingan akan mengevaluasi performa dalam menurunkan laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion*. Analisis akan dilakukan pada dua scenario utama, yaitu :

##### **4.2.1 Analisa pada Baterai dengan *Discharging Rate* 1C dan Ketebalan PCM Komposit 3 mm**

Hasil pengujian baterai dengan menggunakan sistem *natural convection*, sistem pendinginan PCM murni, dan PCM komposit untuk semua variasi material *filler* pada ketebalan 3 mm dengan ratio *filler* 0,3 telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik

hubungan antara *temperature* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 1C ditunjukkan pada gambar 4.1 berikut

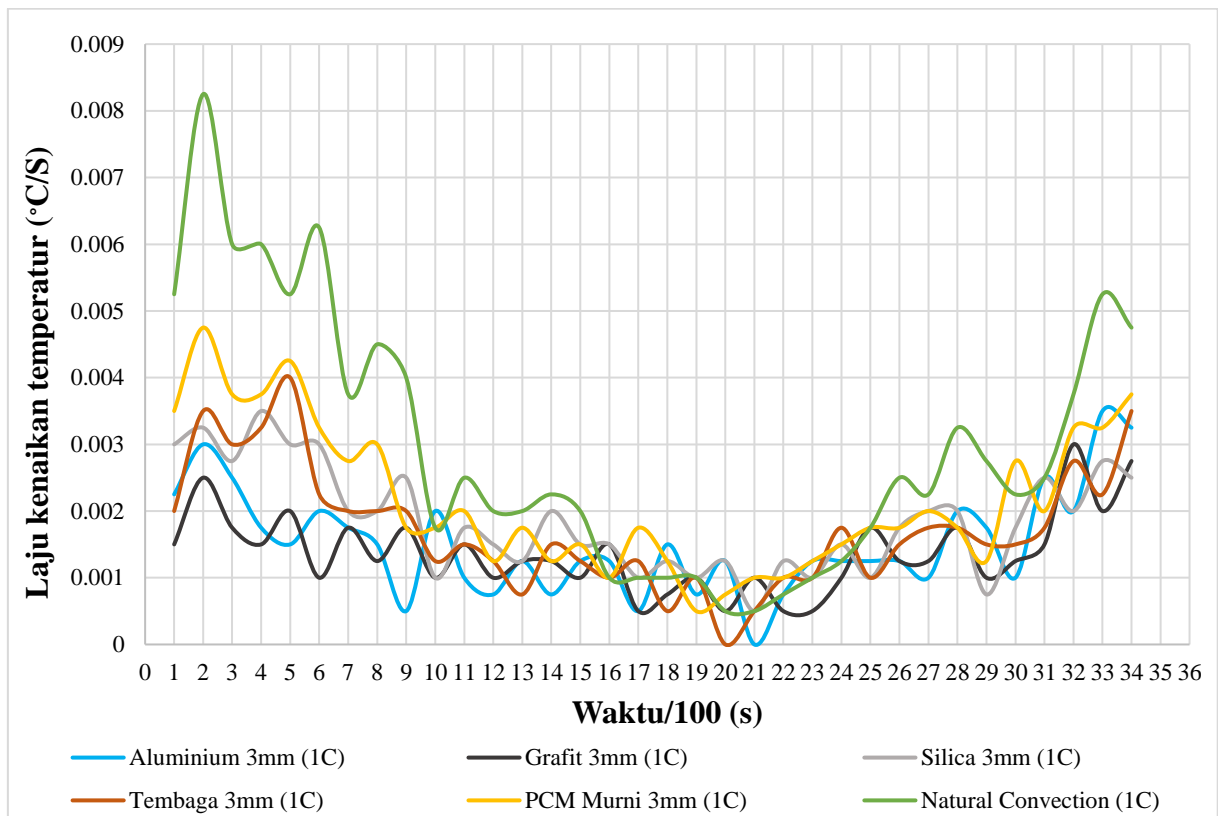


**Gambar 4.1** Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi *C-Rate* 1C dan Ketebalan PCM 3 mm

Pada gambar 4.1 tersebut menunjukkan bahwa pada sistem pendinginan *natural convection*, peningkatan *temperature* paling tinggi secara keseluruhan hingga mencapai pada temperatur maksimalnya, yaitu pada 41.3 °C setelah 3420 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni, temperatur juga meningkat secara perlahan namun tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 38.45 °C. Pada saat menggunakan sistem pendinginan PCM komposit 3 mm dengan material *filler* silika, peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah hingga pada temperatur maksimal sebesar 37.55 °C. Pada PCM komposit 3 mm dengan material *filler* Tembaga, peningkatan *temperature* cenderung sedikit lebih rendah hingga pada *temperature* maksimal 37.075 °C. Pada PCM komposit 3 mm dengan material *filler* Aluminium, peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah hingga pada *temperature* maksimal 36.35 °C. Terakhir, pada PCM komposit 3 mm dengan material *filler* Grafit, peningkatan *temperature* paling rendah dibandingkan dengan kelima sistem pendinginan lainnya hingga mencapai titik *temperature* maksimal pada 35.925 °C.

Nilai temperatur tertinggi terdapat pada sistem pendinginan *natural convection* sebesar 41.3 °C dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan material *filler* Grafit sebesar 35.925 °C. PCM komposit dengan material *filler* grafit menunjukkan performa terbaik dalam meniaga temperatur lebih rendah dibandingkan dengan material *filler* lain dan sistem pendinginan lainnya. Berdasarkan data tersebut, penggunaan PCM komposit cukup signifikan mengurangi kenaikan temperatur dibandingkan dengan sistem *natural convection* dan sistem PCM murni.

Berdasarkan hasil pengujian *temperature*, grafik hubungan antara laju peningkatan *temperature* dan waktu dengan interval 100 s pada *discharging rate* 1C ditunjukkan pada gambar 4.4 berikut



**Gambar 4.2** Grafik Perbandingan Laju Kenaikan Temperatur terhadap Interval Waktu 100 Sekon pada Variasi C-Rate 1C dan Ketebalan PCM 3mm

Berdasarkan gambar 4.2, metode pendinginan dengan *natural convection* menunjukkan laju kenaikan temperatur yang sangat tinggi di awal pengujian, mencapai puncak sekitar  $0.00825 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  dalam interval 100 – 200 detik. Setelah puncak awal tersebut, laju kenaikan temperatur menurun secara bertahap dan mengalami fluktuasi, tetapi tetap lebih tinggi dibandingkan metode lainnya. Sementara itu, PCM murni memiliki puncak laju kenaikan temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan *natural convection*, yaitu sebesar  $0.00475 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval 100 – 200 detik. Stabilitas laju kenaikan *temperature* PCM murni lebih baik setelah interval 1000-1100 detik, tetapi masih menunjukkan beberapa fluktuasi. Pada PCM komposit silika, laju kenaikan temperatur menunjukkan fluktuasi sepanjang pengujian, namun tidak secepat *natural convection* dan pcm murni. Laju kenaikan *temperature* silika memiliki puncak laju kenaikan temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan PCM Murni, yaitu sebesar  $0.0035 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval 300 – 400 detik.

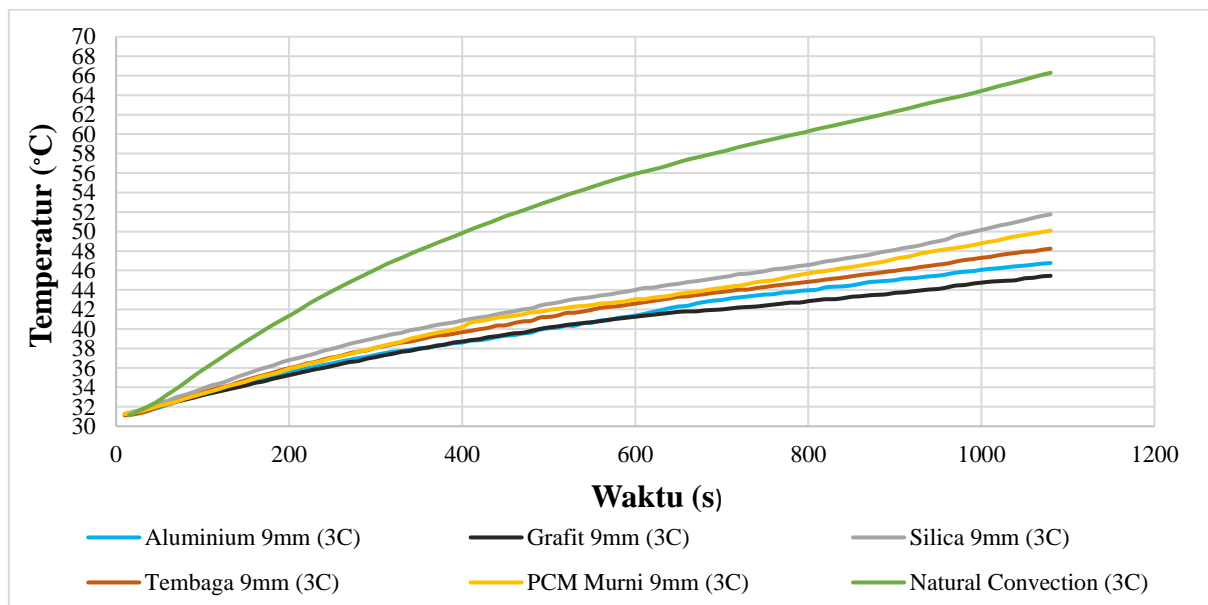
PCM tembaga menunjukkan laju kenaikan temperatur yang lebih stabil dibandingkan dengan *natural convection* dan PCM murni. Laju kenaikan *temperature* tembaga memiliki puncak laju kenaikan temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan PCM Murni dan lebih tinggi dari PCM silika, yaitu sebesar  $0.004 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval 400 – 500 detik. Laju kenaikan *temperature* PCM tembaga cenderung lebih rendah daripada PCM silika setelah periode waktu tertentu. PCM aluminium memiliki laju kenaikan temperatur yang relatif stabil dan rendah dibandingkan dengan *natural convection* dan PCM murni, dan menunjukkan efektivitas dalam menjaga laju kenaikan temperatur yang lebih rendah dalam periode waktu yang panjang. Laju kenaikan *temperature* aluminium memiliki puncak laju kenaikan temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan PCM tembaga yaitu sebesar  $0.0035 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval 3200 – 3300 detik. Terakhir, PCM grafit menunjukkan laju kenaikan temperatur

yang sangat stabil dan rendah hampir sepanjang pengujian, dan menunjukkan salah satu performa terbaik dalam hal menjaga stabilitas dan rendahnya laju kenaikan *temperature* daripada sistem pendinginan lainnya. Laju kenaikan *temperature* grafit memiliki puncak laju kenaikan temperatur yang paling rendah dibandingkan dengan variasi lainnya yaitu sebesar  $0.00275\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval 3300 – 3400 detik.

Dari grafik tersebut, penggunaan PCM dengan material *filler* seperti grafit, aluminium, dan tembaga secara signifikan dapat menurunkan laju kenaikan temperatur dibandingkan dengan *natural convection* dan PCM murni. PCM grafit dan aluminium menunjukkan performa terbaik dalam menstabilkan dan menurunkan laju kenaikan temperatur. Selain itu, PCM grafit dan aluminium menunjukkan kestabilan yang lebih baik dalam laju kenaikan temperatur dibandingkan dengan PCM tembaga, silika, murni dan *natural convection*. Hal ini menunjukkan bahwa material *filler* dapat meningkatkan performa PCM dalam mengontrol kenaikan temperatur pada permukaan baterai. Dengan ketebalan 3 mm, penggunaan material *filler* dalam PCM terbukti efektif dalam menurunkan laju kenaikan temperatur. Namun, performa optimal mungkin masih perlu diteliti lebih lanjut dengan variasi ketebalan lainnya. Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan PCM komposit dengan material *filler* lebih efektif dalam menurunkan laju kenaikan temperatur pada baterai *lithium ion* selama proses *discharging* dibandingkan dengan *natural convection* dan PCM murni.

#### 4.2.2 Analisa pada Baterai dengan *Discharging Rate* 3C dan Ketebalan PCM Komposit 9mm

Hasil pengujian baterai dengan menggunakan sistem *natural convection*, sistem pendinginan PCM murni, dan PCM komposit untuk semua variasi material *filler* pada ketebalan 9 mm dengan ratio *filler* 0,3 telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik hubungan antara *temperature* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 3C ditunjukkan pada gambar 4.3 berikut



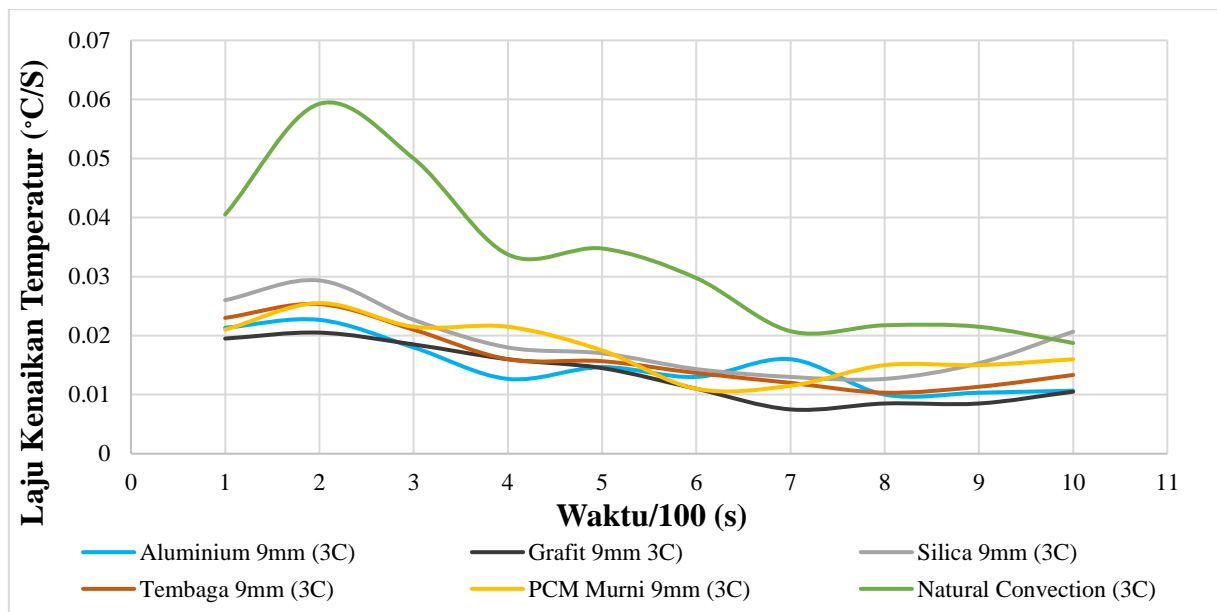
**Gambar 4.3** Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi *C-Rate* 3C dan Ketebalan PCM 9mm

Pada gambar 4.3 tersebut menunjukkan bahwa pada sistem pendinginan *natural convection*, peningkatan *temperature* paling tinggi secara keseluruhan hingga mencapai pada

temperatur maksimalnya, yaitu pada  $66.3^{\circ}\text{C}$  setelah 1080 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM komposit 3 mm silika, temperatur juga meningkat secara perlahan namun tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada  $51.766^{\circ}\text{C}$ . Pada sistem PCM murni, peningkatan temperatur cenderung lebih rendah daripada PCM komposit silika, dengan temperatur maksimal sebesar  $50.1^{\circ}\text{C}$ . Pada saat menggunakan sistem pendinginan PCM komposit 3 mm dengan material *filler* tembaga, peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah daripada PCM murni hingga pada temperatur maksimal sebesar  $48.233^{\circ}\text{C}$ . Pada PCM komposit 3mm dengan material *filler* aluminium, peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah daripada PCM tembaga hingga pada *temperature* maksimal  $46.766^{\circ}\text{C}$ . Terakhir, pada PCM komposit 3mm dengan material *filler* Grafit, peningkatan *temperature* paling rendah dibandingkan dengan kelima sistem pendinginan lainnya hingga mencapai titik *temperature* maksimal pada  $45.45^{\circ}\text{C}$ .

Nilai temperatur tertinggi terdapat pada sistem pendinginan *natural convection* sebesar  $66.3^{\circ}\text{C}$  dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan material *filler* Grafit sebesar  $45.45^{\circ}\text{C}$ . PCM komposit dengan material *filler* Grafit menunjukkan performa terbaik dalam menjaga temperatur lebih rendah dibandingkan dengan material *filler* lain dan sistem pendinginan lainnya. Berdasarkan data tersebut, penggunaan PCM komposit pada ketebalan 9 mm dan *discharge rate* cukup signifikan mengurangi kenaikan temperatur dibandingkan dengan sistem *natural convection* dan sistem PCM murni, tetapi tidak dengan PCM komposit silika karena mempunyai peningkatan temperatur yang lebih tinggi daripada PCM murni. Hal ini dapat disebabkan karena material silika mempunyai *specific heat* yang paling tinggi daripada material lainnya, sehingga pada ketebalan 9 mm menyebabkan kemampuan penyimpanan panas nya semakin besar dan mengurangi nilai *thermal diffusivity* nya.

Berdasarkan grafik hasil pengujian temperatur, grafik hubungan antara laju peningkatan *temperature* dan waktu dengan interval 100 s pada *discharging rate* 3C ditunjukkan pada gambar 4.4 berikut



**Gambar 4.4** Grafik Perbandingan Laju Kenaikan Temperatur terhadap Interval Waktu 100 Sekon pada variasi *C-Rate* 3 C dan Ketebalan PCM 9mm

Pada grafik 4.4 di atas menunjukkan bahwa pada sistem pendinginan *natural convection*, laju kenaikan *temperature* berada pada titik puncaknya di sekitar  $0.05925\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval waktu 100 – 200 sekon dan menurun secara bertahap hingga pada  $0.01875\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval waktu 900-1000 sekon. Dari awal hingga akhir proses *discharging*, laju kenaikan *temperature natural convection* tetap lebih tinggi dibandingkan metode lainnya sepanjang pengujian. Kemudian pada sistem pendinginan PCM murni, laju kenaikan temperatur menurun secara jauh lebih lambat dibandingkan dengan *natural convection* mulai sekitar  $0.021\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada awal *discharging* dan menurun hingga pada  $0.011\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval waktu 500-600 sekon, namun trend grafik kembali mengalami kenaikan hingga pada  $0.016\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval waktu 900-1000 sekon. Pada sistem pendinginan PCM komposit serbuk silika, laju kenaikan temperatur mulai sekitar  $0.026\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada awal *discharging* dan menurun hingga pada  $0.0126\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval waktu 700-800 sekon, namun trend grafik kembali mengalami kenaikan hingga pada  $0.016\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval waktu 900-1000 sekon. Pada sistem pendinginan PCM komposit serbuk tembaga, laju kenaikan temperatur mulai sekitar  $0.023\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada awal *discharging* dan menurun hingga pada  $0.0103\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval waktu 700-800 sekon, namun trend grafik kembali mengalami kenaikan hingga pada  $0.013\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval waktu 900-1000 sekon. Pada sistem pendinginan PCM komposit serbuk aluminium, laju kenaikan temperatur mulai sekitar  $0.021\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada awal *discharging* dan menurun hingga pada  $0.0106\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  pada interval waktu 900-1000 sekon. Terakhir, pada sistem pendinginan PCM komposit serbuk grafit, laju kenaikan *temperature* dari awal *discharging* mulai sekitar  $0.0195\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  di awal dan mulai menurun hingga sekitar  $0.0103\text{ }^{\circ}\text{C/s}$

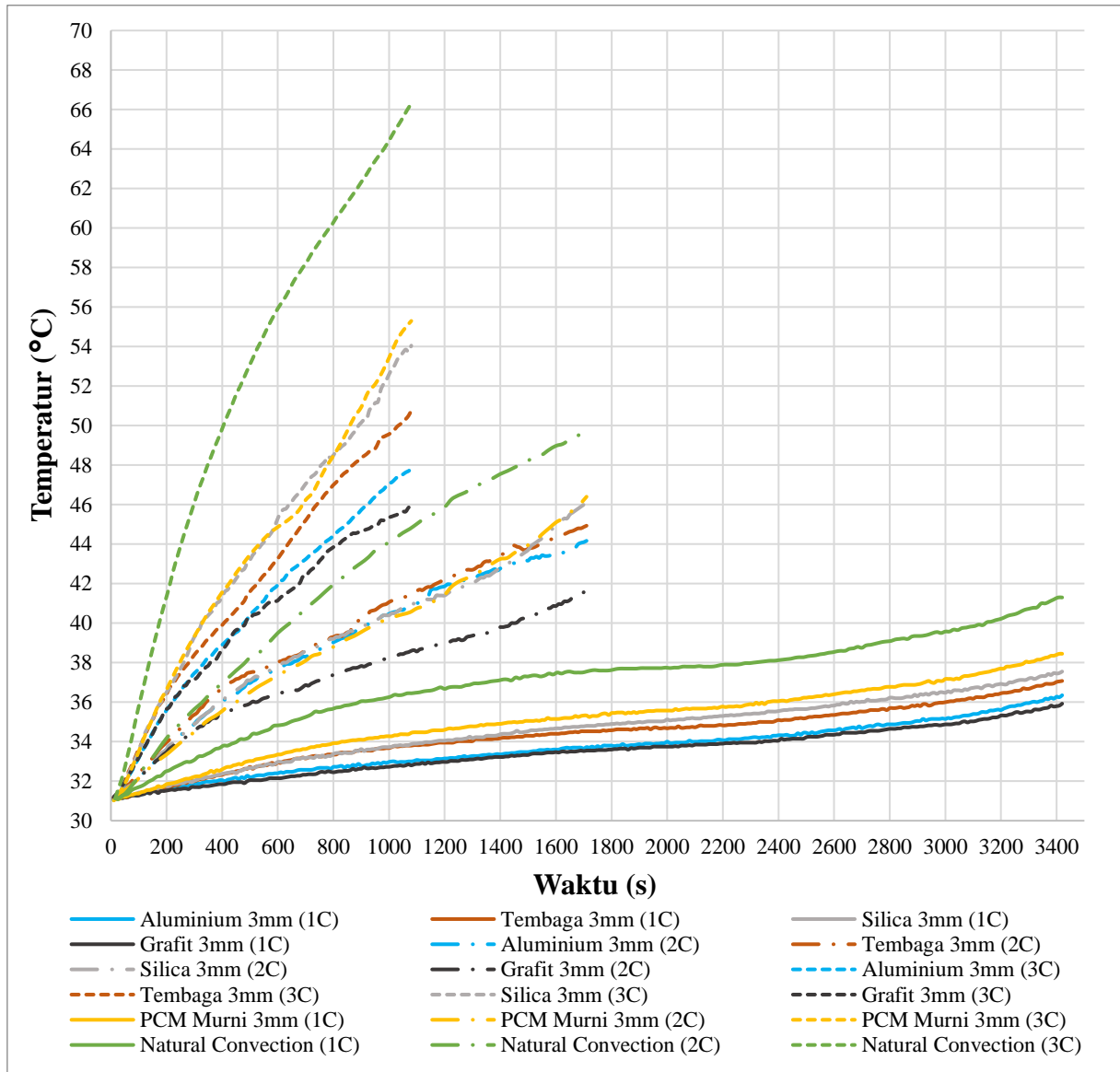
Berdasarkan grafik tersebut, terlibat pada sistem *natural convection* memiliki laju penurunan temperatur awal yang tinggi namun tidak mampu mempertahankan penurunan yang signifikan dalam jangka panjang. Pada sistem PCM murni memberikan penurunan laju temperatur yang lebih stabil namun kurang efektif dibandingkan dengan PCM komposit. PCM dengan material *filler* seperti grafit, aluminium, dan tembaga secara signifikan menurunkan laju kenaikan temperatur dibandingkan dengan *natural convection* dan PCM murni, tetapi tidak dengan PCM silika. Hal ini dapat disebabkan karena material silika mempunyai *specific heat* yang paling tinggi daripada material lainnya, sehingga pada ketebalan 9 mm menyebabkan kemampuan penyimpanan panas nya semakin besar dan mengurangi nilai *thermal diffusivity* nya. PCM grafit dan aluminium menunjukkan performa terbaik dalam menstabilkan dan menurunkan laju kenaikan temperatur. Selain itu, PCM grafit dan aluminium menunjukkan kestabilan yang lebih baik dalam laju kenaikan temperatur dibandingkan dengan keempat variasi lainnya. Berdasarkan analisis ini, penggunaan PCM komposit dengan material *filler* lebih efektif dalam menurunkan laju kenaikan temperatur pada baterai *lithium ion* selama proses *discharging* dibandingkan dengan *natural convection*, dan PCM murni.

### **4.3 Pengaruh Variasi Material *Filler* pada PCM Komposit terhadap Kenaikan *Temperature* Baterai**

Pada sub bab ini, akan dibahas pengaruh variasi antar material *filler* PCM terhadap kenaikan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion* selama proses *discharging*. Dari empat macam sistem pendinginan PCM komposit yang telah dilakukan eksperimen (Grafrit, Aluminium, Silika, Tembaga) dan sistem pendinginan PCM murni serta *Natural convection*, akan dibandingkan performa dan efektivitasnya dalam menurunkan laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion*. Analisis akan dilakukan pada tiga macam ketebalan, yaitu :

### 4.3.1 Analisa pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 3mm

Hasil pengujian baterai dengan menggunakan sistem *natural convection*, PCM murni, dan PCM komposit untuk semua variasi material *filler* pada ketebalan 3 mm dengan ratio *filler* 0,3 telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik hubungan antara temperatur dan waktu pada kondisi *discharging rate* 1C-3C ditunjukkan pada gambar 4.5 berikut.



**Gambar 4.5** Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi Ketebalan PCM 3 mm

Masing – masing *discharging rate* memiliki waktu pengujian yang berbeda. Baterai dengan *discharging rate* 1C memiliki waktu operasi 3420 detik, 2C beroperasi selama 1710 detik dan 3C beroperasi selama 1080 detik. Waktu antar variasi dalam *discharging rate* yang sama disamakan untuk memudahkan perbandingan temperatur antar variasi. Berdasarkan gambar 4.5 di atas, didapatkan pada pengujian arus 1C sistem pendinginan *natural convection* memiliki peningkatan *temperature* paling tinggi pada 1C hingga mencapai pada temperatur maksimalnya, yaitu pada 41.3 °C setelah 3420 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni ketebalan 3 mm, temperatur juga meningkat secara perlahan namun tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai



temperatur maksimal pada 38.45 °C. Dengan PCM material *filler* silika, temperatur meningkat secara perlahan hingga mencapai temperatur maksimal pada 37.55 °C sementara pada material *filler* tembaga, temperatur meningkat sedikit lebih rendah daripada silika hingga mencapai temperatur maksimal pada 37.075 °C. Untuk material *filler* aluminium, peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada tembaga hingga mencapai temperatur maksimal pada 36.35 °C. Terakhir, peningkatan *temperature* yang paling rendah pada 1C dialami oleh material *filler* grafit dengan peningkatan *temperature* hingga 35.925 °C.

Pada pengujian arus, 2C dengan sistem pendinginan *natural convection*, temperatur meningkat lebih cepat dibandingkan dengan 1C dan memiliki peningkatan temperatur paling tinggi pada 2C hingga mencapai temperatur maksimal pada 49.625 °C setelah 1710 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni ketebalan 3 mm, temperatur tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 46.4 °C. Pada material *filler* silika, temperatur meningkat sedikit lebih rendah daripada PCM murni hingga mencapai temperatur maksimal pada 46.1 °C sedangkan pada material *filler* tembaga, temperatur meningkat sedikit lebih rendah daripada silika hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.93 °C. Untuk material *filler* aluminium, peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada tembaga hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.166 °C. Terakhir, peningkatan *temperature* yang paling rendah pada 2C dialami oleh material *filler* grafit dengan peningkatan *temperature* hingga 41.667 °C.

Pada pengujian arus 3C dengan sistem pendinginan *natural convection*, temperatur meningkat cukup cepat dan memiliki peningkatan temperatur paling tinggi secara keseluruhan hingga mencapai pada temperatur maksimalnya, yaitu pada 66.3 °C setelah 1080 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni ketebalan 3 mm, temperatur tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 55.3 °C. Pada material *filler* silika, temperatur juga meningkat cukup cepat tetapi lebih rendah dari PCM murni hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 54.05 °C. Sedangkan pada material *filler* tembaga, temperatur juga meningkat cepat tetapi lebih rendah daripada silika dengan temperatur maksimal sebesar 50.766 °C. Untuk material *filler* aluminium, temperatur juga meningkat cepat tetapi lebih rendah daripada tembaga hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 47.8 °C. Terakhir, peningkatan *temperature* yang paling rendah pada 3C dialami oleh material *filler* grafit dengan peningkatan *temperature* hingga 45.95 °C.

Pada *discharging rate* 1C, terlihat bahwa sistem pendinginan menggunakan PCM komposit dengan material *filler* grafit memiliki performa terbaik dalam menurunkan kenaikan temperatur. Grafik menunjukkan bahwa PCM komposit grafit memiliki peningkatan temperatur yang paling rendah dibandingkan dengan silika, aluminium, dan tembaga. Pada *discharging rate* ini, aluminium menunjukkan performa yang cukup baik namun tidak sebaik grafit, sedangkan silika menunjukkan peningkatan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan material *filler* lainnya. Saat *discharging rate* dinaikkan menjadi 2C, terdapat persamaan pola dengan 1C, di mana grafit menunjukkan peningkatan temperatur yang jauh lebih rendah dibandingkan material *filler* lainnya. Tetapi, perbedaan performa antara grafit dan material *filler* lainnya menjadi lebih signifikan. Aluminium, tembaga, dan silika mulai menunjukkan peningkatan temperatur yang lebih tajam dibandingkan grafit. Silika masih menunjukkan performa yang paling rendah dalam hal menahan kenaikan temperatur, dengan peningkatan *temperature* yang lebih tinggi dari material *filler* lainnya. Pada *discharging rate* tertinggi, yaitu 3C, perbedaan antara performa material *filler* semakin jelas. Grafit menunjukkan performa terbaik dengan peningkatan temperatur yang paling rendah dibandingkan material *filler* lainnya. Silika menunjukkan peningkatan temperatur yang paling tinggi, yang

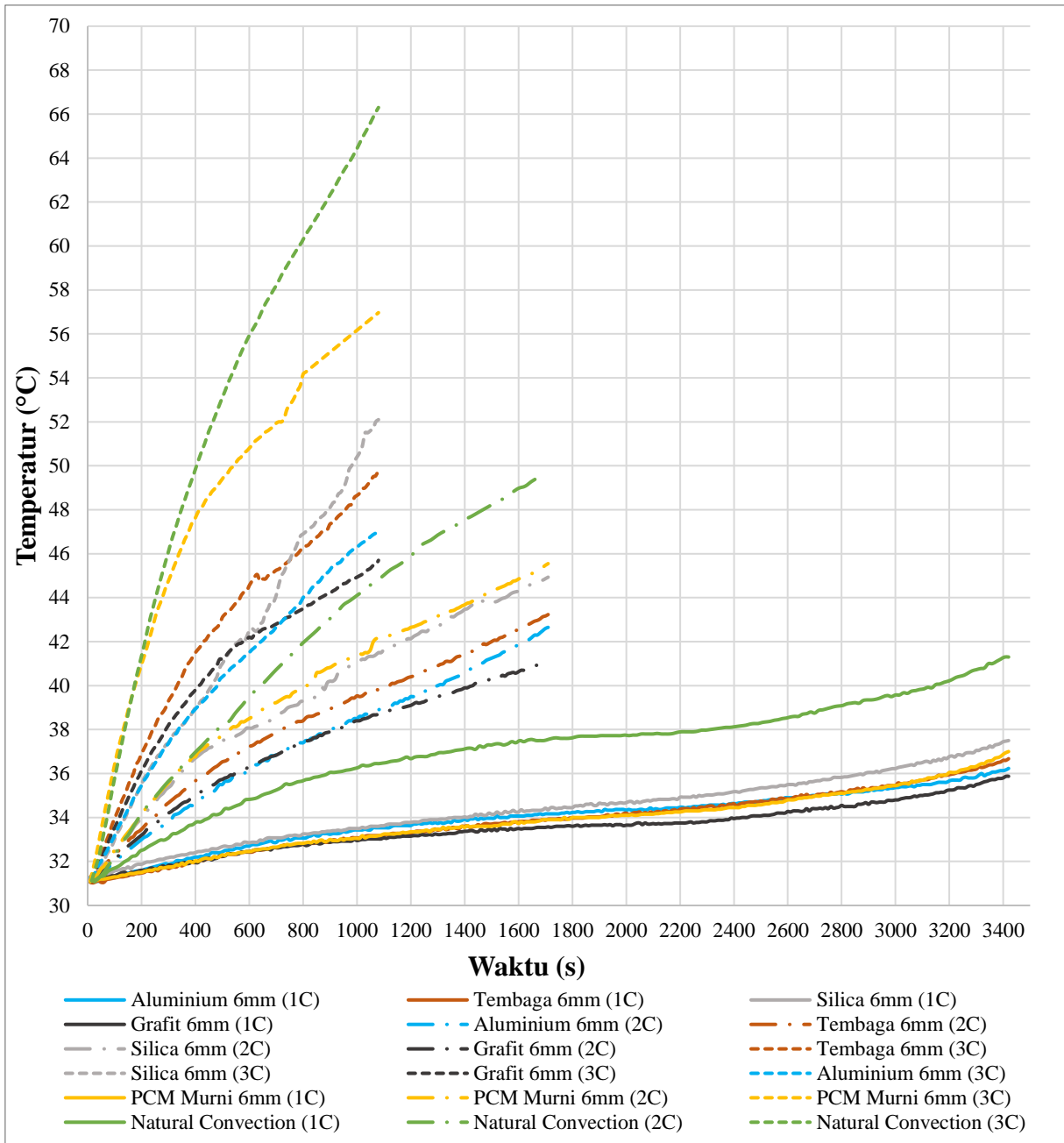
menunjukkan bahwa material ini kurang efektif dibandingkan material *filler* lainnya dalam menahan kenaikan temperatur pada kondisi *discharging rate* untuk ketebalan 3 mm.

Berdasarkan analisis grafik yang telah dilakukan untuk PCM dengan ketebalan 3 mm, terlihat bahwa PCM dengan material *filler* grafit memiliki performa sistem pendinginan terbaik dalam menurunkan kenaikan temperatur baterai pada berbagai *discharging rate*. Performa PCM komposit dengan material *filler* silika cenderung paling rendah dalam menahan kenaikan temperatur pada semua *discharging rate* yang diuji. Berdasarkan data tersebut, didapatkan juga penggunaan PCM komposit cukup signifikan mengurangi kenaikan temperatur dibandingkan dengan sistem *natural convection* dan sistem PCM murni. Selain itu, tingkat *discharging rate* memberi pengaruh, dimana semakin tinggi *discharging rate* pada baterai, waktu pengosongan arus listrik pada baterai juga semakin pendek, yang menyebabkan perubahan suhu menjadi semakin tinggi.

Data yang diperoleh oleh peneliti terdapat kemungkinan adanya kesalahan. Kesalahan ini dapat muncul dari kondisi alat dan bahan saat melaksanakan pengujian. Terdapat kemungkinan *thermocouple* tidak menempel secara sempurna dengan permukaan baterai karena masih adanya sekat PCM yang menghalangi *thermocouple* untuk menempel pada permukaan baterai. Lalu terdapat kemungkinan PCM tidak tercampur secara merata dengan material *filler*, sehingga dapat menyebabkan adanya bagian dari PCM yang belum tercampur secara sempurna. Dan kemungkin terakhirnya diakibatkan oleh titik leleh PCM yang berada di suhu 44 °C, sehingga untuk *discharging rate* 2C dan 3C adanya kemungkinan PCM mulai meleleh sedikit demi sedikit setelah beroperasi di atas temperatur 44 °C. Hal ini membuat *thermocouple* longgar dan tidak menempel secara sempurna ke permukaan baterai.

#### **4.3.2 Analisa pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 6mm**

Hasil pengujian baterai dengan menggunakan sistem *natural convection*, PCM murni, dan PCM komposit untuk semua variasi material *filler* pada ketebalan 6 mm dengan ratio *filler* 0,3 telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik hubungan antara *temperature* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 1C-3C ditunjukkan pada gambar 4.6 berikut



**Gambar 4.6** Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi Ketebalan PCM 6mm

Masing – masing *discharging rate* memiliki waktu pengujian yang berbeda. Baterai dengan *discharging rate* 1C memiliki waktu operasi 3420 detik, 2C beroperasi selama 1710 detik dan 3C beroperasi selama 1080 detik. Waktu antar variasi dalam *discharging rate* yang sama disamakan untuk memudahkan perbandingan temperatur antar variasi. Berdasarkan gambar 4.6 di atas, didapatkan pada pengujian arus 1C sistem pendinginan *natural convection* memiliki peningkatan temperatur paling tinggi pada 1C hingga mencapai pada temperatur maksimalnya, yaitu pada 41.3 °C setelah 3420 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni ketebalan 6 mm, temperatur juga meningkat secara perlahan namun tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 37 °C. Dengan PCM material *filler* silika, temperatur meningkat secara perlahan hingga mencapai temperatur maksimal pada 37.5 °C sementara pada material

*filler* tembaga, temperatur meningkat sedikit lebih rendah daripada silika hingga mencapai temperatur maksimal pada 36.675 °C. Untuk material *filler* aluminium, peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada tembaga hingga mencapai temperatur maksimal pada 36.233 °C. Terakhir, peningkatan *temperature* yang paling rendah pada 1C dialami oleh material *filler* grafit dengan peningkatan *temperature* hingga 35.875 °C.

Pada pengujian arus, 2C dengan sistem pendinginan *natural convection*, temperatur meningkat lebih cepat dibandingkan dengan 1C dan memiliki peningkatan temperatur paling tinggi pada 2C hingga mencapai temperatur maksimal pada 49.625 °C setelah 1710 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni ketebalan 6 mm, temperatur tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 45.55 °C. Pada material *filler* silika, temperatur meningkat sedikit lebih rendah daripada PCM murni hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.933 °C. Sedangkan pada material *filler* tembaga, temperatur meningkat sedikit lebih rendah daripada silika, hingga mencapai temperatur maksimal pada 43.233 °C. Untuk material *filler* aluminium, peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada tembaga hingga mencapai temperatur maksimal pada 42.65 °C. Terakhir, peningkatan *temperature* yang paling rendah pada 2C dialami oleh material *filler* grafit dengan peningkatan *temperature* hingga 41.133 °C.

Pada pengujian arus 3C dengan sistem pendinginan *natural convection*, temperatur meningkat cukup cepat dan memiliki peningkatan temperatur paling tinggi secara keseluruhan hingga mencapai pada temperatur maksimalnya, yaitu pada 66.3 °C setelah 1080 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni ketebalan 6 mm, temperatur tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 56.967 °C. Pada material *filler* silika, temperatur juga meningkat cukup cepat tetapi lebih rendah dari PCM murni hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 52.1 °C. Sedangkan pada material *filler* tembaga, *temperature* juga meningkat cepat tetapi lebih rendah daripada silika dengan temperatur maksimal sebesar 49.8 °C. Untuk material *filler* aluminium, *temperature* juga meningkat cepat tetapi lebih rendah daripada tembaga hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 47 °C. Terakhir, peningkatan *temperature* yang paling rendah pada 3C dialami oleh material *filler* grafit dengan peningkatan *temperature* hingga 45.7 °C.

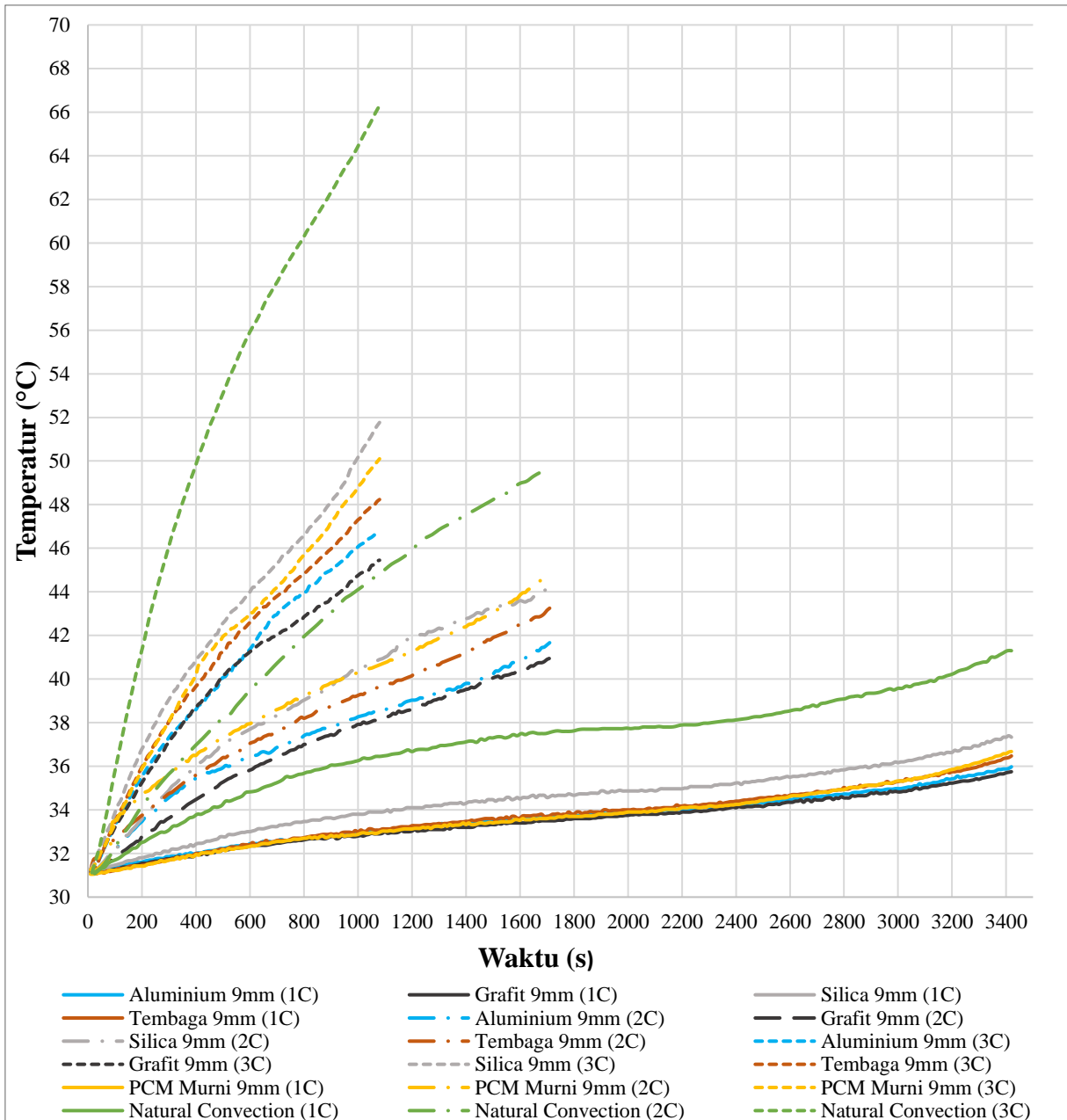
Pada *discharging rate* 1C, terlihat bahwa sistem pendinginan menggunakan PCM komposit dengan material *filler* grafit memiliki performa terbaik dalam menurunkan peningkatan temperatur. Grafik menunjukkan bahwa PCM komposit grafit memiliki peningkatan temperatur yang paling rendah dibandingkan dengan tembaga, silika, dan aluminium. Pada *discharging rate* ini, tembaga dan aluminium menunjukkan performa yang cukup baik namun tidak sebaik grafit, sedangkan silika menunjukkan peningkatan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan material *filler* lainnya. Saat *discharging rate* dinaikkan menjadi 2C, terdapat persamaan pola dengan 1C, di mana grafit menunjukkan peningkatan temperatur yang jauh lebih rendah dibandingkan material *filler* lainnya. Tembaga dan aluminium mulai menunjukkan peningkatan temperatur yang lebih tajam dibandingkan grafit. Silika masih menunjukkan performa yang paling rendah dalam hal menahan kenaikan temperatur, dengan peningkatan kenaikan yang lebih tinggi dari material *filler* lainnya. Pada *discharging rate* tertinggi, yaitu 3C, perbedaan antara performa material *filler* semakin jelas. Grafit menunjukkan performa terbaik dengan peningkatan temperatur yang paling rendah dibandingkan material *filler* lainnya. Silika menunjukkan laju kenaikan temperatur yang paling tinggi, menunjukkan bahwa material ini kurang efektif dibandingkan material *filler* lainnya dalam menahan kenaikan temperatur pada kondisi *discharging rate* yang lebih tinggi untuk ketebalan 6 mm.

Berdasarkan analisis grafik yang telah dilakukan untuk PCM dengan ketebalan 6 mm, terlihat bahwa PCM dengan material *filler* grafit memiliki performa sistem pendinginan terbaik dalam menurunkan kenaikan temperatur baterai pada berbagai *discharging rate*. Performa PCM dengan material *filler* silika cenderung paling rendah dalam menahan kenaikan temperatur pada semua *discharging rate* yang diuji. Berdasarkan data tersebut, didapatkan juga penggunaan PCM komposit cukup signifikan mengurangi kenaikan temperatur dibandingkan dengan sistem *natural convection* dan sistem PCM murni. Selain itu, tingkat *discharging rate* memberi pengaruh, dimana semakin tinggi *discharging rate* pada baterai, waktu pengosongan arus listrik pada baterai juga semakin pendek, yang menyebabkan perubahan suhu menjadi semakin tinggi.

Data yang diperoleh oleh peneliti terdapat kemungkinan adanya kesalahan. Kesalahan ini dapat muncul dari kondisi alat dan bahan saat melaksanakan pengujian. Terdapat kemungkinan *thermocouple* tidak menempel secara sempurna dengan permukaan baterai karena masih adanya sekat PCM yang menghalangi *thermocouple* untuk menempel pada permukaan baterai. Lalu terdapat kemungkinan PCM tidak tercampur secara merata dengan material *filler*, sehingga dapat menyebabkan adanya bagian dari PCM yang belum tercampur secara sempurna. Dan kemungkin terakhirnya diakibatkan oleh titik leleh PCM yang berada di suhu 44 °C, sehingga untuk *discharging rate* 2C dan 3C adanya kemungkinan PCM mulai meleleh sedikit demi sedikit setelah beroperasi di atas temperatur 44 °C. Hal ini membuat *thermocouple* longgar dan tidak menempel secara sempurna ke permukaan baterai.

#### **4.3.3 Analisa pada Baterai dengan Ketebalan PCM Komposit 9 mm**

Hasil pengujian baterai dengan menggunakan sistem *natural convection*, PCM murni, dan PCM komposit untuk semua variasi material *filler* pada ketebalan 9 mm dengan ratio *filler* 0,3 telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik hubungan antara *temperature* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 1C-3C ditunjukkan pada gambar 4.7 berikut



**Gambar 4.7** Grafik Perbandingan Kenaikan *Temperature* terhadap Waktu pada Variasi Ketebalan PCM 9mm

Masing – masing *discharging rate* memiliki waktu pengujian yang berbeda. Baterai dengan *discharging rate* 1C memiliki waktu operasi 3420 detik, 2C beroperasi selama 1710 detik dan 3C beroperasi selama 1080 detik. Waktu antar variasi dalam *discharging rate* yang sama disamakan untuk memudahkan perbandingan temperatur antar variasi. Berdasarkan gambar 4.7 di atas, didapatkan pada pengujian arus 1C sistem pendinginan *natural convection* memiliki peningkatan temperatur paling tinggi pada 1C hingga mencapai pada temperatur maksimalnya, yaitu pada 41.3 °C setelah 3420 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni ketebalan 9 mm, temperatur juga meningkat secara perlahan namun tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 36.675 °C. Dengan PCM material *filler* silika, temperatur meningkat secara perlahan hingga mencapai temperatur maksimal pada 37.333 °C sementara pada material *filler* tembaga, temperatur meningkat sedikit lebih rendah daripada silika hingga

mencapai temperatur maksimal pada 36.475 °C. Untuk material *filler* aluminium, peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada tembaga hingga mencapai temperatur maksimal pada 35.975 °C. Terakhir, peningkatan *temperature* yang paling rendah pada 1C dialami oleh material *filler* grafit dengan peningkatan *temperature* hingga 35.75 °C.

Pada pengujian arus, 2C dengan sistem pendinginan *natural convection*, temperatur meningkat lebih cepat dibandingkan dengan 1C dan memiliki peningkatan temperatur paling tinggi pada 2C hingga mencapai temperatur maksimal pada 49.62 °C setelah 1710 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni ketebalan 9 mm, temperatur tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.775 °C. Pada material *filler* silika, temperatur meningkat sedikit lebih rendah daripada PCM murni hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.167 °C. Sedangkan pada material *filler* tembaga, temperatur meningkat sedikit lebih rendah daripada silika hingga mencapai temperatur maksimal pada 43.25 °C. Untuk material *filler* aluminium, peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada tembaga hingga mencapai temperatur maksimal pada 41.667 °C. Terakhir, peningkatan *temperature* yang paling rendah pada 2C dialami oleh material *filler* grafit dengan peningkatan *temperature* hingga 40.95 °C.

Pada pengujian arus 3C dengan sistem pendinginan *natural convection*, temperatur meningkat cukup cepat dan memiliki peningkatan temperatur paling tinggi secara keseluruhan hingga mencapai pada temperatur maksimalnya, yaitu pada 66.3 °C setelah 1080 detik. Kemudian pada saat menggunakan sistem PCM murni ketebalan 9 mm, temperatur tersusun jauh lebih rendah dibandingkan dengan sistem *natural convection* hingga mencapai temperatur maksimal pada 50.1 °C. Pada material *filler* silika, temperatur juga meningkat cukup cepat tetapi masih lebih tinggi dari PCM murni hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 51.767 °C. Sedangkan pada material *filler* tembaga, temperatur juga meningkat cepat tetapi lebih rendah daripada silika dengan temperatur maksimal sebesar 48.233 °C. Untuk material *filler* aluminium, temperatur juga meningkat cepat tetapi lebih rendah daripada tembaga hingga mencapai temperatur maksimalnya sebesar 46.767 °C. Terakhir, peningkatan *temperature* yang paling rendah pada 3C dialami oleh material *filler* grafit dengan peningkatan *temperature* hingga 45.45 °C.

Pada *discharging rate* 1C, terlihat bahwa sistem pendinginan menggunakan PCM komposit dengan material *filler* grafit memiliki performa terbaik dalam menurunkan peningkatan temperatur. Grafik menunjukkan bahwa PCM komposit grafit memiliki peningkatan temperatur yang paling rendah dibandingkan dengan tembaga, silika, dan aluminium. Pada *discharging rate* ini, aluminium dan tembaga menunjukkan performa yang cukup baik namun tidak sebaik grafit, sedangkan silika menunjukkan peningkatan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan material *filler* lainnya. Saat *discharging rate* dinaikkan menjadi 2C, terdapat persamaan pola dengan 1C, di mana grafit menunjukkan peningkatan temperatur yang lebih rendah dibandingkan material *filler* lainnya. Perbedaan performa antara grafit dan aluminium hanya terpaut tipis. Tembaga dan silika mulai menunjukkan peningkatan temperatur yang lebih tajam dibandingkan grafit. Silika masih menunjukkan performa yang paling rendah dalam hal menahan kenaikan temperatur, dengan peningkatan kenaikan yang lebih tinggi dari material *filler* lainnya. Pada *discharging rate* tertinggi, yaitu 3C, perbedaan antara performa material *filler* semakin jelas. Grafit menunjukkan performa terbaik dengan peningkatan temperatur yang paling rendah, Silika menunjukkan laju kenaikan temperatur yang paling tinggi, yang menunjukkan bahwa material ini kurang efektif dibandingkan material *filler* lainnya dalam menahan kenaikan temperatur pada kondisi *discharging rate* yang lebih tinggi untuk ketebalan 9 mm.

Berdasarkan analisis grafik yang telah dilakukan untuk PCM dengan ketebalan 6 mm, terlihat bahwa PCM dengan material *filler* grafit memiliki performa sistem pendinginan

terbaik dalam menurunkan kenaikan temperatur baterai pada berbagai *discharging rate*. Performa PCM dengan material *filler* silika cenderung paling rendah dalam menahan kenaikan temperatur pada semua *discharging rate* yang diuji. Berdasarkan data tersebut, didapatkan juga penggunaan PCM komposit cukup signifikan mengurangi kenaikan temperatur dibandingkan dengan sistem *natural convection* dan sistem PCM murni. Selain itu, tingkat *discharging rate* memberi pengaruh, dimana semakin tinggi *discharging rate* pada baterai, waktu pengosongan arus listrik pada baterai juga semakin pendek, yang menyebabkan perubahan suhu menjadi semakin tinggi.

Data yang diperoleh oleh peneliti terdapat kemungkinan adanya kesalahan. Kesalahan ini dapat muncul dari kondisi alat dan bahan saat melaksanakan pengujian. Terdapat kemungkinan *thermocouple* tidak menempel secara sempurna dengan permukaan baterai karena masih adanya sekat PCM yang menghalangi *thermocouple* untuk menempel pada permukaan baterai. Lalu terdapat kemungkinan PCM tidak tercampur secara merata dengan material *filler*, sehingga dapat menyebabkan adanya bagian dari PCM yang belum tercampur secara sempurna. Dan kemungkin terakhirnya diakibatkan oleh titik leleh PCM yang berada di suhu 44 °C, sehingga untuk *discharging rate* 2C dan 3C adanya kemungkinan PCM mulai meleleh sedikit demi sedikit setelah beroperasi di atas temperatur 44 °C. Hal ini membuat *thermocouple* longgar dan tidak menempel secara sempurna ke permukaan baterai.

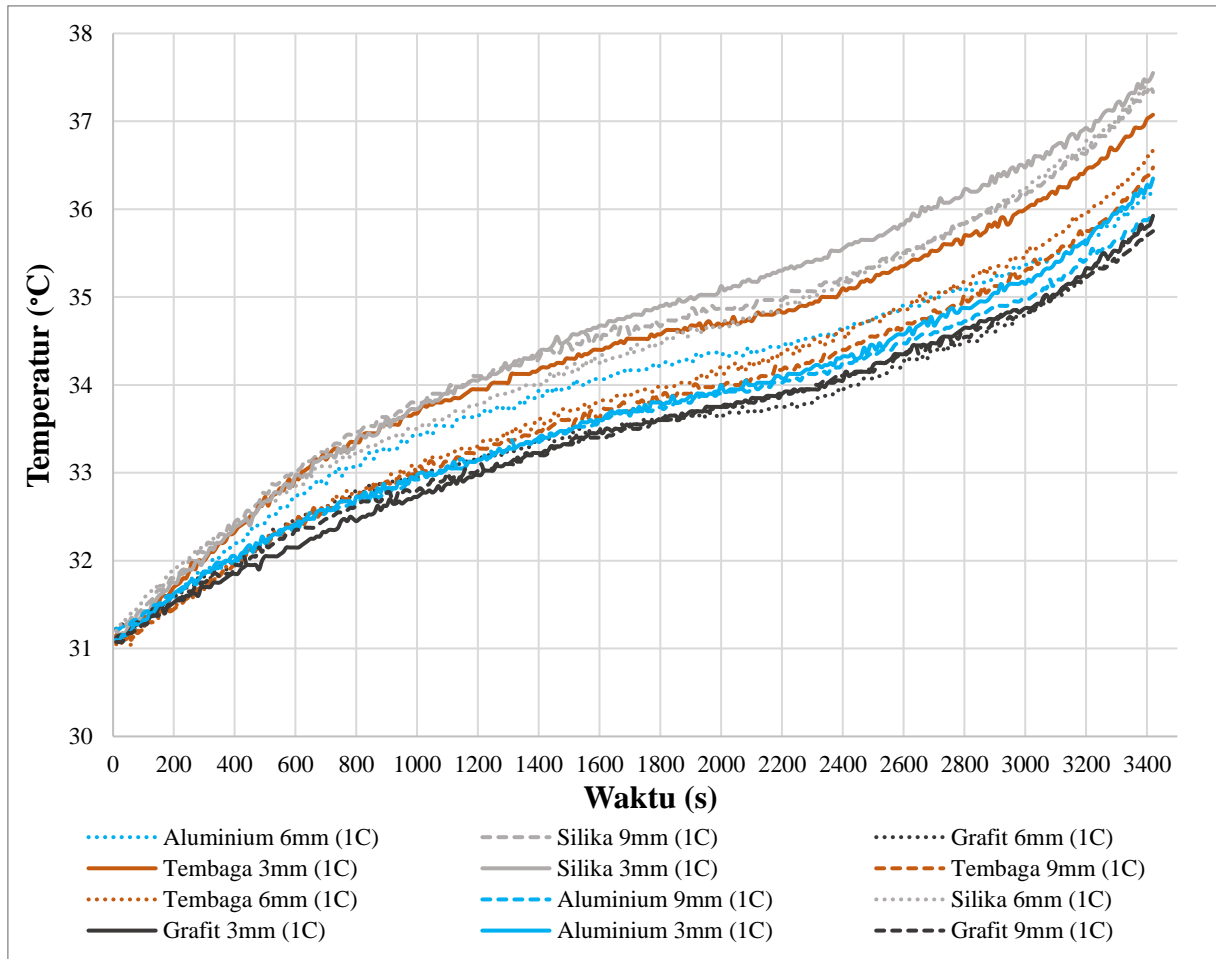
#### **4.4 Pengaruh Variasi Ketebalan PCM Komposit terhadap Kenaikan Temperature Baterai**

Pada sub bab ini, akan dibahas pengaruh variasi ketebalan antar PCM komposit terhadap kenaikan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion* selama proses *discharging*. Dari tiga macam variasi ketebalan PCM komposit yang telah dilakukan eksperimen (3 mm, 6 mm, 9 mm), akan dibandingkan performa dan efektifitasnya dalam menurunkan laju kenaikan temperatur pada permukaan baterai *lithium ion*. Analisis akan dilakukan pada tiga kondisi *discharging rate*, yaitu :

##### **4.4.1 Analisa pada Baterai dengan Discharging Rate 1C**

Hasil pengujian baterai dengan menggunakan sistem PCM komposit untuk semua variasi material *filler* pada ketebalan (3mm, 6mm, 9mm) dengan ratio *filler* 0,3 telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik hubungan antara *temperature* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 1C ditunjukkan pada gambar 4.8 berikut





**Gambar 4.8** Grafik Perbandingan kenaikan *Temperature* terhadap Waktu pada Variasi *C-Rate* 1C

Pada kondisi *discharging* 1C di gambar 4.8, didapatkan pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan material *filler* silika mempunyai peningkatan temperatur tertinggi daripada material *filler* lainnya. Pada PCM silika dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 37.55 °C sedangkan pada silika ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* sedikit lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 37.5 °C. Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada silika dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 37.333 °C.

Untuk material *filler* tembaga, peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada material *filler* silika. Pada PCM tembaga dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 37.075 °C sedangkan pada tembaga ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 36.675 °C. Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada tembaga dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 36.475 °C.

Selanjutnya, material *filler* aluminium memiliki peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada material *filler* tembaga. Pada PCM aluminium dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 36.35 °C sedangkan pada aluminium ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 36.233 °C.

Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada aluminium dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 35.975 °C.

Material *filler* grafit mempunyai peningkatan nilai *temperature* yang paling rendah dibandingkan material *filler* lainnya. Pada PCM grafit dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 35.925 °C sedangkan pada grafit ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 35.875 °C. Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada grafit dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 35.75 °C.

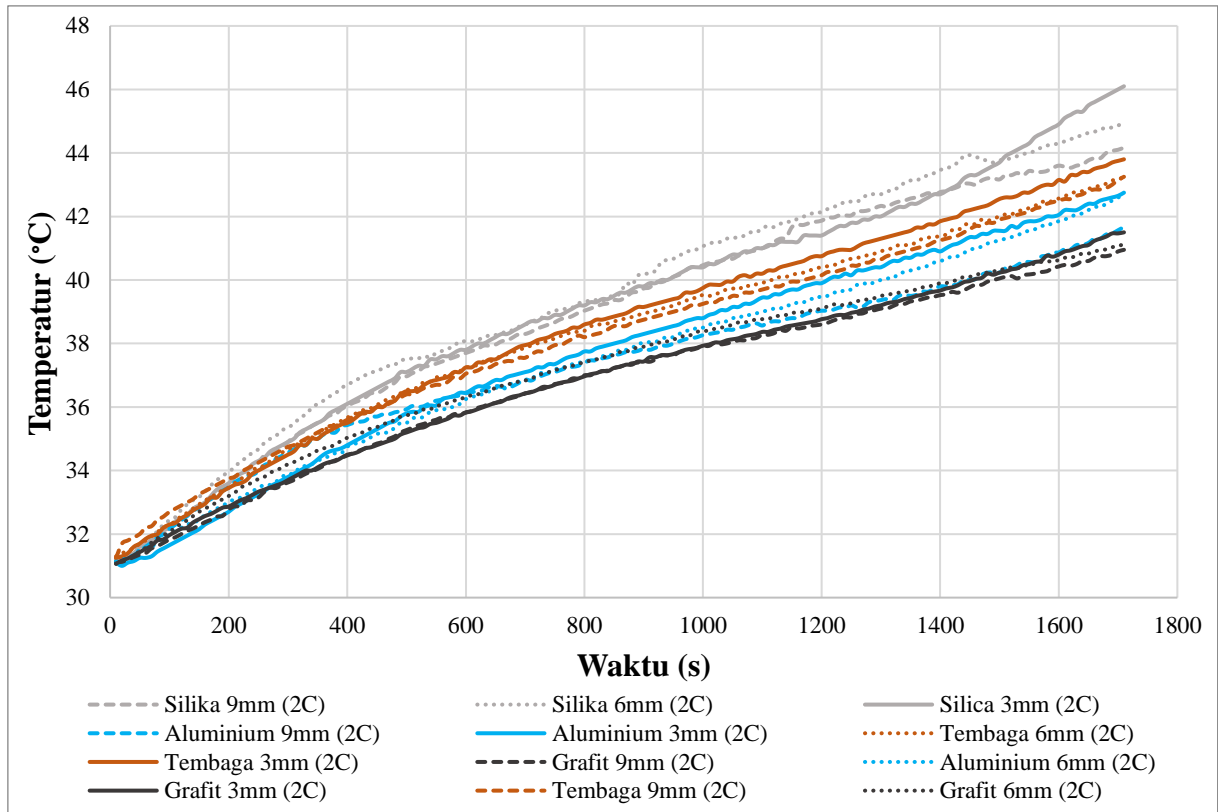
Nilai temperatur tertinggi terdapat pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan material *filler* silika sebesar 37.55 °C dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan material *filler* grafit sebesar 35.75 °C. Analisis grafik menunjukkan bahwa PCM komposit dengan ketebalan 9 mm memiliki performa yang lebih baik dalam menahan kenaikan temperatur pada *discharging rate* 1C dibandingkan dengan ketebalan yang lebih rendah.. Hal ini sejalan dengan teori dari persamaan,

$$q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

Dimana, semakin tebal PCM, maka massa (m) akan semakin besar. Dengan massa yang lebih besar, kemampuan PCM untuk menyerap panas juga meningkat, sehingga perubahan suhu ( $\Delta T$ ) menjadi lebih rendah. Dengan kata lain, PCM yang lebih tebal memiliki kapasitas termal yang lebih tinggi dan mampu menahan kenaikan temperatur dengan lebih baik, sehingga peningkatan temperatur baterai menjadi lebih rendah. Teori ini mendukung hasil eksperimen yang menunjukkan bahwa ketebalan PCM yang lebih tinggi berkontribusi pada penurunan laju kenaikan temperatur baterai, dengan material *filler* grafit menunjukkan performa terbaik dalam menurunkan temperatur baterai.

#### **4.4.2 Analisa pada Baterai dengan *Discharging Rate* 2C**

Hasil pengujian baterai dengan menggunakan sistem PCM komposit untuk semua variasi material *filler* pada ketebalan (3mm, 6mm, 9mm) dengan ratio *filler* 0,3 telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik hubungan antara *temperature* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 2C ditunjukkan pada gambar 4.9 berikut



**Gambar 4.9** Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi *C Rate* 2C

Pada kondisi *discharging* 2C di gambar 4.9, didapatkan pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan material *filler* silika mempunyai peningkatan temperatur tertinggi daripada material *filler* lainnya. Pada PCM silika dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 46.1 °C sedangkan pada silika ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 44.933 °C. Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada silika dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 44.167 °C.

Untuk material *filler* tembaga, peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada material *filler* silika. Pada PCM tembaga dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 43.8 °C sedangkan pada tembaga ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 43.233 °C. Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada tembaga dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 43.25 °C.

Selanjutnya, material *filler* aluminium memiliki peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada material *filler* tembaga. Pada PCM aluminium dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 42.75 °C sedangkan pada aluminium ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 42.65 °C. Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada aluminium dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 41.667 °C.

Material *filler* grafit mempunyai peningkatan nilai *temperature* yang paling rendah dibandingkan material *filler* lainnya. Pada PCM grafit dengan ketebalan 3 mm peningkatan

*temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 41.5°C sedangkan pada grafit ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 41.13 °C. Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada grafit dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 40.95°C.

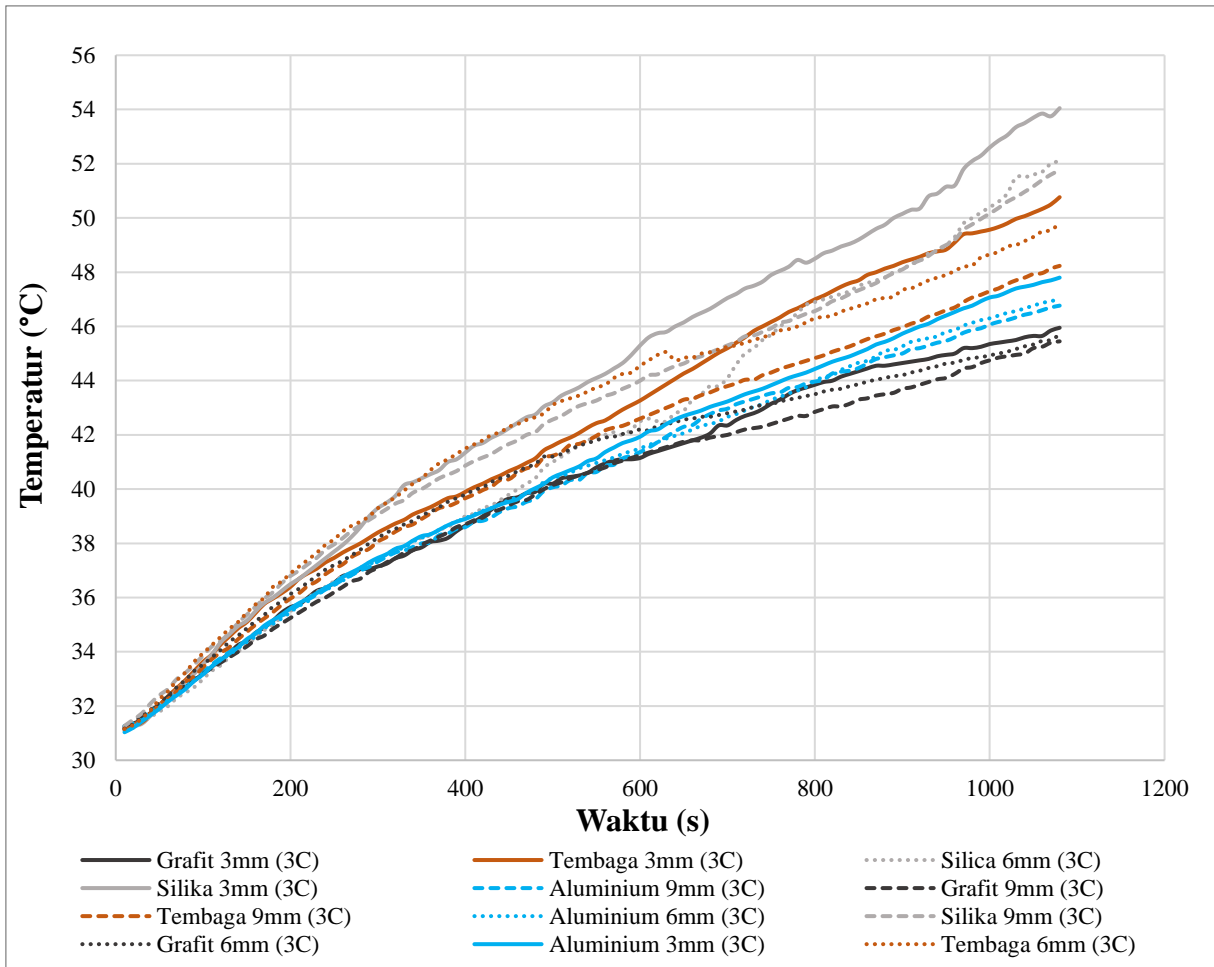
Nilai temperatur tertinggi terdapat pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan material *filler* silika sebesar 46.1 °C dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan material *filler* grafit sebesar 40.95 °C. Analisis grafik menunjukkan bahwa PCM komposit dengan ketebalan 9 mm memiliki performa yang lebih baik dalam menahan kenaikan temperatur pada *discharging rate* 2C dibandingkan dengan ketebalan yang lebih rendah. Hal ini sejalan dengan teori dari persamaan,

$$q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

Dimana, semakin tebal PCM, maka massa (m) akan semakin besar. Dengan massa yang lebih besar, kemampuan PCM untuk menyerap panas juga meningkat, sehingga perubahan suhu ( $\Delta T$ ) menjadi lebih rendah. Dengan kata lain, PCM yang lebih tebal memiliki kapasitas termal yang lebih tinggi dan mampu menahan kenaikan temperatur dengan lebih baik, sehingga peningkatan temperatur baterai menjadi lebih rendah. Teori ini mendukung hasil eksperimen yang menunjukkan bahwa ketebalan PCM yang lebih tinggi berkontribusi pada penurunan laju kenaikan temperatur baterai, dengan material *filler* grafit menunjukkan performa terbaik dalam menurunkan temperatur baterai.

#### **4.4.3 Analisa pada Baterai dengan *Discharging Rate* 3C**

Hasil pengujian baterai dengan menggunakan sistem PCM komposit untuk semua variasi material *filler* pada ketebalan (3mm, 6mm, 9mm) dengan ratio *filler* 0,3 telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik hubungan antara *temperature* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 3 C ditunjukkan pada gambar 4.9 berikut



**Gambar 4.10** Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi C-Rate 3C

Pada kondisi *discharging* 3C di gambar 4.10, didapatkan pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan material *filler* silika mempunyai peningkatan temperatur tertinggi daripada material *filler* lainnya. Pada PCM silika dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 54.05 °C sedangkan pada silika ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* sedikit lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 52.1°C. Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada silika dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 51.767 °C.

Untuk material *filler* tembaga, peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada material *filler* silika. Pada PCM tembaga dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 50.767 °C sedangkan pada tembaga ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 49.8 °C. Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada tembaga dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 48.233 °C.

Selanjutnya, material *filler* aluminium memiliki peningkatan *temperature* meningkat lebih rendah daripada material *filler* tembaga. Pada PCM aluminium dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 47.8 °C sedangkan pada aluminium ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 47 °C. Peningkatan

*temperature* yang paling rendah pada aluminium dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 46.767 °C.

Material *filler* grafit mempunyai peningkatan nilai *temperature* yang paling rendah dibandingkan material *filler* lainnya. Pada PCM grafit dengan ketebalan 3 mm peningkatan *temperature* hingga mencapai *temperature* maksimal pada 45.95 °C sedangkan pada grafit ketebalan 6 mm peningkatan *temperature* cenderung lebih rendah bila dibandingkan dengan 3 mm, hingga mencapai temperatur maksimal pada 45.7 °C. Peningkatan *temperature* yang paling rendah pada grafit dialami oleh ketebalan 9 mm dengan peningkatan *temperature* hingga 45.45 °C.

Nilai temperatur tertinggi terdapat pada PCM komposit ketebalan 3 mm dengan material *filler* silika sebesar 54.05 °C dan nilai temperatur terendah terdapat pada PCM komposit ketebalan 9 mm dengan material *filler* grafit sebesar 48.233 °C. Analisis grafik menunjukkan bahwa PCM komposit dengan ketebalan 9 mm memiliki performa yang lebih baik dalam menahan kenaikan temperatur pada *discharging rate* 2C dibandingkan dengan ketebalan yang lebih rendah.. Hal ini sejalan dengan teori dari persamaan,

$$q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$$

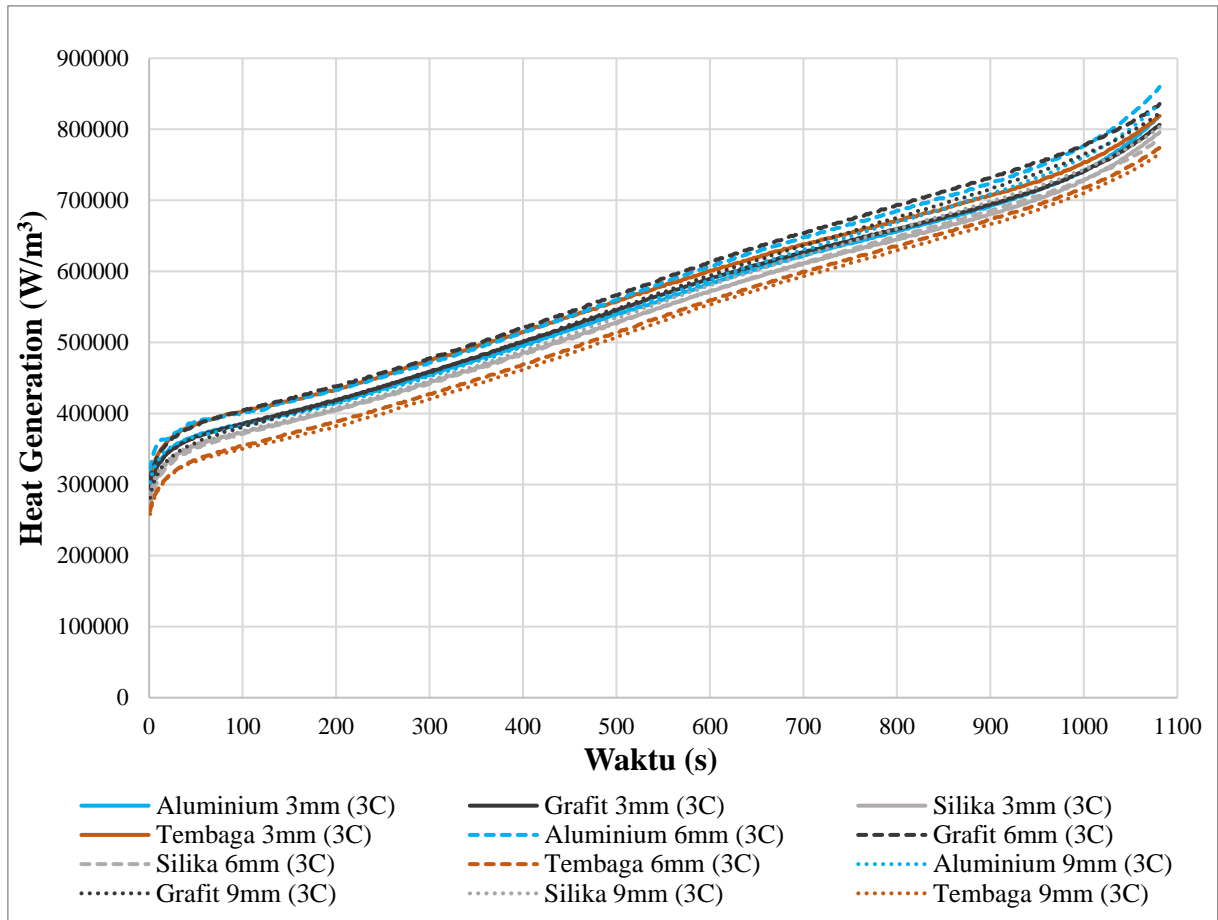
Dimana, semakin tebal PCM, maka massa (m) akan semakin besar. Dengan massa yang lebih besar, kemampuan PCM untuk menyerap panas juga meningkat, sehingga perubahan suhu ( $\Delta T$ ) menjadi lebih rendah. Dengan kata lain, PCM yang lebih tebal memiliki kapasitas termal yang lebih tinggi dan mampu menahan kenaikan temperatur dengan lebih baik, sehingga peningkatan temperatur baterai menjadi lebih rendah. Teori ini mendukung hasil eksperimen yang menunjukkan bahwa ketebalan PCM yang lebih tinggi berkontribusi pada penurunan laju kenaikan temperatur baterai, dengan material *filler* grafit menunjukkan performa terbaik dalam menurunkan temperatur baterai.

#### **4.5 Pengaruh Variasi Ketebalan dan Material *Filler* pada PCM Komposit terhadap *Heat generation* Baterai**

Pada sub bab ini, akan dibahas pengaruh variasi antar material *filler* dan variasi ketebalan PCM komposit terhadap panas bangkitan pada permukaan baterai *lithium ion* selama proses *discharging*. Dari empat macam material *filler* dan tiga variasi ketebalan sistem pendinginan PCM komposit yang telah dilakukan eksperimen akan dibandingkan performa dan efektifitasnya dalam menurunkan *Heat generation* pada permukaan baterai *lithium ion*. Analisis akan dilakukan pada 2 tingkat *discharging rate*, yaitu :

##### **4.5.1 Analisa *Heat generation* pada Baterai dengan *Discharging Rate* 3C**

Hasil pengujian baterai dengan menggunakan sistem PCM komposit untuk semua variasi material *filler* pada ketebalan (3mm, 6mm, 9mm) dengan ratio *filler* 0,3 telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik hubungan antara *Heat generation* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 3C ditunjukkan pada gambar 4.11 berikut



**Gambar 4.11** Grafik Perbandingan *Heat generation* terhadap Waktu pada Variasi *C-Rate* 3C

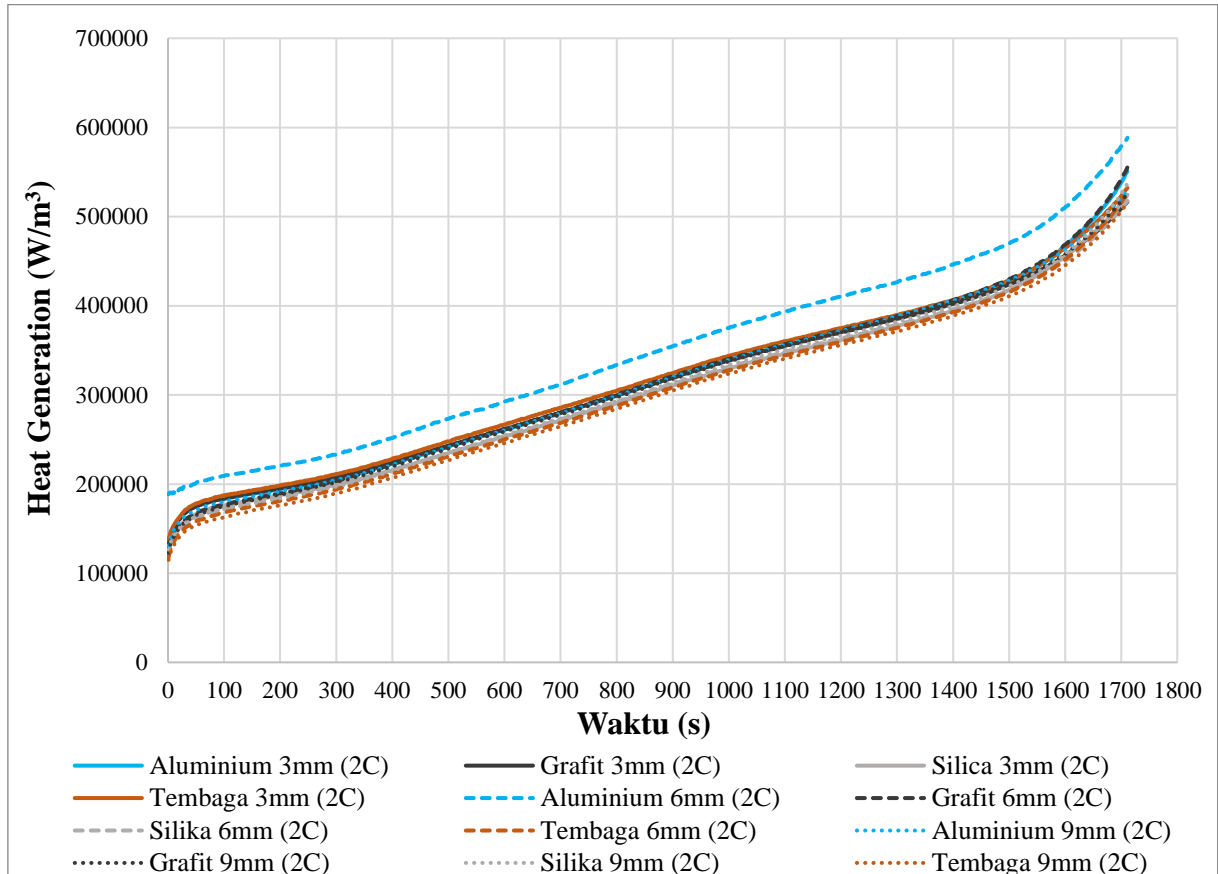
Dari gambar 4.11, diketahui bahwa nilai *heat generation* maksimal pada ketebalan 3 mm untuk PCM komposit material *filler* tembaga adalah sebesar  $818923.82 \text{ W/m}^3$ , aluminium sebesar  $818379.68 \text{ W/m}^3$ , grafit sebesar  $806408.706 \text{ W}$  dan silika sebesar  $796070.13 \text{ W/m}^3$ . Pada ketebalan 6 mm untuk PCM komposit material *filler* aluminium adalah sebesar  $859733.98 \text{ W/m}^3$ , grafit sebesar  $835792.02 \text{ W/m}^3$ , silika sebesar  $785731.56 \text{ W}$  dan tembaga sebesar  $774304.71 \text{ W/m}^3$ . Terakhir pada ketebalan 9 mm untuk PCM komposit material *filler* aluminium adalah sebesar  $835792.02 \text{ W/m}^3$ , grafit sebesar  $822188.63 \text{ W/m}^3$ , silika sebesar  $803688.03 \text{ W}$  dan tembaga sebesar  $765598.55 \text{ W/m}^3$ .

Dari analisa grafik, *heat generation* pada setiap variasi material *filler* untuk ketebalan 3, 6, dan 9 mm tidak terjadi perbedaan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa *heat generation* ( $Q$ ) yang dihasilkan pada baterai tidak bergantung pada ketebalan modul dan jenis material *filler*, tetapi bergantung pada arus dan voltase yang dikeluarkan oleh baterai selama proses *discharging*. Dari grafik di atas, terlihat bahwa kenaikan nilai *heat generation* pada ketebalan 9 mm dengan PCM komposit tembaga lebih rendah dibandingkan variasi lainnya. Perbedaan ini dapat diakibatkan oleh kondisi baterai yang digunakan dalam proses pengujian. Kondisi baterai yang buruk ini dapat ditimbulkan dari pengujian yang telah dilakukan secara berulang ataupun dari manufaktur baterai yang kurang baik.

Selain itu, rata-rata nilai *heat generation* terendah pada *discharge rate* 3C adalah sebesar  $765598.55 \text{ W/m}^3$  oleh PCM tembaga ketebalan 9 mm dan tertinggi adalah sebesar  $859733.98 \text{ W/m}^3$  oleh PCM aluminium ketebal 6 mm. Dari nilai *heat generation* ini, dapat disimpulkan bahwa terjadi peningkatan dari nilai *heat generation* selama proses *discharging* dan peningkatan ini dapat terlihat pada gambar 4.11.

#### 4.5.2 Analisa Heat generation pada Baterai dengan Discharging Rate 2C

Hasil pengujian baterai dengan menggunakan sistem PCM komposit untuk semua variasi material *filler* pada ketebalan (3mm, 6mm, 9mm) dengan ratio *filler* 0,3 telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik hubungan antara *Heat generation* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 2C ditunjukkan pada gambar 4.12 berikut



**Gambar 4.12** Grafik Perbandingan Kenaikan Temperatur terhadap Waktu pada Variasi C-Rate 2C

Dari gambar 4.11, diketahui bahwa nilai *heat generation* maksimal pada ketebalan 3 mm untuk PCM komposit material *filler* aluminium adalah sebesar  $551027.81 \text{ W/m}^3$ , tembaga sebesar  $532164.45 \text{ W/m}^3$ , silika sebesar  $524546.55 \text{ W/m}^3$  dan grafit sebesar  $516565.9 \text{ W/m}^3$ . Pada ketebalan 6 mm untuk PCM komposit material *filler* aluminium adalah sebesar  $588391.77 \text{ W/m}^3$ , grafit sebesar  $555380.89 \text{ W/m}^3$ , tembaga sebesar  $526360.34 \text{ W/m}^3$  dan silika sebesar  $517654.171 \text{ W/m}^3$ . Terakhir pada ketebalan 9 mm untuk PCM komposit material *filler* silika adalah sebesar  $536880.23 \text{ W/m}^3$ , aluminium sebesar  $529625.15 \text{ W/m}^3$ , grafit sebesar  $525997.58 \text{ W/m}^3$  dan tembaga sebesar  $515840.39 \text{ W/m}^3$ .

Dari analisa grafik, *heat generation* pada setiap variasi material *filler* untuk ketebalan 3, 6, dan 9 mm tidak terjadi perbedaan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa *heat generation* ( $Q$ ) yang dihasilkan pada baterai tidak bergantung pada ketebalan modul dan jenis material *filler*, tetapi bergantung pada arus dan voltase yang dikeluarkan oleh baterai selama proses *discharging*. Dari grafik di atas, terlihat bahwa kenaikan nilai *heat generation* pada ketebalan 6 mm dengan PCM komposit aluminium jauh lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Perbedaan ini dapat diakibatkan oleh kondisi baterai yang digunakan dalam proses



pengujian. Kondisi baterai yang buruk ini dapat ditimbulkan dari pengujian yang telah dilakukan secara berulang ataupun dari manufaktur baterai yang kurang baik.

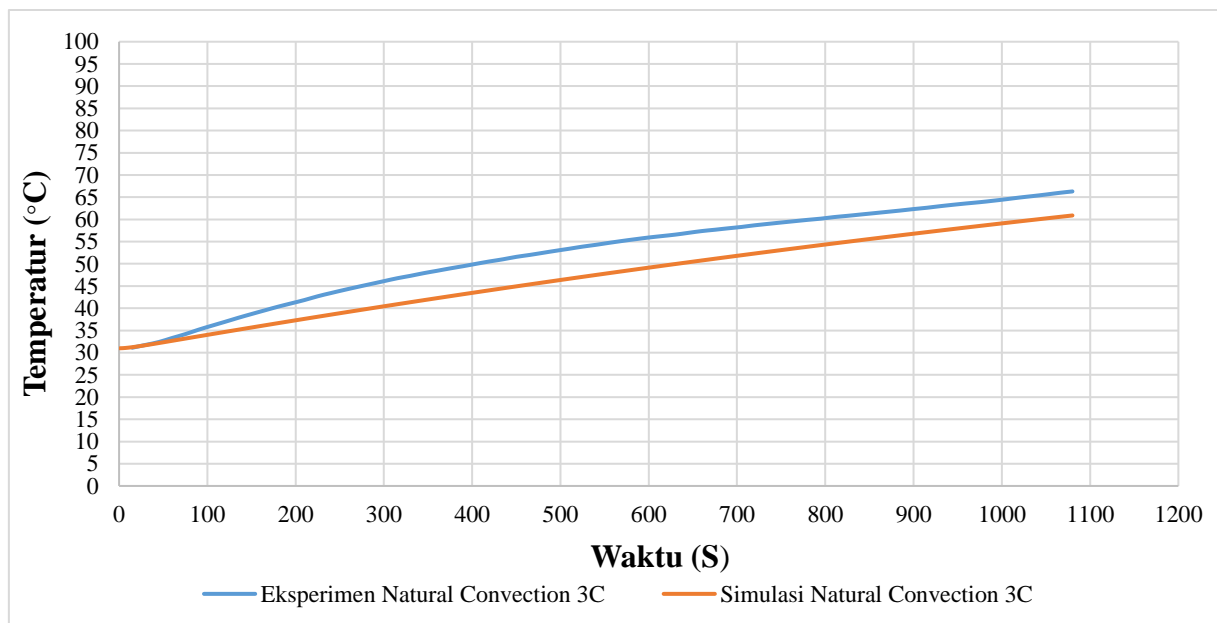
Selain itu, rata-rata nilai *heat generation* terendah pada *discharge rate* 2C adalah sebesar 515840.39 W oleh PCM tembaga ketebalan 9 mm dan tertinggi adalah sebesar 8.845 W oleh PCM aluminium ketebalan 6 mm. Dari nilai *heat generation* ini, dapat disimpulkan bahwa terjadi peningkatan dari nilai *heat generation* selama proses *discharging* dan peningkatan ini dapat terlihat pada gambar 4.11.

#### 4.6 Studi Numerik CFD

Pada sub bab ini, akan dibahas perbandingan hasil eksperimen pengujian baterai yang telah dilakukan dengan hasil studi numerik menggunakan *software* ANSYS. Tujuan dari perbandingan ini adalah untuk melakukan pengecekan *error* dan ketelitian/akurasi terhadap hasil eksperimen yang telah didapatkan. Karena itu, studi numerik hanya dilakukan pada *discharging rate* 3C dengan dua variasi modul baterai, yaitu sistem pendinginan menggunakan *natural convection* dan PCM murni dengan ketebalan 9 mm. Hasil studi numerik ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih detail mengenai distribusi temperatur pada baterai dan efektivitas penggunaan PCM dalam mengendalikan kenaikan temperatur, serta membandingkannya dengan hasil eksperimen yang telah diperoleh.

##### 4.6.1 Hasil Simulasi pada Modul Baterai dengan Sistem *Natural convection* pada *Discharging Rate* 3C

Hasil simulasi baterai dengan menggunakan sistem *natural convection* telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik perbandingan studi numerik dan eksperimen antara *temperature* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 3 C ditunjukkan pada gambar 4.13 berikut



**Gambar 4.13** Grafik Perbandingan Hasil Eksperimen dan Studi Numerik pada Sistem *Natural convection* Variasi C-Rate 3C

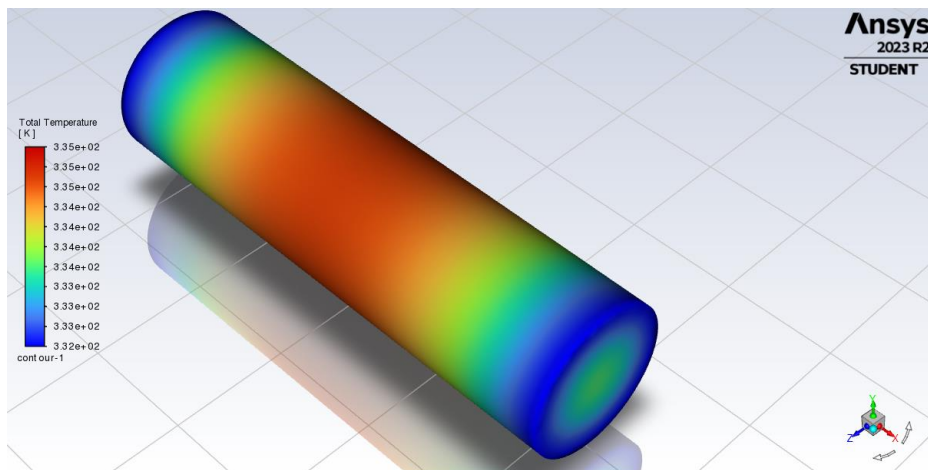
Gambar 4.13 menunjukkan bahwa ada perbedaan signifikan dalam laju kenaikan suhu antara keduanya. Grafik menunjukkan kenaikan suhu yang linear untuk peningkatan temperatur numerik, yang berarti kecepatan kenaikan suhu cukup konstan selama waktu

pengukuran. Pada studi numerik, suhu awal permukaan baterai dimulai sekitar 31°C dan suhu meningkat secara bertahap dan konsisten selama periode 1080 detik sehingga mencapai suhu akhir sekitar 60.888°C. Kemudian, suhu awal dari eksperimen dimulai dari 31°C dan mencapai suhu akhir 66.3°C.

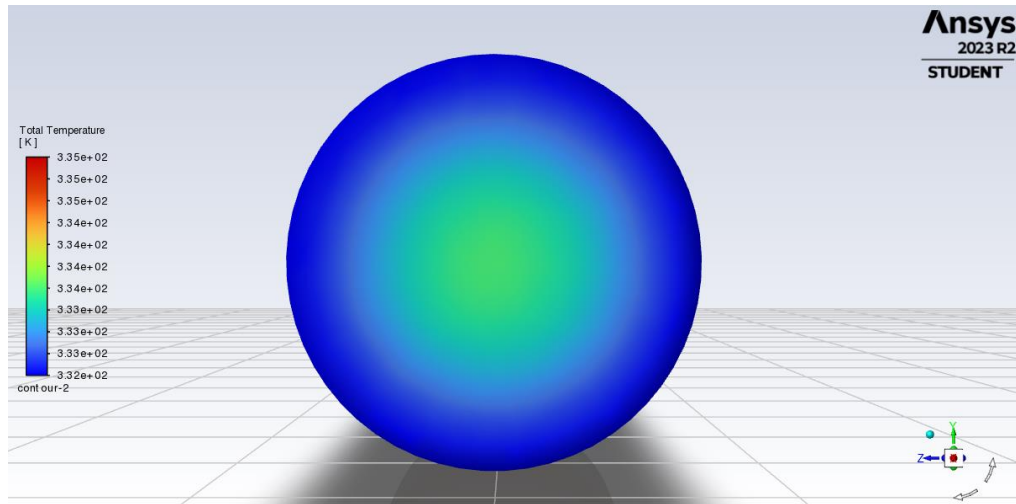
Perbedaan nilai temperatur maksimal dari eksperimen dan numerik adalah sebesar 6.5°C, dengan *error* sebesar 8%. Perbedaan *temperature* maksimal antara eksperimen dan numerik tidak terlalu jauh, akan tetapi akan lebih baik apabila jarak dari temperatur akhir eksperimen dan simulasi kurang dari 6.5°C. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen juga dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE), dengan menggunakan persamaan :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (T_{eksperimen} - T_{simulasi})^2}$$

Didapatkan hasil dari dari RMSE untuk variasi *natural convection* sebesar 5.64. Secara keseluruhan, studi numerik telah mampu memberikan gambaran yang cukup akurat mengenai kenaikan suhu baterai, meskipun masih terdapat beberapa perbedaan dengan hasil eksperimen yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk kondisi pengujian yang tidak sepenuhnya ideal, *heat generation* yang nilainya dianggap konstan sepanjang waktu, dan nilai *heat generation reversible* yang tidak diperhitungkan dalam studi numerik.



(a)



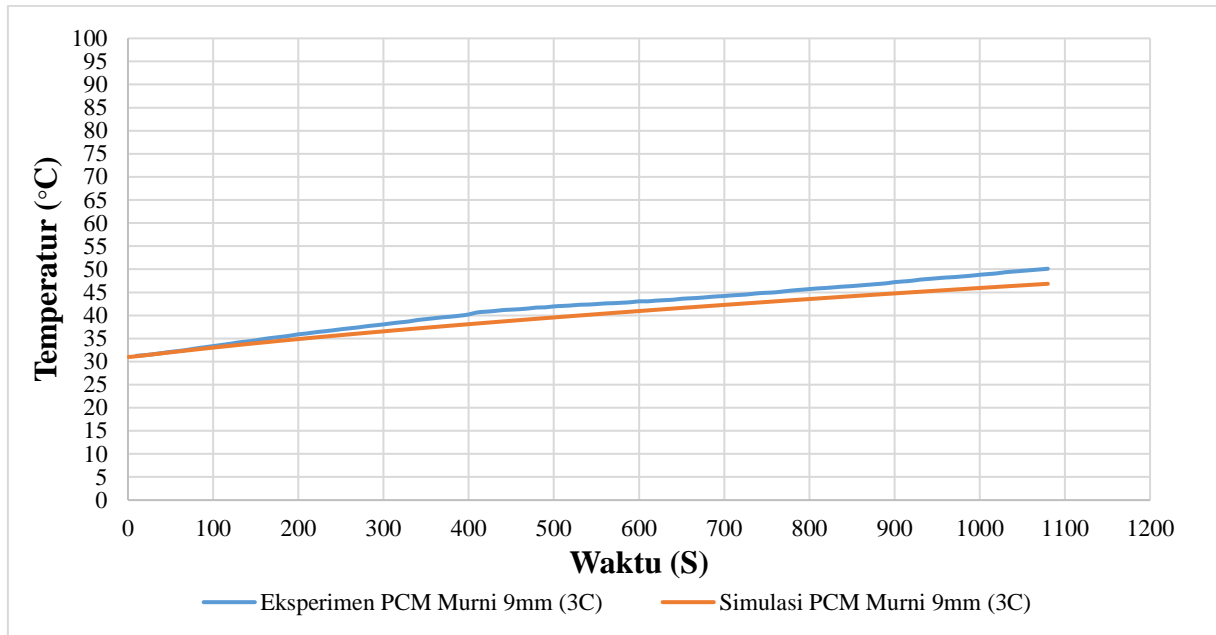
(b)

**Gambar 4.14** Hasil Kontur Temperatur pada Modul Baterai di *Discharge Rate* 3C dengan *Natural convection* (a)Tampak Isometrik (b)Tampak Samping

Pada gambar di atas, menunjukkan distribusi suhu pada permukaan sebuah baterai silinder tanpa menggunakan PCM atau *natural convection* dengan menggunakan kontur warna untuk merepresentasikan variasi suhu. Dimana, skala suhu diberikan dalam satuan Kelvin (K) dan memiliki rentang suhu berkisar dari sekitar 332K (biru tua) hingga 335K (merah). Suhu tertinggi terpusat pada bagian tengah silinder baterai, lalu suhu menurun secara bertahap dari tengah silinder ke bagian lain permukaan baterai. Tidak meratanya penyebaran temperatur pada permukaan kontur baterai dapat disebabkan karena beberapa faktor, terutama perpindahan panas yang terjadi secara axial dan radial. Dalam studi numerik, seharusnya nilai perpindahan panas secara axial dan radial berbeda satu sama lain karena mekanisme perpindahan panas dalam kedua arah ini memiliki karakteristik yang berbeda. Perpindahan panas axial biasanya terjadi sepanjang sumbu panjang baterai, sedangkan perpindahan panas radial terjadi dari inti baterai menuju permukaan luar. Pada simulasi ini, diasumsikan bahwa nilai perpindahan panas antara axial dan radial adalah sama, yang bisa menyebabkan ketidakakuratan dalam prediksi distribusi temperatur. Perpindahan panas axial biasanya dipengaruhi oleh konduktivitas material dan gradien temperatur sepanjang sumbu panjang baterai, sedangkan perpindahan panas radial lebih dipengaruhi oleh konduktivitas material dan adanya perbedaan temperatur antara inti dan permukaan baterai.

#### 4.6.2 Perpindahan Panas pada Modul Baterai dengan Sistem PCM Murni Ketebalan 9 mm pada *Discharging Rate* 3C

Hasil simulasi baterai dengan menggunakan sistem PCM murni telah diperoleh. Berdasarkan hasil tersebut, grafik hubungan antara *temperature* dan waktu pada kondisi *discharging rate* 3 C ditunjukkan pada gambar 4.15 berikut



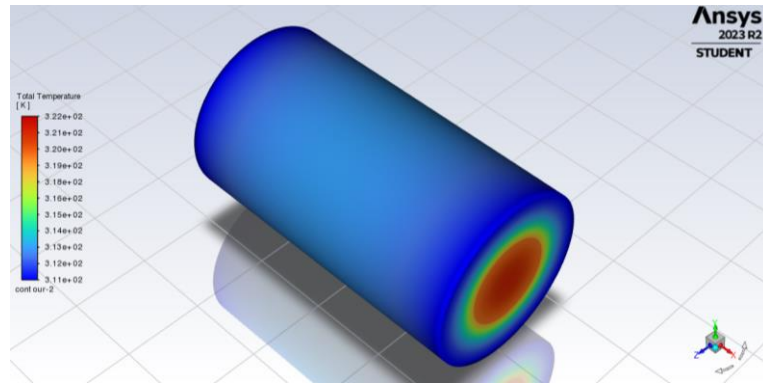
**Gambar 4.15** Grafik Perbandingan Hasil Eksperimen dan Studi Numerik pada Sistem PCM Murni Ketebalan 9 mm Variasi *C-Rate* 3C

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 studi numerik, suhu awal permukaan baterai dimulai sekitar 31 °C dan suhu meningkat secara bertahap dan konsisten selama periode 1080 detik sehingga mencapai suhu akhir sekitar 46.844 °C. Lalu untuk temperatur dari eksperimen dimulai dari 31 °C hingga mencapai suhu maksimal sekitar 50.1 °C.

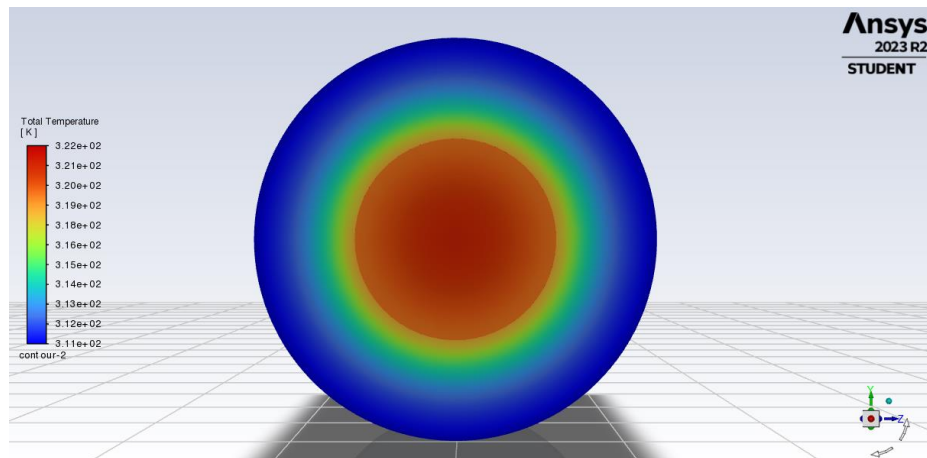
Perbedaan nilai temperatur maksimal dari eksperimen dan numerik adalah sebesar 3.256 °C, dengan *error* sebesar 6.5 %. Perbedaan *temperature* maksimal antara eksperimen dan numerik tidak terlalu jauh, akan tetapi akan lebih baik apabila jarak dari temperatur akhir eksperimen dan simulasi kurang dari 3.256 °C. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen juga dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE), dengan menggunakan persamaan :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (T_{eksperimen} - T_{simulasi})^2}$$

Didapatkan hasil dari dari RMSE untuk variasi PCM murni ketebalan 9 mm sebesar 2.01. Secara keseluruhan, studi numerik telah mampu memberikan gambaran yang cukup akurat mengenai kenaikan suhu baterai, meskipun masih terdapat beberapa perbedaan dengan hasil eksperimen yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk kondisi pengujian yang tidak sepenuhnya ideal, *heat generation* yang nilainya dianggap konstan sepanjang waktu, dan nilai *heat generation reversible* yang tidak diperhitungkan dalam studi numerik.



(a)



(b)

**Gambar 4.16** Hasil Kontur Temperatur pada Modul Baterai di *Discharge Rate* 3C dengan PCM Murni Ketebalan 9 mm (a)Tampak Isometrik (b)Tampak Samping

Pada gambar di atas, menunjukkan distribusi suhu pada permukaan sebuah baterai silinder yang menggunakan PCM dengan ketebalan 9 mm dengan menggunakan kontur warna untuk merepresentasikan variasi suhu. Dimana, skala suhu diberikan dalam satuan Kelvin (K) dan memiliki rentang suhu berkisar dari sekitar 311 K (biru tua) hingga 322 K (merah). Suhu tertinggi terpusat pada satu titik di ujung silinder (kutub baterai), lalu suhu menurun secara bertahap dari pusat ujung silinder ke bagian lain permukaan baterai. PCM dengan ketebalan 9 mm ini tampaknya efektif dalam menjaga sebagian besar permukaan baterai tetap pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan baterai tanpa menggunakan PCM.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Penelitian tugas akhir ini menyelidiki analisis manajemen termal pada sistem pendinginan baterai *Lithium ion* berbasis PCM Komposit dengan variasi material *filler* dan variasi ketebalan. Penelitian dilakukan untuk mengetahui performa PCM komposit terhadap peningkatan *temperature* pada permukaan baterai *Lithium ion* yang dipengaruhi oleh variasi material *filler* dan ketebalan pada *c-rate* yang berbeda. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan PCM (*Phase Change Material*) dan berbagai jenis material *filler* ke dalam campuran PCM komposit terbukti efektif dalam menurunkan peningkatan temperatur pada permukaan baterai *Lithium ion*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penambahan material *filler* dapat meningkatkan konduktivitas dari PCM komposit sehingga sistem PCM dapat lebih mudah menyerap panas yang dihasilkan modul baterai selama proses *discharging*, dan mengurangi kenaikan temperatur pada permukaan baterai. Adapun persentase penurunan temperatur maksimal rata-rata sebesar 14.17 % dari 52.4 °C ke 44.9 °C pada sistem PCM material *filler* Silika dan 11.83 % dari 52.4 °C ke 45.76 °C pada PCM murni terhadap sistem *natural convection*. Selain itu, penambahan PCM dapat menjaga modul baterai tetap beroperasi dalam *range* temperatur optimalnya, yaitu hanya mencapai 50.1 °C pada *discharging rate* 3 C, jika dibandingkan dengan *natural convection* yang dapat mencapai 66.3 °C.
2. Material *filler* yang berbeda memiliki efektivitas yang berbeda dalam menurunkan peningkatan temperatur baterai *Lithium ion*. Material *filler* grafit menunjukkan performa terbaik dalam menurunkan peningkatan temperatur, diikuti oleh aluminium, tembaga, dan silika untuk setiap variasi ketebalan dan *discharging rate*. Hal ini sesuai perhitungan sifat termal dari masing-masing PCM komposit, di mana performa PCM komposit grafit dipengaruhi oleh konduktivitas PCM komposit nya yang paling tinggi, sehingga menghasilkan *thermal diffusivity* yang tertinggi, dan memungkinkan transfer panas dari modul baterai yang lebih cepat. Adapun PCM material *filler* grafit mengalami penurunan temperatur maksimal rata - rata sebesar 2.7 % dari 42.07 °C ke 40.93 °C terhadap material *filler* aluminium, 5.64 % dari 43.38 °C ke 40.93 °C terhadap material *filler* tembaga dan 9 % dari 44.98 °C ke 40.93 °C terhadap material *filler* silika.
3. Variasi ketebalan PCM komposit mempengaruhi kinerja PCM dalam menurunkan peningkatan temperatur baterai *Lithium ion*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tebal PCM komposit, maka peningkatan temperatur pada permukaan baterai semakin rendah. Hal ini sesuai dengan teori bahwa dengan ketebalan yang lebih tinggi dapat meningkatkan massa PCM, sehingga dapat menurunkan laju perubahan *temperature* 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, diikuti oleh 6 mm dan 3 mm. Ketebalan 9 mm merupakan variasi ketebalan dengan tingkat kelelahan yang paling rendah dan paling aman apabila penelitian dilakukan pada *c-rate* 1C – 3C. Adapun PCM ketebalan 9 mm mengalami penurunan temperatur maksimal rata-rata sebesar 1.11 % dari 42.74 °C ke 42.26 °C terhadap 6 mm dan 2.91 % dari 43.52 °C ke 42.26 °C terhadap 3 mm.
4. Variasi *discharging rate* baterai memiliki pengaruh terhadap peningkatan *temperature* baterai *Lithium ion*. Hal ini terjadi karena *discharging rate* yang lebih tinggi

menghasilkan intensitas aliran arus listrik yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan nilai *heat generation* dan membuat perubahan suhu baterai yang semakin tinggi. *Discharging rate* 3C memiliki peningkatan temperatur yang paling tinggi dibandingkan dengan *discharging rate* 2C dan 1C. *Discharging rate* 3C mengalami peningkatan temperatur maksimal rata-rata sebesar 11.36 % dari 43.23 °C ke 48.78 °C terhadap 2C dan 25.16 % dari 36.5 °C ke 48.78 °C terhadap 1C. Lalu, sistem pendinginan yang mempunyai performa yang terbaik untuk setiap *discharging rate* adalah PCM material *filler* grafit ketebalan 9 mm, dengan temperatur maksimal di 1C sebesar 35.75°C, di 2C sebesar 40.95°C, dan di 3C sebesar 45.45°C.

## 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Penelitian lanjutan dapat mengenai karakteristik pendinginan baterai dengan PCM komposit dengan merangkai modul baterai menjadi *battery pack*.
2. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan melakukan eksperimen baterai pada kondisi charging.
3. Menggunakan metode pencampuran PCM dengan material *filler* yang lebih canggih atau menggunakan peralatan khusus untuk memastikan PCM dan material *filler* tercampur secara merata.
4. Mempertimbangkan penggunaan PCM dengan titik leleh yang lebih tinggi untuk mengatasi masalah melelehnya PCM pada suhu di atas 44°C.
5. Melakukan studi numerik untuk variasi PCM material komposit dan memakai persamaan garis dari *heat generation* pada studi numerik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akula, R., & Balaji, C. (2022). *Thermal management of 18650 Li-ion battery using novel fins-PCM-EG composite heat sinks. Applied Energy, 316, 119048.* <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.119048>
- Armand, M., Axmann, P., Bresser, D., Copley, M., Edström, K., Ekberg, C., Guyomard, D., Lestriez, B., Novák, P., Petranikova, M., Porcher, W., Trabesinger, S., Wohlfahrt-Mehrens, M., & Zhang, H. (2020). *Lithium ion batteries – Current state of the art and anticipated developments. Journal of Power Sources, 479.* <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228708>
- 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., & Rethwisch, D. (2010). *Materials Science and Engineering an Introduction* (8th ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering, 3*(5), 385–418. <https://doi.org/10.1002/ESE3.95>
- Elshaer, A. M., Soliman, A. M. A., Yousef, M. S., Kassab, M., & Hawwash, A. A. (2024). *Experimental study about the impact of open cell aluminium foam ( OCAF ) insertion in salt-based phase change material ( PCM ) for electronics thermal management. 47*(November 2023).
- 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>
- Jamshed, S. (2015). Introduction to CFD. *Using HPC for Computational Fluid Dynamics, December 2015, 1–20.* <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801567-4.00001-5>
- Jindal, P., Katiyar, R., & Bhattacharya, J. (2022). Evaluation of accuracy for Bernardi equation in estimating *heat generation rate* for continuous and pulse-discharge protocols in LFP and NMC based Li-ion batteries. *Applied Thermal Engineering, 201, 117794.* <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117794>
- Kainat, S., Anwer, J., Hamid, A., Gull, N., & Khan, S. M. (2024). Electrolytes in *Lithium ion Batteries: Advancements in the Era of Twenties (2020's). Materials Chemistry and Physics, 313, 128796.* <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2023.128796>
- Li, W. Q., Zhang, T. Y., Li, B. B., Cui, F. Q., & Liu, L. L. (2021). Experimental investigation on combined *thermal energy storage and thermoelectric system* by using foam/PCM composite. *Energy Conversion and Management, 243.* <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114429>
- Li, X., Zhong, Z., Luo, J., Wang, Z., Yuan, W., Zhang, G., Yang, C., & Yang, C. (2019). Experimental Investigation on a Thermoelectric Cooler for *Thermal Management of a Lithium ion Battery Module. International Journal of Photoenergy, 2019.* <https://doi.org/10.1155/2019/3725364>
- 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, 2730–2742.* <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.10.002>



- Liu, Z., Wang, B., Tan, Y., & Li, P. (2023). Thermal management of lithium ion battery pack under demanding conditions and long operating cycles using fin-enhanced PCMs/water hybrid cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 233(July), 121214. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121214>
- Ma, C., Zhang, Y., Hu, S., Liu, X., & He, S. (2022). A copper nanoparticle enhanced phase change material with high thermal conductivity and latent heat for battery thermal management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 78(May), 104814. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104814>
- Panchal, S., Mathew, M., Fraser, R., & Fowler, M. (2018). Electrochemical thermal modeling and experimental measurements of 18650 cylindrical lithium ion battery during discharge cycle for an EV. *Applied Thermal Engineering*, 135(January), 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.046>
- Patel, V. M., Gaurav, & Mehta, H. B. (2017). Influence of working fluids on startup mechanism and thermal performance of a closed loop pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1568–1577. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.09.017>
- Samimi, F., Babapoor, A., Azizi, M., & Karimi, G. (2016). Thermal management analysis of a Li-ion battery cell using phase change material loaded with carbon fibers. *Energy*, 96, 355–371. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.064>
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Sun, Zeyu, Guo, Y., Zhang, C., Whitehouse, J., Zhou, Q., Xu, H., & Wang, C. (2023). Experimental study of battery passive thermal management system using copper foam-based phase change materials. *International Journal of Thermofluids*, 17(November 2022), 100255. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100255>
- Sun, Zhiqiang, Fan, R., & Zheng, N. (2021). Thermal management of a simulated battery with the compound use of phase change material and fins: Experimental and numerical investigations. *International Journal of Thermal Sciences*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106945>
- 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>
- Xie, C. (2023). Nano-enhanced phase change material using salt hydrate and copper nanoparticles for battery thermal management system: Buoyancy-driven approach. *Journal of Energy Storage*, 74, 108788. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.108788>
- 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>
- Zhang, X., Fan, W., & Liu, T. (2020). Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications. *Composites Communications*, 21, 100413. <https://doi.org/10.1016/J.COCO.2020.100413>

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 : Persiapan Pengujian Modul Baterai oleh Penulis



(a) Pemasangan baterai ke *holder*



(b) Pemasangan cetakan PCM ke *holder*



(c) Pengukuran massa PCM *filler*



(d) Pengukuran massa *paraffin wax*



(e) Pelelehan *paraffin wax*



(f) Memasukkan material *filler* ke lelehan *paraffin*



(g) Pencampuran material *filler* dengan *paraffin*



(h) Penuangan komposit ke dalam cetakan



(i) Pelepasan cetakan dan *holder* dari PCM komposit yang sudah memadat

## Lampiran 2 : Proses Pengujian Modul Baterai



(a) Pemasangan *thermocouple* dan kabel baterai tester ke modul baterai.



(b) Pengujian baterai pada *Set Up* yang telah dirangkai.

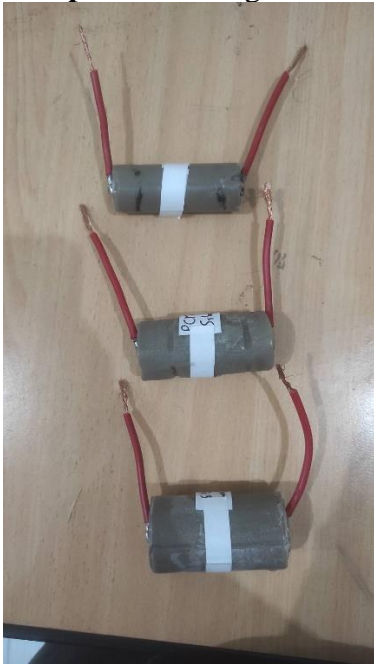
**Lampiran 3 : Rangkaian Modul Baterai Aluminium dengan Ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm**



**Lampiran 4 :** Rangkaian Modul Baterai Grafit dengan Ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm



**Lampiran 5 :** Rangkaian Modul Baterai Silika dengan Ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm



**Lampiran 6 : Rangkaian Modul Baterai Tembaga dengan Ketebalan 3 mm, 6 mm, dan 9 mm**



**Lampiran 7 : Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem Pendinginan *Natural convection***

<i>Discharging Interval 15 s</i>			<i>Discharging Interval 25 s</i>	
<b>Temperatur Rata - Rata (°C)</b>			<b>Temperatur Rata - Rata (°C)</b>	
<b>1C</b>	<b>3C</b>	<b>Waktu (S)</b>	<b>2C</b>	<b>Waktu (s)</b>
31.125	31.125	15	31.075	25
31.175	31.75	30	31.35	50
31.3	32.4	45	31.775	75
31.35	33.3	60	32.25	100
31.55	34.175	75	32.825	125
31.65	35.175	90	33.2	150
31.725	36.075	105	33.7	175
31.825	36.95	120	34.175	200
31.975	37.85	135	34.575	225
32.075	38.7	150	34.925	250
32.225	39.525	165	35.3	275

<i>Discharging Interval 15 s</i>			<i>Discharging Interval 25 s</i>	
<b>Temperatur Rata - Rata (°C)</b>			<b>Temperatur Rata - Rata (°C)</b>	
<b>1C</b>	<b>3C</b>	<b>Waktu (S)</b>	<b>2C</b>	<b>Waktu (s)</b>
32.275	40.35	180	35.65	300
32.475	41.1	195	35.95	325
32.55	41.85	210	36.325	350
32.675	42.7	225	36.65	375
32.775	43.425	240	36.975	400
32.875	44.125	255	37.275	425
32.975	44.8	270	37.6	450
32.975	45.45	285	37.9	475
33.075	46.1	300	38.25	500
33.25	46.75	315	38.375	525
33.275	47.3	330	38.775	550
33.375	47.9	345	39.125	575
33.475	48.425	360	39.5	600
33.625	48.975	375	39.8	625
33.675	49.475	390	40.075	650
33.8	50.025	405	40.4	675
33.8	50.55	420	40.725	700
33.9	51.025	435	41.025	725
33.975	51.575	450	41.325	750
34.125	52	465	41.65	775
34.125	52.475	480	41.95	800
34.2	52.95	495	42.225	825
34.4	53.4	510	42.5	850
34.4	53.875	525	42.8	875
34.475	54.275	540	43.05	900
34.55	54.725	555	43.325	925
34.625	55.15	570	43.675	950
34.8	55.55	585	43.875	975
34.825	55.925	600	44.1	1000
34.85	56.25	615	44.325	1025
34.9	56.575	630	44.575	1050
35	56.975	645	44.775	1075
35.075	57.375	660	45.025	1100
35.125	57.675	675	45.275	1125
35.2	58	690	45.45	1150
35.275	58.3	705	45.65	1175
35.375	58.675	720	45.875	1200
35.525	59.3	735	46.275	1225
35.5	59.6	750	46.475	1250



<i>Discharging Interval 15 s</i>			<i>Discharging Interval 25 s</i>	
Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)	
1C	3C	Waktu (S)	2C	Waktu (s)
35.55	59.9	765	46.625	1275
35.625	60.175	780	46.85	1300
35.65	60.525	795	47.025	1325
35.725	60.8	810	47.175	1350
35.75	61.1	825	47.35	1375
35.825	61.4	840	47.55	1400
35.85	61.7	855	47.7	1425
35.9	62	870	47.875	1450
35.95	62.325	885	48.05	1475
36.05	62.625	900	48.225	1500
36.05	62.975	915	48.425	1525
36.075	63.3	930	48.525	1550
36.1	63.6	945	48.775	1575
36.15	63.875	960	48.975	1600
36.175	64.2	975	49.075	1625
36.225	64.55	990	49.3	1650
36.275	64.925	1005	49.475	1675
36.375	65.25	1020	49.625	1700
36.35	65.6	1035		
36.375	65.975	1050		
36.45	66.3	1065		
36.45		1080		
36.475		1095		
36.5		1110		
36.55		1125		
36.575		1140		
36.6		1155		
36.675		1170		
36.75		1185		
36.675		1200		
36.75		1215		
36.775		1230		
36.775		1245		
36.775		1260		
36.85		1275		
36.875		1290		
36.95		1305		
36.95		1320		
36.975		1335		

<i>Discharging Interval 15 s</i>			<i>Discharging Interval 25 s</i>	
Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)	
1C	3C	Waktu (S)	2C	Waktu (s)
37		1350		
37.05		1365		
37.075		1380		
37.1		1395		
37.15		1410		
37.15		1425		
37.1		1440		
37.25		1455		
37.2		1470		
37.3		1485		
37.3		1500		
37.35		1515		
37.35		1530		
37.3		1545		
37.35		1560		
37.45		1575		
37.4		1590		
37.5		1605		
37.45		1620		
37.525		1635		
37.55		1650		
37.5		1665		
37.5		1680		
37.5		1695		
37.55		1710		
37.6		1725		
37.625		1740		
37.6		1755		
37.6		1770		
37.6		1785		
37.625		1800		
37.675		1815		
37.7		1830		
37.7		1845		
37.7		1860		
37.7		1875		
37.7		1890		
37.725		1905		
37.725		1920		

<i>Discharging Interval 15 s</i>			<i>Discharging Interval 25 s</i>	
Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)	
1C	3C	Waktu (S)	2C	Waktu (s)
37.725		1935		
37.725		1950		
37.725		1965		
37.725		1980		
37.75		1995		
37.725		2010		
37.75		2025		
37.75		2040		
37.8		2055		
37.8		2070		
37.8		2085		
37.8		2100		
37.825		2115		
37.8		2130		
37.8		2145		
37.8		2160		
37.825		2175		
37.875		2190		
37.9		2205		
37.9		2220		
37.9		2235		
37.9		2250		
37.925		2265		
37.975		2280		
37.975		2295		
38		2310		
38.025		2325		
38.05		2340		
38.075		2355		
38.1		2370		
38.1		2385		
38.125		2400		
38.15		2415		
38.175		2430		
38.2		2445		
38.25		2460		
38.275		2475		
38.275		2490		
38.325		2505		

<i>Discharging Interval 15 s</i>			<i>Discharging Interval 25 s</i>	
Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)	
1C	3C	Waktu (S)	2C	Waktu (s)
38.35		2520		
38.375		2535		
38.425		2550		
38.45		2565		
38.5		2580		
38.525		2595		
38.575		2610		
38.6		2625		
38.6		2640		
38.7		2655		
38.725		2670		
38.8		2685		
38.75		2700		
38.875		2715		
38.9		2730		
38.95		2745		
39		2760		
39.05		2775		
39.075		2790		
39.1		2805		
39.175		2820		
39.2		2835		
39.225		2850		
39.2		2865		
39.325		2880		
39.35		2895		
39.35		2910		
39.375		2925		
39.425		2940		
39.5		2955		
39.55		2970		
39.5		2985		
39.575		3000		
39.575		3015		
39.675		3030		
39.65		3045		
39.75		3060		
39.775		3075		
39.825		3090		

<i>Discharging Interval 15 s</i>			<i>Discharging Interval 25 s</i>	
Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)	
1C	3C	Waktu (S)	2C	Waktu (s)
39.85		3105		
39.925		3120		
39.9		3135		
40.05		3150		
40.075		3165		
40.15		3180		
40.2		3195		
40.275		3210		
40.375		3225		
40.425		3240		
40.475		3255		
40.575		3270		
40.675		3285		
40.725		3300		
40.775		3315		
40.8		3330		
41		3345		
41		3360		
41.1		3375		
41.2		3390		
41.3		3405		
41.3		3420		

**Lampiran 8 :** Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Murni

<i>Discharging Interval 10 S</i>								<i>Discharging Interval 25 S</i>		
Waktu (S)	Suhu Rata - Rata (°C)							Waktu (S)	Suhu Rata-Rata (°C)	
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)		2C (3 mm)	3C (3 mm)
10	31.03	31.13	31.05	31.08	31.08	31.13	32.35	25	31.35	31.30
20	31.10	31.13	31.05	31.20	31.15	31.67	32.50	50	31.55	31.87
30	31.10	31.13	31.08	31.33	31.25	32.20	32.70	75	31.80	32.67
40	31.20	31.18	31.10	31.48	31.33	32.80	32.95	100	32.15	33.50
50	31.20	31.20	31.13	31.68	31.45	33.43	33.20	125	32.50	34.40
60	31.25	31.20	31.13	31.78	31.58	34.07	33.40	150	32.80	35.17
70	31.30	31.23	31.15	31.95	31.68	34.67	33.65	175	33.10	36.00
80	31.33	31.25	31.23	32.18	31.85	35.23	33.95	200	33.35	36.63
90	31.38	31.28	31.23	32.30	33.40	35.83	34.20	225	33.65	37.37
100	31.38	31.30	31.23	32.53	33.50	36.40	34.45	250	33.95	38.07

Discharging Interval 10 S								Discharging Interval 25 S		
Waktu (S)	Suhu Rata - Rata (°C)							Waktu (S)	Suhu Rata-Rata (°C)	
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)		2C (3 mm)	3C (3 mm)
110	31.45	31.30	31.23	32.63	33.65	36.97	34.70	275	34.20	38.73
120	31.48	31.35	31.25	32.80	33.83	37.43	34.95	300	34.50	39.33
130	31.55	31.38	31.30	33.00	33.85	37.90	35.25	325	34.80	39.93
140	31.55	31.38	31.33	33.18	34.05	38.37	35.45	350	35.10	40.53
150	31.60	31.43	31.33	33.33	34.15	38.87	35.70	375	35.30	41.03
160	31.65	31.45	31.33	33.48	34.25	39.33	36.00	400	35.55	41.57
170	31.75	31.45	31.43	33.65	34.35	39.77	36.25	425	35.85	42.00
180	31.70	31.48	31.43	33.78	34.48	40.17	36.45	450	36.00	42.53
190	31.75	31.50	31.43	33.98	34.58	40.57	36.70	475	36.30	43.00
200	31.85	31.50	31.43	34.10	34.68	40.97	37.00	500	36.50	43.47
210	31.88	31.55	31.43	34.30	34.80	41.33	37.20	525	36.75	43.87
220	31.90	31.58	31.50	34.50	34.85	41.73	37.45	550	36.95	44.27
230	31.93	31.60	31.53	34.58	34.93	42.17	37.65	575	37.15	44.60
240	31.98	31.60	31.53	34.78	35.08	42.60	37.85	600	37.35	44.87
250	32.03	31.65	31.58	34.88	35.15	43.07	38.10	625	37.55	45.10
260	32.08	31.65	31.60	35.05	35.28	43.47	38.30	650	37.75	45.37
270	32.13	31.73	31.68	35.18	35.35	43.77	38.50	675	37.90	45.70
280	32.13	31.70	31.63	35.33	35.43	44.10	38.75	700	38.10	46.23
290	32.18	31.73	31.65	35.45	35.55	44.47	38.95	725	38.35	46.60
300	32.23	31.75	31.70	35.58	35.63	44.77	39.15	750	38.45	47.27
310	32.25	31.75	31.73	35.75	35.73	45.07	39.40	775	38.65	47.93
320	32.25	31.78	31.73	35.85	35.80	45.40	39.60	800	38.80	48.47
330	32.33	31.85	31.83	35.95	35.95	45.70	39.80	825	39.00	49.07
340	32.38	31.83	31.75	36.15	36.00	46.03	40.10	850	39.20	49.73
350	32.43	31.93	31.85	36.25	36.08	46.30	40.30	875	39.35	50.43
360	32.53	31.85	31.80	36.38	36.25	46.63	40.50	900	39.55	50.93
370	32.45	31.95	31.90	36.50	36.23	46.87	40.70	925	39.75	51.70
380	32.55	32.00	31.90	36.60	36.40	47.17	40.85	950	39.90	52.10
390	32.53	31.95	31.85	36.75	36.50	47.47	41.05	975	40.10	52.70
400	32.60	32.03	31.95	36.78	36.50	47.63	41.30	1000	40.20	53.43
410	32.68	32.00	31.93	36.98	36.63	47.90	41.75	1025	40.35	54.23
420	32.73	32.08	32.03	37.08	36.70	48.03	41.90	1050	40.45	54.80
430	32.73	32.13	32.03	37.15	36.75	48.23	42.05	1075	40.55	55.30
440	32.80	32.15	32.03	37.25	36.85	48.47	42.25	1100	40.75	
450	32.83	32.13	32.03	37.35	36.95	48.60	42.35	1125	40.85	
460	32.88	32.13	32.03	37.45	37.03	48.80	42.45	1150	41.00	
470	32.85	32.23	32.13	37.53	37.08	48.93	42.60	1175	41.25	
480	32.95	32.18	32.08	37.55	37.18	49.07	42.80	1200	41.45	

Discharging Interval 10 S								Discharging Interval 25 S		
Waktu (S)	Suhu Rata - Rata (°C)							Waktu (S)	Suhu Rata-Rata (°C)	
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)		2C (3 mm)	3C (3 mm)
490	33.00	32.23	32.10	37.65	37.23	49.23	42.85	1225	41.85	
500	33.03	32.30	32.18	37.75	37.30	49.40	43.05	1250	42.10	
510	33.03	32.28	32.13	37.88	37.40	49.57	43.15	1275	42.25	
520	33.10	32.35	32.23	37.95	37.45	49.67	43.25	1300	42.40	
530	33.13	32.33	32.20	38.03	37.50	49.87	43.40	1325	42.60	
540	33.15	32.35	32.20	38.13	37.60	49.97	43.45	1350	42.85	
550	33.18	32.35	32.25	38.13	37.65	50.13	43.55	1375	43.05	
560	33.23	32.40	32.25	38.20	37.70	50.30	43.70	1400	43.25	
570	33.25	32.40	32.25	38.35	37.80	50.40	43.75	1425	43.30	
580	33.28	32.43	32.28	38.35	37.83	50.60	43.85	1450	43.55	
590	33.30	32.45	32.30	38.43	37.93	50.67	43.95	1475	43.75	
600	33.35	32.45	32.33	38.50	37.95	50.80	44.15	1500	43.95	
610	33.35	32.48	32.35	38.58	38.03	50.93	44.15	1525	44.15	
620	33.40	32.53	32.35	38.68	38.13	51.10	44.30	1550	44.50	
630	33.45	32.53	32.38	38.75	38.18	51.20	44.40	1575	44.80	
640	33.48	32.55	32.43	38.83	38.25	51.30	44.50	1600	45.10	
650	33.50	32.58	32.45	38.93	38.28	51.40	44.70	1625	45.30	
660	33.55	32.58	32.45	38.98	38.35	51.53	44.80	1650	45.60	
670	33.58	32.58	32.45	39.05	38.40	51.60	44.90	1675	45.85	
680	33.58	32.63	32.50	39.13	38.48	51.70	45.05	1700	46.40	
690	33.63	32.65	32.53	39.20	38.55	51.77	45.20			
700	33.63	32.65	32.55	39.23	38.60	51.93	45.30			
710	33.68	32.68	32.55	39.30	38.65	52.00	45.45			
720	33.73	32.73	32.55	39.38	38.70	52.00	45.55			
730	33.73	32.73	32.58	39.45	38.78	52.17	45.70			
740	33.78	32.78	32.60	39.50	38.90	52.57	45.90			
750	33.78	32.75	32.60	39.50	38.90	52.77	46.00			
760	33.83	32.78	32.65	39.65	39.00	52.93	46.10			
770	33.83	32.80	32.65	39.73	39.08	53.17	46.30			
780	33.85	32.83	32.65	39.78	39.05	53.43	46.50			
790	33.88	32.83	32.68	39.83	39.18	53.67	46.65			
800	33.93	32.83	32.70	39.83	39.23	54.17	46.80			
810	33.93	32.85	32.70	40.00	39.30	54.27	46.95			
820	33.95	32.88	32.75	40.00	39.35	54.37	47.05			
830	34.00	32.85	32.70	40.03	39.35	54.47	47.20			
840	34.00	32.93	32.75	40.18	39.50	54.57	47.35			
850	34.03	32.88	32.70	40.58	39.50	54.67	47.45			
860	34.05	32.95	32.78	40.60	39.50	54.77	47.60			

Discharging Interval 10 S								Discharging Interval 25 S		
Waktu (S)	Suhu Rata - Rata (°C)							Waktu (S)	Suhu Rata-Rata (°C)	
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)		2C (3 mm)	3C (3 mm)
870	34.08	32.98	32.80	40.65	39.65	54.87	47.75			
880	34.08	32.90	32.73	40.73	39.70	54.97	47.90			
890	34.10	32.93	32.75	40.80	39.75	55.07	48.05			
900	34.10	33.00	32.83	40.83	39.83	55.17	48.30			
910	34.10	32.95	32.78	40.90	39.85	55.27	48.45			
920	34.15	32.95	32.80	40.98	39.90	55.37	48.60			
930	34.18	32.95	32.78	41.00	39.95	55.47	48.85			
940	34.18	33.03	32.85	41.08	40.00	55.57	49.00			
950	34.20	32.98	32.80	41.10	40.08	55.67	49.15			
960	34.20	33.03	32.83	41.18	40.10	55.77	49.30			
970	34.25	33.03	32.83	41.23	40.13	55.87	49.40			
980	34.25	33.03	32.85	41.25	40.20	55.97	49.55			
990	34.28	33.05	32.85	41.33	40.25	56.07	49.70			
1000	34.28	33.05	32.88	41.40	40.30	56.17	49.90			
1010	34.28	33.05	32.93	41.45	40.33	56.27	50.05			
1020	34.33	33.18	32.95	41.43	40.38	56.37	50.20			
1030	34.33	33.08	32.93	41.50	40.40	56.47	50.45			
1040	34.38	33.13	32.93	41.50	40.48	56.57	50.60			
1050	34.38	33.15	32.95	41.63	40.50	56.67	50.75			
1060	34.38	33.15	32.93	41.98	40.55	56.77	50.90			
1070	34.38	33.15	32.93	42.13	40.60	56.87	51.05			
1080	34.45	33.18	32.98	42.15	40.65	56.97	51.20			
1090	34.48	33.20	33.03	42.15	40.70					
1100	34.48	33.25	33.03	42.20	40.75					
1110	34.48	33.25	33.03	42.28	40.80					
1120	34.48	33.25	33.05	42.28	40.88					
1130	34.48	33.25	33.03	42.33	40.88					
1140	34.50	33.25	33.05	42.35	40.98					
1150	34.55	33.28	33.08	42.43	40.98					
1160	34.58	33.28	33.10	42.45	41.08					
1170	34.58	33.33	33.13	42.50	41.10					
1180	34.58	33.30	33.13	42.55	41.20					
1190	34.58	33.33	33.13	42.58	41.28					
1200	34.60	33.35	33.13	42.65	41.35					
1210	34.65	33.35	33.15	42.68	41.38					
1220	34.68	33.35	33.15	42.73	41.38					
1230	34.65	33.35	33.15	42.78	41.48					
1240	34.68	33.38	33.20	42.83	41.48					



Discharging Interval 10 S								Discharging Interval 25 S	
Waktu (S)	Suhu Rata - Rata (°C)						Waktu (S)	Suhu Rata-Rata (°C)	
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (6 mm)		3C (9mm)	2C (3 mm)
1250	34.68	33.40	33.18	42.90	41.58				
1260	34.70	33.43	33.20	42.93	41.65				
1270	34.73	33.35	33.15	43.00	41.68				
1280	34.75	33.45	33.23	43.03	41.75				
1290	34.78	33.45	33.25	43.08	41.80				
1300	34.78	33.48	33.25	43.15	41.88				
1310	34.78	33.45	33.23	43.28	41.93				
1320	34.80	33.55	33.30	43.23	41.98				
1330	34.85	33.48	33.25	43.28	42.03				
1340	34.83	33.55	33.33	43.35	42.08				
1350	34.88	33.50	33.28	43.40	42.13				
1360	34.88	33.53	33.30	43.43	42.20				
1370	34.88	33.55	33.30	43.50	42.25				
1380	34.88	33.55	33.33	43.55	42.33				
1390	34.90	33.60	33.40	43.63	42.38				
1400	34.90	33.55	33.33	43.68	42.40				
1410	34.93	33.63	33.40	43.75	42.50				
1420	34.95	33.58	33.33	43.78	42.53				
1430	34.98	33.60	33.33	43.85	42.58				
1440	34.98	33.60	33.35	43.90	42.73				
1450	35.00	33.60	33.40	44.00	42.73				
1460	34.98	33.60	33.40	44.05	42.80				
1470	35.00	33.60	33.38	44.10	42.85				
1480	35.00	33.60	33.40	44.18	42.93				
1490	35.05	33.60	33.43	44.18	43.00				
1500	35.05	33.60	33.40	44.28	43.05				
1510	35.05	33.63	33.43	44.33	43.15				
1520	35.05	33.63	33.43	44.40	43.20				
1530	35.08	33.65	33.45	44.45	43.30				
1540	35.05	33.70	33.45	44.50	43.33				
1550	35.10	33.70	33.45	44.55	43.38				
1560	35.10	33.70	33.45	44.63	43.50				
1570	35.20	33.70	33.48	44.65	43.55				
1580	35.15	33.80	33.55	44.75	43.65				
1590	35.15	33.80	33.55	44.78	43.70				
1600	35.15	33.73	33.53	44.85	43.85				
1610	35.15	33.80	33.60	44.90	43.95				
1620	35.18	33.75	33.55	44.98	43.98				

Discharging Interval 10 S								Discharging Interval 25 S	
Waktu (S)	Suhu Rata - Rata (°C)						Waktu (S)	Suhu Rata-Rata (°C)	
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (6 mm)		3C (9mm)	2C (3 mm)
1630	35.20	33.80	33.55	45.00	44.10				
1640	35.20	33.80	33.55	45.08	44.15				
1650	35.20	33.80	33.60	45.10	44.30				
1660	35.23	33.80	33.58	45.18	44.40				
1670	35.30	33.83	33.60	45.23	44.48				
1680	35.25	33.85	33.60	45.25	44.55				
1690	35.30	33.90	33.60	45.38	44.65				
1700	35.33	33.90	33.60	45.48	44.78				
1710	35.33	33.90	33.63	45.55	44.78				
1720	35.25	33.90	33.63						
1730	35.30	33.90	33.63						
1740	35.30	33.90	33.68						
1750	35.30	33.90	33.68						
1760	35.38	33.90	33.68						
1770	35.43	34.00	33.73						
1780	35.43	33.93	33.70						
1790	35.35	33.93	33.70						
1800	35.45	34.00	33.70						
1810	35.45	34.00	33.70						
1820	35.48	34.00	33.70						
1830	35.48	34.00	33.70						
1840	35.48	34.00	33.73						
1850	35.43	34.00	33.73						
1860	35.48	34.00	33.73						
1870	35.45	34.00	33.73						
1880	35.50	34.00	33.75						
1890	35.45	34.00	33.80						
1900	35.50	34.00	33.80						
1910	35.50	34.03	33.80						
1920	35.53	34.03	33.80						
1930	35.55	34.05	33.80						
1940	35.55	34.08	33.80						
1950	35.55	34.10	33.83						
1960	35.58	34.08	33.83						
1970	35.58	34.08	33.85						
1980	35.58	34.10	33.85						
1990	35.58	34.10	33.88						
2000	35.58	34.10	33.90						

Discharging Interval 10 S								Discharging Interval 25 S		
Waktu (S)	Suhu Rata - Rata (°C)							Waktu (S)	Suhu Rata-Rata (°C)	
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)		2C (3 mm)	3C (3 mm)
2010	35.58	34.10	33.90							
2020	35.58	34.13	33.90							
2030	35.65	34.10	33.90							
2040	35.60	34.10	33.90							
2050	35.63	34.13	33.90							
2060	35.65	34.15	33.93							
2070	35.68	34.15	33.90							
2080	35.65	34.15	33.93							
2090	35.68	34.15	33.95							
2100	35.68	34.15	33.93							
2110	35.68	34.18	33.95							
2120	35.68	34.18	33.98							
2130	35.68	34.20	34.00							
2140	35.68	34.20	34.03							
2150	35.70	34.23	34.03							
2160	35.70	34.23	34.03							
2170	35.73	34.23	34.03							
2180	35.70	34.25	34.03							
2190	35.75	34.25	34.05							
2200	35.78	34.25	34.10							
2210	35.75	34.28	34.10							
2220	35.78	34.30	34.10							
2230	35.78	34.30	34.13							
2240	35.78	34.30	34.13							
2250	35.80	34.30	34.13							
2260	35.78	34.30	34.10							
2270	35.80	34.30	34.10							
2280	35.85	34.33	34.13							
2290	35.88	34.35	34.13							
2300	35.90	34.35	34.18							
2310	35.88	34.35	34.18							
2320	35.98	34.35	34.15							
2330	35.90	34.35	34.15							
2340	35.98	34.38	34.18							
2350	35.90	34.38	34.18							
2360	36.00	34.40	34.20							
2370	36.03	34.43	34.20							
2380	36.05	34.45	34.23							

Discharging Interval 10 S								Discharging Interval 25 S		
Waktu (S)	Suhu Rata - Rata (°C)							Waktu (S)	Suhu Rata-Rata (°C)	
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)		2C (3 mm)	3C (3 mm)
2390	36.05	34.45	34.23							
2400	36.05	34.45	34.25							
2410	36.08	34.45	34.25							
2420	36.08	34.45	34.28							
2430	36.05	34.50	34.30							
2440	36.10	34.50	34.33							
2450	36.13	34.55	34.33							
2460	36.15	34.55	34.35							
2470	36.15	34.55	34.35							
2480	36.18	34.55	34.38							
2490	36.23	34.58	34.43							
2500	36.23	34.58	34.43							
2510	36.25	34.60	34.45							
2520	36.25	34.63	34.48							
2530	36.28	34.63	34.48							
2540	36.30	34.68	34.50							
2550	36.30	34.68	34.53							
2560	36.33	34.68	34.53							
2570	36.38	34.70	34.55							
2580	36.35	34.70	34.55							
2590	36.38	34.75	34.58							
2600	36.40	34.80	34.63							
2610	36.43	34.80	34.65							
2620	36.45	34.80	34.65							
2630	36.48	34.83	34.65							
2640	36.50	34.88	34.65							
2650	36.50	34.88	34.68							
2660	36.50	34.90	34.70							
2670	36.55	34.90	34.73							
2680	36.55	34.93	34.75							
2690	36.58	34.93	34.75							
2700	36.60	34.98	34.78							
2710	36.60	34.98	34.80							
2720	36.65	34.98	34.80							
2730	36.65	35.03	34.83							
2740	36.68	35.03	34.80							
2750	36.68	35.03	34.85							
2760	36.68	35.05	34.90							

Discharging Interval 10 S								Discharging Interval 25 S		
Waktu (S)	Suhu Rata - Rata (°C)							Waktu (S)	Suhu Rata-Rata (°C)	
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)		2C (3 mm)	3C (3 mm)
2770	36.70	35.08	34.90							
2780	36.75	35.08	34.93							
2790	36.78	35.10	34.93							
2800	36.78	35.10	34.93							
2810	36.78	35.10	34.98							
2820	36.78	35.15	35.03							
2830	36.83	35.15	35.03							
2840	36.85	35.18	35.03							
2850	36.88	35.18	35.03							
2860	36.88	35.20	35.05							
2870	36.88	35.20	35.10							
2880	36.88	35.23	35.13							
2890	36.88	35.28	35.13							
2900	36.90	35.28	35.13							
2910	36.93	35.28	35.13							
2920	36.98	35.33	35.13							
2930	37.03	35.33	35.18							
2940	37.08	35.35	35.20							
2950	37.00	35.35	35.23							
2960	36.98	35.38	35.23							
2970	37.08	35.43	35.23							
2980	37.08	35.43	35.25							
2990	37.08	35.45	35.30							
3000	37.18	35.45	35.33							
3010	37.18	35.48	35.33							
3020	37.18	35.53	35.33							
3030	37.15	35.55	35.35							
3040	37.20	35.55	35.40							
3050	37.18	35.53	35.35							
3060	37.28	35.65	35.45							
3070	37.33	35.63	35.45							
3080	37.33	35.65	35.48							
3090	37.35	35.70	35.48							
3100	37.38	35.70	35.50							
3110	37.40	35.73	35.55							
3120	37.45	35.80	35.58							
3130	37.48	35.80	35.60							
3140	37.50	35.80	35.65							

Discharging Interval 10 S								Discharging Interval 25 S		
Waktu (S)	Suhu Rata - Rata (°C)							Waktu (S)	Suhu Rata-Rata (°C)	
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)		2C (3 mm)	3C (3 mm)
3150	37.53	35.85	35.65							
3160	37.55	35.90	35.70							
3170	37.60	35.93	35.75							
3180	37.63	35.93	35.78							
3190	37.68	35.95	35.83							
3200	37.70	36.05	35.85							
3210	37.70	36.05	35.88							
3220	37.80	36.05	35.93							
3230	37.80	36.08	35.93							
3240	37.83	36.15	35.98							
3250	37.85	36.18	36.03							
3260	37.88	36.20	36.03							
3270	37.90	36.23	36.08							
3280	37.95	36.30	36.13							
3290	38.05	36.30	36.15							
3300	38.03	36.33	36.18							
3310	38.05	36.40	36.23							
3320	38.08	36.45	36.28							
3330	38.15	36.45	36.30							
3340	38.15	36.55	36.35							
3350	38.20	36.58	36.38							
3360	38.25	36.60	36.45							
3370	38.28	36.70	36.48							
3380	38.35	36.73	36.50							
3390	38.35	36.78	36.58							
3400	38.40	36.88	36.58							
3410	38.45	36.95	36.65							
3420	38.45	37.00	36.68							

**Lampiran 9 : Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Grafrit**

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
10	31.125	31.225	31.075	31.067	31.067	31.125	31.200	31.167	31.250
20	31.150	31.275	31.075	31.167	31.133	31.125	31.350	31.333	31.400
30	31.150	31.275	31.075	31.233	31.200	31.200	31.500	31.600	31.650

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
40	31.150	31.275	31.125	31.333	31.300	31.275	31.750	31.867	31.850
50	31.175	31.250	31.175	31.433	31.467	31.350	31.950	32.133	32.050
60	31.225	31.250	31.175	31.533	31.567	31.400	32.200	32.400	32.350
70	31.250	31.275	31.200	31.633	31.733	31.550	32.450	32.700	32.550
80	31.300	31.300	31.225	31.800	31.867	31.625	32.700	32.967	32.750
90	31.275	31.350	31.250	31.833	31.967	31.725	32.950	33.300	32.950
100	31.275	31.350	31.275	31.967	32.067	31.825	33.200	33.533	33.200
110	31.325	31.400	31.275	32.067	32.200	31.900	33.450	33.800	33.400
120	31.350	31.450	31.325	32.167	32.333	32.000	33.700	34.067	33.600
130	31.450	31.500	31.375	32.200	32.433	32.100	33.950	34.367	33.800
140	31.375	31.500	31.375	32.367	32.567	32.175	34.250	34.600	34.000
150	31.475	31.400	31.375	32.467	32.700	32.275	34.400	34.867	34.200
160	31.475	31.500	31.425	32.567	32.800	32.375	34.700	35.133	34.450
170	31.400	31.500	31.450	32.633	32.900	32.450	34.900	35.367	34.600
180	31.500	31.525	31.475	32.733	33.000	32.550	35.150	35.667	34.850
190	31.500	31.575	31.500	32.833	33.100	32.575	35.450	35.867	35.050
200	31.525	31.600	31.550	32.867	33.200	32.775	35.650	36.133	35.250
210	31.550	31.600	31.550	32.967	33.300	32.875	35.750	36.333	35.450
220	31.575	31.600	31.550	33.067	33.467	32.875	36.000	36.567	35.650
230	31.550	31.675	31.600	33.133	33.533	33.050	36.250	36.800	35.850
240	31.600	31.700	31.625	33.233	33.633	33.075	36.350	37.033	36.000
250	31.600	31.625	31.650	33.333	33.733	33.150	36.550	37.200	36.200
260	31.625	31.675	31.650	33.400	33.800	33.325	36.800	37.367	36.400
270	31.625	31.750	31.700	33.467	33.933	33.450	36.850	37.567	36.600
280	31.600	31.800	31.700	33.533	34.000	33.450	37.050	37.767	36.700
290	31.700	31.725	31.750	33.600	34.100	33.550	37.050	38.000	36.950
300	31.700	31.825	31.750	33.700	34.200	33.625	37.150	38.200	37.100
310	31.700	31.825	31.775	33.800	34.267	33.700	37.250	38.400	37.300
320	31.700	31.800	31.800	33.900	34.367	33.800	37.450	38.533	37.450
330	31.750	31.875	31.850	34.000	34.433	33.900	37.550	38.700	37.650
340	31.750	31.900	31.850	34.000	34.533	33.975	37.750	38.833	37.750
350	31.750	31.925	31.825	34.100	34.633	34.050	37.850	39.033	37.950
360	31.775	31.950	31.850	34.200	34.700	34.150	38.050	39.167	38.100
370	31.800	31.900	31.850	34.267	34.733	34.250	38.100	39.333	38.250
380	31.825	31.925	31.850	34.300	34.833	34.325	38.200	39.533	38.400
390	31.850	32.000	31.850	34.400	34.933	34.400	38.450	39.667	38.600
400	31.850	31.950	31.950	34.500	35.033	34.475	38.650	39.800	38.700
410	31.850	31.950	31.950	34.533	35.100	34.550	38.800	39.967	38.850
420	31.900	32.075	31.950	34.600	35.167	34.625	39.000	40.067	38.950

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
430	31.925	32.050	32.050	34.700	35.233	34.700	39.250	40.267	39.150
440	31.950	32.125	31.950	34.733	35.333	34.775	39.500	40.400	39.250
450	31.950	32.150	32.025	34.800	35.367	34.850	39.650	40.500	39.400
460	31.950	32.075	32.050	34.867	35.467	34.900	39.700	40.667	39.550
470	31.950	32.125	32.050	34.933	35.500	35.000	39.850	40.800	39.600
480	31.900	32.150	32.150	35.000	35.600	35.075	39.900	40.933	39.800
490	32.000	32.250	32.100	35.133	35.700	35.200	40.200	41.200	40.000
500	32.050	32.250	32.175	35.200	35.733	35.275	40.200	41.200	40.150
510	32.050	32.250	32.150	35.267	35.800	35.350	40.400	41.300	40.250
520	32.050	32.350	32.175	35.333	35.833	35.425	40.450	41.467	40.400
530	32.050	32.350	32.200	35.367	35.933	35.475	40.500	41.600	40.500
540	32.050	32.350	32.225	35.467	35.933	35.550	40.600	41.700	40.600
550	32.075	32.350	32.250	35.500	36.033	35.600	40.800	41.800	40.700
560	32.100	32.350	32.250	35.567	36.067	35.675	40.950	41.900	40.800
570	32.150	32.425	32.300	35.633	36.133	35.675	41.050	41.933	40.950
580	32.150	32.425	32.300	35.733	36.200	35.775	41.100	42.033	41.050
590	32.150	32.450	32.300	35.733	36.233	35.775	41.100	42.100	41.150
600	32.150	32.450	32.350	35.833	36.333	35.825	41.150	42.200	41.250
610	32.150	32.475	32.350	35.867	36.367	35.875	41.300	42.167	41.350
620	32.175	32.525	32.350	35.933	36.400	35.975	41.400	42.333	41.450
630	32.200	32.525	32.375	36.000	36.467	36.025	41.500	42.400	41.550
640	32.225	32.525	32.375	36.067	36.533	36.100	41.600	42.467	41.650
650	32.250	32.550	32.375	36.133	36.600	36.125	41.700	42.567	41.750
660	32.250	32.550	32.375	36.167	36.667	36.200	41.800	42.600	41.800
670	32.275	32.575	32.400	36.267	36.700	36.250	41.900	42.667	41.800
680	32.275	32.525	32.425	36.333	36.767	36.300	42.050	42.667	41.900
690	32.325	32.625	32.450	36.367	36.800	36.350	42.350	42.733	41.950
700	32.325	32.625	32.475	36.433	36.833	36.425	42.350	42.800	42.000
710	32.350	32.625	32.475	36.467	36.900	36.475	42.550	42.867	42.100
720	32.350	32.650	32.500	36.533	36.967	36.550	42.700	42.933	42.200
730	32.350	32.675	32.525	36.633	37.067	36.575	42.800	43.033	42.250
740	32.375	32.675	32.550	36.633	37.100	36.650	42.950	43.100	42.300
750	32.450	32.700	32.550	36.700	37.167	36.725	43.150	43.133	42.400
760	32.475	32.725	32.575	36.767	37.200	36.750	43.300	43.233	42.500
770	32.450	32.725	32.575	36.800	37.267	36.800	43.500	43.300	42.600
780	32.500	32.725	32.600	36.833	37.300	36.900	43.650	43.367	42.700
790	32.475	32.750	32.600	36.900	37.367	36.900	43.750	43.433	42.700
800	32.450	32.800	32.625	36.967	37.400	37.000	43.850	43.500	42.850
810	32.475	32.725	32.650	37.033	37.467	37.000	43.950	43.600	42.950



Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
820	32.500	32.750	32.675	37.067	37.500	37.075	44.000	43.667	43.050
830	32.500	32.825	32.675	37.133	37.533	37.125	44.150	43.700	43.050
840	32.525	32.850	32.675	37.133	37.633	37.150	44.250	43.800	43.150
850	32.525	32.850	32.700	37.233	37.633	37.225	44.350	43.867	43.300
860	32.550	32.800	32.700	37.267	37.733	37.275	44.450	43.967	43.350
870	32.625	32.825	32.675	37.333	37.733	37.325	44.550	44.033	43.450
880	32.575	32.900	32.675	37.333	37.833	37.375	44.550	44.100	43.500
890	32.625	32.900	32.725	37.433	37.867	37.400	44.600	44.167	43.550
900	32.625	32.875	32.775	37.433	37.900	37.450	44.650	44.200	43.700
910	32.700	32.900	32.775	37.567	37.967	37.425	44.700	44.300	43.750
920	32.650	32.900	32.675	37.567	37.967	37.500	44.750	44.367	43.850
930	32.650	32.900	32.700	37.633	38.067	37.625	44.800	44.467	43.950
940	32.675	32.925	32.800	37.633	38.067	37.625	44.900	44.533	44.050
950	32.650	32.925	32.775	37.667	38.133	37.625	44.950	44.633	44.100
960	32.675	32.925	32.800	37.733	38.167	37.725	45.000	44.667	44.250
970	32.700	32.925	32.800	37.800	38.267	37.775	45.200	44.767	44.450
980	32.700	32.925	32.775	37.833	38.267	37.800	45.200	44.833	44.500
990	32.725	33.000	32.775	37.867	38.367	37.850	45.250	44.867	44.650
1000	32.725	32.950	32.800	37.933	38.400	37.925	45.350	44.933	44.750
1010	32.750	32.975	32.825	37.967	38.400	37.925	45.400	45.000	44.850
1020	32.775	33.000	32.800	38.033	38.467	38.025	45.450	45.067	44.900
1030	32.775	33.000	32.850	38.033	38.500	37.975	45.500	45.167	44.950
1040	32.800	33.025	32.875	38.100	38.533	38.000	45.600	45.267	45.000
1050	32.775	33.025	32.925	38.133	38.600	38.050	45.650	45.333	45.200
1060	32.800	33.025	32.900	38.167	38.667	38.100	45.650	45.467	45.250
1070	32.850	33.025	32.900	38.233	38.667	38.100	45.850	45.500	45.400
1080	32.800	33.025	32.900	38.267	38.700	38.150	45.950	45.700	45.450
1090	32.850	33.025	32.925	38.300	38.767	38.175			
1100	32.875	33.075	33.000	38.367	38.767	38.275			
1110	32.875	33.050	32.925	38.367	38.767	38.275			
1120	32.925	33.100	32.950	38.433	38.867	38.325			
1130	32.875	33.100	32.950	38.467	38.867	38.425			
1140	32.950	33.100	32.950	38.533	38.900	38.400			
1150	32.900	33.125	32.975	38.567	38.967	38.525			
1160	32.925	33.125	33.050	38.600	38.967	38.475			
1170	32.950	33.150	33.000	38.633	39.000	38.500			
1180	32.950	33.150	33.000	38.667	39.033	38.550			
1190	32.975	33.150	33.000	38.700	39.067	38.575			
1200	32.975	33.150	33.025	38.767	39.100	38.600			

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
1210	32.975	33.175	33.100	38.800	39.167	38.650			
1220	33.025	33.175	33.025	38.867	39.233	38.725			
1230	33.025	33.175	33.050	38.900	39.200	38.775			
1240	33.025	33.225	33.050	38.900	39.233	38.825			
1250	33.025	33.200	33.050	38.967	39.267	38.825			
1260	33.075	33.200	33.100	39.000	39.333	38.925			
1270	33.075	33.225	33.100	39.067	39.367	38.950			
1280	33.075	33.200	33.100	39.100	39.400	39.025			
1290	33.100	33.250	33.100	39.167	39.433	39.050			
1300	33.100	33.225	33.100	39.200	39.500	39.100			
1310	33.125	33.225	33.100	39.267	39.533	39.100			
1320	33.150	33.250	33.100	39.300	39.567	39.175			
1330	33.125	33.250	33.175	39.333	39.600	39.250			
1340	33.150	33.275	33.125	39.400	39.633	39.250			
1350	33.175	33.275	33.200	39.433	39.667	39.325			
1360	33.200	33.275	33.225	39.500	39.700	39.350			
1370	33.200	33.300	33.200	39.533	39.767	39.400			
1380	33.225	33.350	33.200	39.600	39.800	39.450			
1390	33.225	33.350	33.200	39.633	39.833	39.475			
1400	33.225	33.375	33.200	39.667	39.900	39.525			
1410	33.225	33.375	33.200	39.733	39.900	39.550			
1420	33.250	33.400	33.200	39.767	39.967	39.625			
1430	33.250	33.400	33.225	39.833	40.000	39.600			
1440	33.300	33.350	33.300	39.933	40.100	39.675			
1450	33.275	33.350	33.300	39.967	40.100	39.775			
1460	33.300	33.450	33.300	40.033	40.167	39.850			
1470	33.300	33.400	33.300	40.067	40.200	39.850			
1480	33.325	33.400	33.300	40.200	40.233	39.950			
1490	33.325	33.475	33.325	40.167	40.267	40.000			
1500	33.325	33.400	33.325	40.233	40.333	40.050			
1510	33.375	33.475	33.325	40.267	40.333	40.100			
1520	33.400	33.400	33.375	40.333	40.400	40.125			
1530	33.400	33.500	33.350	40.367	40.367	40.050			
1540	33.400	33.475	33.400	40.467	40.467	40.150			
1550	33.400	33.475	33.375	40.500	40.433	40.175			
1560	33.425	33.425	33.400	40.567	40.533	40.200			
1570	33.450	33.500	33.400	40.600	40.567	40.250			
1580	33.450	33.450	33.400	40.767	40.600	40.275			
1590	33.450	33.475	33.400	40.733	40.567	40.375			

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
1600	33.475	33.500	33.400	40.800	40.633	40.425			
1610	33.450	33.475	33.400	40.900	40.700	40.475			
1620	33.500	33.500	33.400	40.933	40.700	40.450			
1630	33.500	33.500	33.425	41.000	40.767	40.500			
1640	33.475	33.500	33.425	41.067	40.833	40.600			
1650	33.500	33.500	33.450	41.100	40.833	40.600			
1660	33.500	33.525	33.500	41.233	40.900	40.700			
1670	33.500	33.550	33.475	41.300	40.933	40.750			
1680	33.525	33.550	33.500	41.367	40.967	40.750			
1690	33.550	33.550	33.500	41.467	41.033	40.800			
1700	33.525	33.550	33.500	41.467	41.067	40.900			
1710	33.550	33.575	33.500	41.500	41.133	40.950			
1720	33.550	33.550	33.500						
1730	33.550	33.575	33.500						
1740	33.550	33.600	33.525						
1750	33.575	33.600	33.525						
1760	33.575	33.600	33.525						
1770	33.575	33.600	33.575						
1780	33.575	33.625	33.575						
1790	33.600	33.625	33.575						
1800	33.600	33.600	33.600						
1810	33.625	33.625	33.600						
1820	33.625	33.650	33.600						
1830	33.650	33.600	33.600						
1840	33.650	33.625	33.600						
1850	33.650	33.650	33.600						
1860	33.600	33.625	33.600						
1870	33.675	33.650	33.625						
1880	33.650	33.650	33.625						
1890	33.675	33.650	33.650						
1900	33.700	33.650	33.650						
1910	33.700	33.650	33.675						
1920	33.700	33.675	33.700						
1930	33.700	33.650	33.700						
1940	33.700	33.675	33.700						
1950	33.750	33.625	33.700						
1960	33.750	33.675	33.700						
1970	33.750	33.675	33.725						
1980	33.750	33.675	33.725						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
1990	33.750	33.625	33.750						
2000	33.750	33.650	33.750						
2010	33.750	33.650	33.775						
2020	33.750	33.650	33.775						
2030	33.775	33.700	33.800						
2040	33.750	33.750	33.775						
2050	33.800	33.750	33.800						
2060	33.800	33.675	33.800						
2070	33.800	33.750	33.800						
2080	33.825	33.700	33.800						
2090	33.800	33.700	33.800						
2100	33.850	33.725	33.800						
2110	33.850	33.700	33.800						
2120	33.850	33.725	33.850						
2130	33.850	33.700	33.825						
2140	33.850	33.725	33.825						
2150	33.875	33.725	33.850						
2160	33.875	33.725	33.850						
2170	33.875	33.725	33.850						
2180	33.875	33.750	33.875						
2190	33.900	33.750	33.850						
2200	33.900	33.750	33.900						
2210	33.925	33.750	33.900						
2220	33.925	33.750	33.900						
2230	33.925	33.775	33.900						
2240	33.950	33.800	33.925						
2250	33.925	33.750	33.950						
2260	33.950	33.775	33.950						
2270	33.950	33.775	33.925						
2280	33.950	33.800	33.950						
2290	33.950	33.800	33.950						
2300	33.950	33.800	33.975						
2310	33.950	33.850	34.000						
2320	33.950	33.850	34.000						
2330	34.000	33.850	34.025						
2340	33.975	33.875	34.050						
2350	34.025	33.875	34.025						
2360	34.025	33.875	34.050						
2370	34.025	33.900	34.075						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2380	34.050	33.900	34.100						
2390	34.050	33.975	34.125						
2400	34.050	33.950	34.100						
2410	34.150	33.975	34.150						
2420	34.100	33.975	34.125						
2430	34.125	34.000	34.125						
2440	34.125	34.000	34.150						
2450	34.150	34.000	34.150						
2460	34.150	34.050	34.150						
2470	34.150	34.075	34.175						
2480	34.150	34.075	34.175						
2490	34.150	34.075	34.175						
2500	34.225	34.075	34.150						
2510	34.250	34.100	34.200						
2520	34.250	34.100	34.250						
2530	34.250	34.100	34.250						
2540	34.250	34.125	34.250						
2550	34.275	34.150	34.275						
2560	34.300	34.200	34.250						
2570	34.350	34.200	34.300						
2580	34.350	34.200	34.325						
2590	34.350	34.200	34.350						
2600	34.350	34.275	34.350						
2610	34.375	34.250	34.350						
2620	34.375	34.300	34.400						
2630	34.450	34.300	34.400						
2640	34.450	34.300	34.450						
2650	34.450	34.275	34.350						
2660	34.450	34.300	34.450						
2670	34.450	34.400	34.450						
2680	34.450	34.300	34.375						
2690	34.475	34.400	34.475						
2700	34.475	34.400	34.450						
2710	34.475	34.400	34.450						
2720	34.525	34.425	34.450						
2730	34.550	34.400	34.525						
2740	34.550	34.450	34.550						
2750	34.550	34.400	34.550						
2760	34.550	34.500	34.475						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2770	34.575	34.425	34.550						
2780	34.600	34.450	34.525						
2790	34.625	34.475	34.600						
2800	34.650	34.550	34.550						
2810	34.650	34.500	34.550						
2820	34.650	34.500	34.550						
2830	34.675	34.500	34.650						
2840	34.675	34.500	34.625						
2850	34.725	34.500	34.650						
2860	34.725	34.600	34.650						
2870	34.725	34.600	34.650						
2880	34.750	34.625	34.650						
2890	34.750	34.675	34.700						
2900	34.750	34.600	34.775						
2910	34.775	34.700	34.750						
2920	34.775	34.700	34.800						
2930	34.800	34.675	34.750						
2940	34.825	34.700	34.750						
2950	34.825	34.700	34.775						
2960	34.850	34.700	34.750						
2970	34.850	34.775	34.850						
2980	34.825	34.775	34.825						
2990	34.850	34.775	34.850						
3000	34.875	34.800	34.825						
3010	34.875	34.800	34.825						
3020	34.875	34.850	34.850						
3030	34.900	34.875	34.850						
3040	34.925	34.900	34.900						
3050	34.925	34.900	34.900						
3060	35.000	34.925	34.975						
3070	35.025	34.975	35.000						
3080	34.975	34.950	34.950						
3090	35.025	35.000	35.000						
3100	35.025	35.000	35.025						
3110	35.050	35.025	35.025						
3120	35.100	35.025	35.075						
3130	35.125	35.050	35.100						
3140	35.150	35.075	35.100						
3150	35.150	35.125	35.125						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
3160	35.175	35.125	35.150						
3170	35.225	35.150	35.175						
3180	35.225	35.150	35.175						
3190	35.250	35.225	35.225						
3200	35.325	35.250	35.225						
3210	35.325	35.250	35.250						
3220	35.325	35.275	35.275						
3230	35.375	35.350	35.300						
3240	35.400	35.350	35.325						
3250	35.475	35.350	35.325						
3260	35.500	35.350	35.325						
3270	35.450	35.425	35.350						
3280	35.475	35.450	35.375						
3290	35.525	35.425	35.425						
3300	35.525	35.500	35.400						
3310	35.525	35.525	35.450						
3320	35.625	35.575	35.475						
3330	35.625	35.625	35.500						
3340	35.625	35.650	35.525						
3350	35.675	35.700	35.550						
3360	35.700	35.725	35.575						
3370	35.725	35.725	35.625						
3380	35.825	35.775	35.650						
3390	35.775	35.775	35.650						
3400	35.800	35.800	35.700						
3410	35.825	35.875	35.725						
3420	35.925	35.875	35.750						

**Lampiran 10 : Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Aluminium**

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
10	31.100	31.100	31.225	31.100	31.150	31.100	31.033	31.267	31.133
20	31.075	31.100	31.225	31.000	31.200	31.133	31.200	31.367	31.233
30	31.150	31.100	31.250	31.100	31.250	31.200	31.433	31.533	31.500
40	31.150	31.100	31.250	31.150	31.350	31.333	31.667	31.833	31.700
50	31.175	31.167	31.250	31.250	31.500	31.467	31.900	32.000	31.933

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
60	31.200	31.200	31.300	31.250	31.550	31.600	32.167	32.233	32.233
70	31.275	31.200	31.325	31.300	31.600	31.733	32.400	32.433	32.500
80	31.275	31.267	31.325	31.450	31.750	31.900	32.633	32.700	32.767
90	31.275	31.300	31.350	31.550	31.900	32.000	32.933	32.933	33.033
100	31.325	31.267	31.400	31.650	32.000	32.167	33.167	33.167	33.267
110	31.325	31.300	31.425	31.750	32.100	32.300	33.467	33.467	33.533
120	31.400	31.400	31.425	31.850	32.200	32.433	33.700	33.700	33.767
130	31.400	31.367	31.475	31.950	32.300	32.567	33.933	33.900	34.000
140	31.450	31.400	31.500	32.050	32.350	32.733	34.167	34.133	34.200
150	31.500	31.467	31.500	32.150	32.450	32.833	34.467	34.367	34.433
160	31.500	31.467	31.550	32.300	32.600	33.000	34.667	34.567	34.700
170	31.525	31.533	31.575	32.400	32.700	33.100	34.967	34.867	34.900
180	31.550	31.567	31.600	32.500	32.800	33.233	35.167	35.033	35.133
190	31.575	31.567	31.600	32.600	32.900	33.367	35.367	35.233	35.333
200	31.625	31.567	31.600	32.700	33.000	33.467	35.600	35.467	35.533
210	31.650	31.633	31.650	32.850	33.100	33.633	35.800	35.700	35.733
220	31.650	31.667	31.675	32.950	33.150	33.733	35.967	35.867	35.933
230	31.675	31.700	31.700	33.050	33.250	33.833	36.167	36.133	36.100
240	31.700	31.733	31.700	33.150	33.350	33.867	36.367	36.267	36.300
250	31.750	31.767	31.750	33.250	33.450	33.967	36.533	36.467	36.467
260	31.775	31.800	31.775	33.350	33.550	34.167	36.767	36.633	36.667
270	31.725	31.833	31.775	33.500	33.550	34.233	36.933	36.833	36.833
280	31.775	31.867	31.775	33.600	33.650	34.367	37.100	37.067	37.000
290	31.825	31.900	31.850	33.700	33.800	34.467	37.300	37.233	37.133
300	31.875	31.867	31.850	33.800	33.900	34.567	37.467	37.367	37.333
310	31.875	31.900	31.875	33.900	33.900	34.667	37.600	37.600	37.500
320	31.875	31.933	31.875	34.000	34.100	34.767	37.800	37.767	37.667
330	31.925	32.033	31.875	34.100	34.150	34.800	37.900	37.833	37.733
340	31.975	32.033	31.950	34.200	34.200	34.967	38.100	38.067	37.867
350	31.975	32.033	31.875	34.350	34.300	35.000	38.267	38.200	38.000
360	31.975	32.067	31.975	34.500	34.400	35.133	38.333	38.333	38.033
370	32.000	32.133	31.975	34.600	34.450	35.200	38.500	38.500	38.300
380	32.000	32.133	32.025	34.650	34.550	35.200	38.667	38.667	38.367
390	32.050	32.167	31.975	34.700	34.550	35.400	38.800	38.800	38.533
400	32.050	32.200	32.000	34.800	34.750	35.433	38.900	38.933	38.600
410	32.000	32.200	32.025	34.900	34.850	35.500	39.033	39.067	38.800
420	32.075	32.233	32.025	35.000	34.850	35.533	39.167	39.200	38.833
430	32.100	32.233	32.075	35.100	34.950	35.567	39.300	39.300	38.967
440	32.150	32.300	32.100	35.200	35.050	35.700	39.433	39.433	39.167



Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
450	32.175	32.300	32.125	35.300	35.150	35.700	39.533	39.600	39.300
460	32.100	32.400	32.125	35.400	35.200	35.767	39.633	39.700	39.367
470	32.200	32.400	32.150	35.500	35.200	35.767	39.867	39.833	39.533
480	32.150	32.400	32.175	35.550	35.350	35.833	40.033	39.967	39.633
490	32.275	32.400	32.225	35.700	35.500	35.867	40.200	40.267	39.933
500	32.200	32.433	32.225	35.800	35.500	35.933	40.433	40.400	40.067
510	32.225	32.500	32.250	35.850	35.650	36.033	40.567	40.500	40.133
520	32.275	32.500	32.275	35.850	35.650	36.000	40.700	40.600	40.333
530	32.300	32.533	32.325	36.000	35.700	36.033	40.833	40.767	40.333
540	32.300	32.533	32.325	36.050	35.850	36.133	41.033	40.867	40.600
550	32.300	32.600	32.350	36.050	35.900	36.200	41.133	40.967	40.633
560	32.350	32.600	32.350	36.250	35.900	36.233	41.367	41.067	40.867
570	32.375	32.600	32.375	36.300	36.000	36.300	41.533	41.167	40.900
580	32.375	32.667	32.400	36.350	36.000	36.333	41.700	41.300	41.133
590	32.400	32.700	32.350	36.450	36.100	36.367	41.800	41.400	41.233
600	32.400	32.700	32.450	36.450	36.250	36.433	41.933	41.500	41.367
610	32.450	32.767	32.375	36.550	36.300	36.467	42.133	41.633	41.533
620	32.425	32.767	32.450	36.650	36.400	36.500	42.200	41.733	41.733
630	32.475	32.767	32.450	36.650	36.400	36.533	42.400	41.867	41.933
640	32.475	32.800	32.500	36.750	36.500	36.633	42.567	41.967	42.133
650	32.475	32.833	32.550	36.850	36.600	36.667	42.700	42.067	42.300
660	32.500	32.867	32.475	36.850	36.600	36.633	42.800	42.200	42.367
670	32.550	32.900	32.550	36.950	36.600	36.600	42.900	42.333	42.600
680	32.575	32.933	32.525	37.000	36.800	36.667	43.033	42.400	42.767
690	32.575	32.867	32.525	37.050	36.800	36.767	43.133	42.500	42.900
700	32.575	32.867	32.550	37.100	36.850	36.867	43.233	42.667	42.967
710	32.575	32.967	32.625	37.150	36.900	36.833	43.367	42.767	43.133
720	32.575	32.967	32.625	37.250	37.000	36.933	43.500	42.900	43.233
730	32.600	33.000	32.575	37.250	37.100	37.000	43.600	43.033	43.333
740	32.650	33.067	32.600	37.350	37.100	37.067	43.700	43.133	43.433
750	32.675	32.967	32.625	37.350	37.200	37.100	43.833	43.300	43.533
760	32.675	33.000	32.625	37.450	37.200	37.167	43.967	43.400	43.567
770	32.675	33.067	32.625	37.550	37.300	37.233	44.100	43.533	43.733
780	32.675	33.067	32.650	37.600	37.350	37.267	44.200	43.633	43.767
790	32.625	33.067	32.650	37.650	37.400	37.300	44.300	43.767	43.900
800	32.725	33.067	32.650	37.750	37.400	37.400	44.433	44.000	43.967
810	32.725	33.067	32.675	37.750	37.500	37.467	44.567	44.133	44.033
820	32.750	33.133	32.725	37.850	37.500	37.467	44.700	44.200	44.267
830	32.775	33.167	32.725	37.900	37.600	37.533	44.800	44.400	44.333

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
840	32.675	33.233	32.725	37.950	37.600	37.567	44.900	44.533	44.367
850	32.775	33.167	32.725	38.000	37.700	37.633	45.033	44.667	44.467
860	32.725	33.167	32.725	38.050	37.800	37.667	45.167	44.733	44.633
870	32.825	33.267	32.725	38.100	37.800	37.733	45.333	44.900	44.800
880	32.775	33.267	32.725	38.200	37.850	37.733	45.433	45.100	44.867
890	32.875	33.267	32.800	38.250	38.000	37.767	45.567	45.133	44.933
900	32.775	33.233	32.825	38.300	38.000	37.833	45.733	45.267	45.000
910	32.775	33.267	32.825	38.350	38.050	37.800	45.867	45.433	45.167
920	32.825	33.267	32.825	38.400	38.050	37.867	46.000	45.500	45.200
930	32.825	33.267	32.825	38.450	38.150	37.933	46.100	45.567	45.300
940	32.900	33.300	32.825	38.500	38.200	37.933	46.267	45.633	45.400
950	32.875	33.367	32.825	38.550	38.200	38.000	46.400	45.800	45.467
960	32.925	33.333	32.850	38.600	38.300	38.067	46.533	45.867	45.600
970	32.875	33.367	32.925	38.700	38.400	38.133	46.667	46.033	45.767
980	32.950	33.400	32.950	38.750	38.400	38.167	46.767	46.133	45.867
990	32.925	33.433	32.925	38.800	38.500	38.200	46.933	46.233	45.933
1000	32.975	33.433	32.925	38.800	38.500	38.267	47.067	46.300	46.067
1010	33.000	33.433	32.925	38.900	38.600	38.300	47.133	46.400	46.167
1020	33.000	33.433	32.950	38.950	38.600	38.333	47.267	46.500	46.233
1030	32.950	33.467	32.975	39.050	38.700	38.367	47.400	46.567	46.333
1040	32.975	33.433	33.000	39.050	38.700	38.433	47.467	46.667	46.433
1050	32.975	33.433	33.000	39.150	38.800	38.433	47.533	46.767	46.500
1060	32.975	33.533	33.025	39.150	38.800	38.500	47.633	46.867	46.600
1070	33.000	33.533	33.025	39.250	38.900	38.533	47.700	46.933	46.700
1080	33.000	33.533	33.025	39.250	38.900	38.600	47.800	47.000	46.767
1090	33.025	33.533	33.025	39.350	38.950	38.633			
1100	33.075	33.533	33.050	39.450	39.000	38.567			
1110	33.050	33.533	33.050	39.450	39.050	38.667			
1120	33.050	33.533	33.125	39.550	39.100	38.700			
1130	33.050	33.600	33.075	39.550	39.100	38.700			
1140	33.050	33.633	33.150	39.650	39.200	38.767			
1150	33.050	33.633	33.150	39.700	39.200	38.800			
1160	33.075	33.633	33.100	39.700	39.300	38.800			
1170	33.125	33.633	33.125	39.800	39.300	38.900			
1180	33.125	33.633	33.125	39.850	39.400	38.967			
1190	33.125	33.633	33.125	39.900	39.400	39.000			
1200	33.150	33.633	33.150	39.900	39.500	39.033			
1210	33.150	33.700	33.150	40.000	39.500	39.033			
1220	33.175	33.700	33.200	40.100	39.600	39.067			

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
1230	33.175	33.733	33.150	40.100	39.600	39.133			
1240	33.175	33.700	33.250	40.200	39.700	39.133			
1250	33.225	33.733	33.200	40.150	39.700	39.200			
1260	33.225	33.733	33.225	40.300	39.850	39.133			
1270	33.275	33.767	33.250	40.300	39.900	39.167			
1280	33.225	33.733	33.250	40.350	39.850	39.300			
1290	33.250	33.767	33.250	40.400	39.950	39.333			
1300	33.275	33.733	33.275	40.400	40.000	39.367			
1310	33.275	33.767	33.375	40.500	40.050	39.400			
1320	33.275	33.733	33.300	40.600	40.050	39.367			
1330	33.300	33.767	33.300	40.600	40.200	39.500			
1340	33.325	33.800	33.325	40.700	40.250	39.533			
1350	33.325	33.767	33.325	40.700	40.300	39.500			
1360	33.350	33.867	33.350	40.800	40.350	39.533			
1370	33.325	33.833	33.350	40.800	40.400	39.633			
1380	33.350	33.833	33.375	40.900	40.450	39.633			
1390	33.375	33.867	33.375	40.950	40.550	39.733			
1400	33.350	33.933	33.400	40.900	40.600	39.800			
1410	33.375	33.867	33.425	41.000	40.650	39.800			
1420	33.400	33.933	33.400	41.100	40.750	39.833			
1430	33.400	33.933	33.425	41.150	40.750	39.867			
1440	33.425	33.967	33.450	41.250	40.850	40.000			
1450	33.425	33.900	33.425	41.350	40.950	40.000			
1460	33.450	33.967	33.450	41.350	41.000	40.033			
1470	33.475	33.933	33.450	41.450	41.050	40.167			
1480	33.475	33.967	33.450	41.450	41.150	40.233			
1490	33.475	33.967	33.450	41.550	41.200	40.233			
1500	33.475	33.967	33.500	41.550	41.250	40.233			
1510	33.500	33.967	33.525	41.550	41.300	40.367			
1520	33.525	34.067	33.525	41.700	41.350	40.367			
1530	33.525	34.000	33.525	41.650	41.400	40.467			
1540	33.575	34.000	33.525	41.800	41.500	40.567			
1550	33.575	34.000	33.525	41.850	41.550	40.567			
1560	33.575	34.000	33.525	41.850	41.600	40.567			
1570	33.600	34.067	33.525	41.900	41.700	40.733			
1580	33.575	34.067	33.550	42.000	41.700	40.767			
1590	33.600	34.067	33.550	42.000	41.800	40.867			
1600	33.600	34.067	33.600	42.050	41.850	40.867			
1610	33.600	34.067	33.625	42.200	41.900	40.967			

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
1620	33.650	34.067	33.625	42.200	42.000	40.967			
1630	33.675	34.100	33.625	42.200	42.050	41.100			
1640	33.700	34.100	33.650	42.300	42.100	41.100			
1650	33.675	34.100	33.650	42.400	42.200	41.167			
1660	33.700	34.133	33.675	42.400	42.300	41.300			
1670	33.700	34.133	33.675	42.500	42.300	41.300			
1680	33.700	34.167	33.700	42.550	42.400	41.433			
1690	33.700	34.133	33.675	42.600	42.500	41.467			
1700	33.650	34.167	33.700	42.650	42.600	41.567			
1710	33.725	34.167	33.700	42.750	42.650	41.667			
1720	33.700	34.167	33.700						
1730	33.750	34.167	33.700						
1740	33.700	34.167	33.725						
1750	33.775	34.167	33.700						
1760	33.700	34.200	33.725						
1770	33.800	34.200	33.700						
1780	33.800	34.233	33.725						
1790	33.800	34.200	33.725						
1800	33.800	34.233	33.750						
1810	33.775	34.233	33.725						
1820	33.800	34.267	33.750						
1830	33.800	34.233	33.775						
1840	33.875	34.233	33.775						
1850	33.800	34.267	33.800						
1860	33.800	34.267	33.800						
1870	33.825	34.267	33.800						
1880	33.825	34.267	33.800						
1890	33.850	34.300	33.800						
1900	33.875	34.300	33.800						
1910	33.850	34.267	33.850						
1920	33.900	34.367	33.825						
1930	33.900	34.333	33.875						
1940	33.900	34.333	33.875						
1950	33.875	34.333	33.875						
1960	33.900	34.367	33.875						
1970	33.900	34.367	33.900						
1980	33.925	34.367	33.875						
1990	33.925	34.367	33.900						
2000	34.000	34.333	33.900						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2010	33.925	34.367	33.900						
2020	33.925	34.333	33.925						
2030	33.950	34.333	33.925						
2040	33.950	34.333	33.925						
2050	33.950	34.367	33.925						
2060	33.950	34.367	33.925						
2070	33.975	34.333	33.950						
2080	34.050	34.367	33.925						
2090	34.000	34.433	33.925						
2100	34.000	34.367	33.950						
2110	34.000	34.400	33.975						
2120	34.025	34.367	33.950						
2130	34.025	34.367	33.975						
2140	34.025	34.400	34.000						
2150	34.025	34.433	34.000						
2160	34.025	34.433	33.975						
2170	34.050	34.433	34.025						
2180	34.100	34.433	34.025						
2190	34.100	34.433	34.025						
2200	34.075	34.467	34.025						
2210	34.075	34.467	34.050						
2220	34.125	34.433	34.050						
2230	34.125	34.467	34.050						
2240	34.125	34.467	34.050						
2250	34.125	34.500	34.075						
2260	34.125	34.500	34.050						
2270	34.150	34.500	34.100						
2280	34.175	34.533	34.125						
2290	34.175	34.533	34.125						
2300	34.200	34.533	34.125						
2310	34.225	34.567	34.125						
2320	34.225	34.567	34.150						
2330	34.200	34.567	34.150						
2340	34.225	34.567	34.150						
2350	34.225	34.567	34.125						
2360	34.250	34.600	34.175						
2370	34.225	34.567	34.175						
2380	34.300	34.600	34.200						
2390	34.300	34.633	34.200						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2400	34.325	34.633	34.250						
2410	34.325	34.633	34.250						
2420	34.325	34.667	34.250						
2430	34.350	34.667	34.250						
2440	34.300	34.700	34.275						
2450	34.300	34.700	34.275						
2460	34.325	34.700	34.300						
2470	34.425	34.700	34.300						
2480	34.350	34.700	34.325						
2490	34.450	34.733	34.350						
2500	34.450	34.733	34.325						
2510	34.400	34.767	34.350						
2520	34.475	34.767	34.375						
2530	34.425	34.800	34.400						
2540	34.450	34.800	34.400						
2550	34.500	34.800	34.400						
2560	34.525	34.833	34.400						
2570	34.550	34.833	34.450						
2580	34.575	34.833	34.475						
2590	34.575	34.900	34.475						
2600	34.575	34.900	34.475						
2610	34.600	34.900	34.475						
2620	34.650	34.900	34.525						
2630	34.575	34.900	34.500						
2640	34.650	34.900	34.525						
2650	34.675	34.900	34.550						
2660	34.700	34.900	34.575						
2670	34.725	34.967	34.575						
2680	34.675	34.967	34.575						
2690	34.775	35.000	34.575						
2700	34.675	35.000	34.600						
2710	34.725	35.000	34.600						
2720	34.775	35.000	34.625						
2730	34.800	35.033	34.625						
2740	34.775	35.067	34.650						
2750	34.850	35.067	34.650						
2760	34.875	35.067	34.675						
2770	34.825	35.067	34.700						
2780	34.825	35.067	34.700						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2790	34.875	35.100	34.700						
2800	34.875	35.067	34.725						
2810	34.875	35.100	34.725						
2820	34.875	35.067	34.725						
2830	34.900	35.100	34.775						
2840	34.925	35.167	34.800						
2850	34.950	35.167	34.800						
2860	34.950	35.167	34.800						
2870	34.950	35.167	34.825						
2880	34.975	35.167	34.850						
2890	35.025	35.200	34.875						
2900	35.050	35.200	34.875						
2910	35.050	35.267	34.900						
2920	35.150	35.233	34.900						
2930	35.075	35.267	34.900						
2940	35.125	35.267	34.900						
2950	35.150	35.267	34.925						
2960	35.150	35.333	34.950						
2970	35.150	35.300	34.950						
2980	35.150	35.333	34.950						
2990	35.175	35.333	34.975						
3000	35.150	35.367	34.975						
3010	35.200	35.367	34.975						
3020	35.175	35.400	35.000						
3030	35.225	35.400	35.025						
3040	35.250	35.400	35.050						
3050	35.250	35.433	35.050						
3060	35.300	35.433	35.100						
3070	35.325	35.400	35.100						
3080	35.325	35.467	35.200						
3090	35.350	35.467	35.125						
3100	35.400	35.500	35.175						
3110	35.400	35.500	35.200						
3120	35.425	35.500	35.200						
3130	35.500	35.500	35.250						
3140	35.500	35.533	35.250						
3150	35.500	35.567	35.275						
3160	35.575	35.600	35.325						
3170	35.575	35.600	35.350						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
3180	35.600	35.600	35.425						
3190	35.625	35.600	35.400						
3200	35.600	35.667	35.425						
3210	35.675	35.700	35.450						
3220	35.725	35.700	35.550						
3230	35.775	35.700	35.475						
3240	35.800	35.700	35.525						
3250	35.800	35.800	35.525						
3260	35.850	35.833	35.575						
3270	35.850	35.800	35.575						
3280	35.900	35.800	35.575						
3290	35.950	35.800	35.625						
3300	35.950	35.833	35.650						
3310	36.000	35.933	35.650						
3320	36.025	36.000	35.675						
3330	36.000	35.900	35.750						
3340	36.050	35.967	35.750						
3350	36.075	36.000	35.750						
3360	36.175	36.067	35.775						
3370	36.150	36.067	35.850						
3380	36.225	36.100	35.850						
3390	36.175	36.133	35.875						
3400	36.275	36.133	35.875						
3410	36.250	36.167	35.900						
3420	36.350	36.233	35.975						

**Lampiran 11** : Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Silika

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
10	31.125	31.200	31.225	31.200	31.133	31.067	31.100	31.200	31.267
20	31.150	31.225	31.225	31.200	31.267	31.100	31.250	31.200	31.500
30	31.175	31.325	31.250	31.300	31.367	31.233	31.350	31.400	31.733
40	31.175	31.325	31.250	31.400	31.500	31.367	31.650	31.600	32.100
50	31.250	31.375	31.250	31.600	31.633	31.500	32.000	31.800	32.400
60	31.350	31.400	31.300	31.700	31.800	31.633	32.250	32.000	32.633
70	31.300	31.400	31.325	31.800	31.900	31.800	32.600	32.300	33.000
80	31.325	31.475	31.325	31.900	32.100	31.967	32.900	32.500	33.233



Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
90	31.350	31.500	31.350	32.100	32.300	32.033	33.200	32.700	33.533
100	31.425	31.575	31.400	32.200	32.433	32.167	33.550	33.000	33.867
110	31.400	31.600	31.425	32.400	32.533	32.300	33.900	33.300	34.200
120	31.425	31.625	31.425	32.500	32.767	32.467	34.350	33.500	34.400
130	31.525	31.675	31.475	32.600	32.933	32.600	34.650	33.800	34.700
140	31.550	31.675	31.500	32.800	33.067	32.800	34.950	34.000	35.067
150	31.600	31.750	31.500	32.900	33.167	32.867	35.150	34.300	35.367
160	31.625	31.675	31.550	33.000	33.333	33.033	35.500	34.500	35.667
170	31.650	31.775	31.575	33.200	33.533	33.167	35.800	34.800	35.967
180	31.675	31.850	31.600	33.400	33.700	33.300	36.000	35.000	36.200
190	31.750	31.875	31.600	33.500	33.833	33.467	36.250	35.300	36.533
200	31.750	31.875	31.600	33.600	33.967	33.600	36.500	35.500	36.800
210	31.750	31.925	31.650	33.800	34.100	33.800	36.700	35.800	37.000
220	31.850	31.975	31.675	33.900	34.300	33.867	36.950	36.000	37.233
230	31.850	31.975	31.700	34.000	34.400	34.000	37.200	36.200	37.467
240	31.875	32.000	31.700	34.200	34.567	34.133	37.450	36.400	37.767
250	31.900	32.025	31.750	34.300	34.667	34.267	37.700	36.600	37.967
260	31.900	32.075	31.775	34.400	34.867	34.467	37.950	36.800	38.200
270	31.975	32.100	31.775	34.600	35.000	34.533	38.250	36.900	38.467
280	32.000	32.100	31.775	34.700	35.100	34.633	38.600	37.100	38.667
290	31.950	32.150	31.850	34.800	35.267	34.767	39.000	37.300	38.867
300	32.025	32.175	31.850	34.900	35.367	34.900	39.300	37.400	39.067
310	32.075	32.200	31.875	35.000	35.467	35.067	39.500	37.600	39.267
320	32.150	32.200	31.875	35.200	35.667	35.167	39.750	37.800	39.467
330	32.125	32.250	31.875	35.300	35.767	35.267	40.150	37.900	39.600
340	32.200	32.275	31.950	35.400	35.967	35.400	40.250	38.100	39.867
350	32.200	32.300	31.875	35.500	36.100	35.500	40.400	38.200	40.000
360	32.225	32.300	31.975	35.600	36.200	35.600	40.550	38.300	40.200
370	32.275	32.325	31.975	35.800	36.333	35.733	40.700	38.500	40.400
380	32.300	32.375	32.025	35.900	36.433	35.767	41.000	38.600	40.533
390	32.325	32.375	31.975	36.000	36.600	35.933	41.100	38.800	40.667
400	32.375	32.400	32.000	36.100	36.700	36.033	41.350	39.000	40.867
410	32.400	32.450	32.025	36.200	36.800	36.133	41.600	39.100	41.033
420	32.425	32.450	32.025	36.300	36.900	36.200	41.700	39.300	41.167
430	32.450	32.475	32.075	36.400	37.000	36.300	41.900	39.400	41.300
440	32.475	32.500	32.100	36.500	37.067	36.433	42.050	39.600	41.500
450	32.400	32.500	32.125	36.600	37.167	36.433	42.250	39.800	41.667
460	32.500	32.575	32.125	36.700	37.200	36.533	42.450	40.000	41.800
470	32.550	32.575	32.150	36.800	37.300	36.667	42.650	40.200	42.000

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
480	32.600	32.575	32.175	36.900	37.333	36.767	42.750	40.400	42.100
490	32.650	32.625	32.225	37.100	37.467	36.967	43.050	40.800	42.400
500	32.675	32.675	32.225	37.100	37.500	36.967	43.200	41.000	42.567
510	32.675	32.700	32.250	37.200	37.533	37.067	43.450	41.200	42.700
520	32.700	32.675	32.275	37.300	37.533	37.133	43.600	41.400	42.900
530	32.775	32.675	32.325	37.300	37.600	37.267	43.750	41.600	43.067
540	32.775	32.700	32.325	37.500	37.567	37.300	43.950	41.800	43.167
550	32.775	32.775	32.350	37.500	37.700	37.367	44.100	41.900	43.267
560	32.850	32.775	32.350	37.600	37.767	37.433	44.250	42.000	43.433
570	32.875	32.775	32.375	37.600	37.833	37.500	44.450	42.100	43.533
580	32.825	32.875	32.400	37.700	37.933	37.567	44.650	42.000	43.700
590	32.875	32.875	32.350	37.800	38.067	37.633	44.950	42.200	43.833
600	32.975	32.850	32.450	37.800	38.067	37.700	45.300	42.500	44.000
610	32.975	32.875	32.375	37.900	38.067	37.767	45.600	42.600	44.200
620	32.950	32.875	32.450	38.000	38.133	37.833	45.750	42.500	44.233
630	32.975	32.875	32.450	38.000	38.167	37.933	45.800	42.500	44.400
640	32.975	32.975	32.500	38.100	38.267	37.933	46.000	42.800	44.533
650	33.000	32.950	32.550	38.200	38.267	37.967	46.150	42.900	44.633
660	33.125	33.025	32.475	38.300	38.333	38.067	46.350	43.300	44.800
670	33.125	33.075	32.550	38.300	38.367	38.100	46.500	43.500	44.900
680	33.150	33.075	32.525	38.400	38.433	38.200	46.650	43.800	45.033
690	33.175	33.075	32.525	38.500	38.533	38.300	46.850	43.800	45.167
700	33.175	33.075	32.550	38.600	38.600	38.300	47.050	44.100	45.300
710	33.200	33.075	32.625	38.700	38.667	38.367	47.200	44.600	45.433
720	33.200	33.075	32.625	38.700	38.767	38.467	47.400	45.000	45.633
730	33.175	33.100	32.575	38.800	38.833	38.533	47.500	45.200	45.667
740	33.275	33.150	32.600	38.800	38.967	38.600	47.650	45.500	45.800
750	33.225	33.175	32.625	38.900	39.033	38.667	47.900	45.700	45.933
760	33.300	33.175	32.625	38.900	39.067	38.767	48.050	46.000	46.133
770	33.225	33.200	32.625	39.000	39.100	38.800	48.200	46.200	46.200
780	33.275	33.175	32.650	39.100	39.133	38.867	48.450	46.500	46.333
790	33.275	33.175	32.650	39.200	39.267	38.967	48.350	46.800	46.467
800	33.375	33.250	32.650	39.200	39.300	39.033	48.500	46.900	46.567
810	33.425	33.250	32.675	39.300	39.367	39.100	48.700	47.000	46.733
820	33.425	33.250	32.725	39.300	39.367	39.167	48.800	47.100	46.933
830	33.400	33.275	32.725	39.400	39.333	39.233	48.950	47.200	47.033
840	33.450	33.300	32.725	39.400	39.433	39.267	49.050	47.300	47.200
850	33.425	33.300	32.725	39.500	39.533	39.367	49.200	47.500	47.333
860	33.425	33.300	32.725	39.600	39.567	39.367	49.400	47.600	47.467

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
870	33.450	33.350	32.725	39.600	39.900	39.467	49.600	47.700	47.600
880	33.550	33.350	32.725	39.700	39.833	39.600	49.750	47.800	47.800
890	33.525	33.375	32.800	39.800	40.133	39.633	50.000	48.000	47.967
900	33.625	33.375	32.825	39.800	40.200	39.733	50.150	48.100	48.100
910	33.525	33.400	32.825	39.900	40.200	39.767	50.300	48.300	48.300
920	33.600	33.400	32.825	39.900	40.300	39.933	50.350	48.400	48.433
930	33.600	33.425	32.825	40.000	40.567	39.933	50.800	48.700	48.600
940	33.625	33.400	32.825	40.000	40.633	40.000	50.900	48.800	48.833
950	33.625	33.425	32.825	40.100	40.667	40.100	51.150	49.000	49.000
960	33.650	33.450	32.850	40.200	40.767	40.167	51.200	49.300	49.200
970	33.700	33.500	32.925	40.300	40.867	40.300	51.800	49.800	49.567
980	33.725	33.500	32.950	40.400	40.933	40.400	52.100	50.000	49.767
990	33.725	33.500	32.925	40.400	40.967	40.400	52.300	50.200	49.967
1000	33.725	33.500	32.925	40.400	41.067	40.467	52.600	50.400	50.167
1010	33.750	33.500	32.925	40.500	41.133	40.533	52.850	50.600	50.367
1020	33.800	33.550	32.950	40.500	41.200	40.567	53.050	50.900	50.600
1030	33.800	33.525	32.975	40.600	41.200	40.600	53.350	51.500	50.767
1040	33.825	33.550	33.000	40.700	41.300	40.667	53.500	51.500	50.967
1050	33.800	33.600	33.000	40.800	41.333	40.667	53.700	51.600	51.167
1060	33.825	33.600	33.025	40.800	41.333	40.767	53.850	51.700	51.400
1070	33.825	33.600	33.025	40.900	41.400	40.833	53.750	52.000	51.600
1080	33.875	33.600	33.025	40.900	41.500	40.900	54.050	52.100	51.767
1090	33.900	33.625	33.025	41.000	41.500	40.933			
1100	33.900	33.625	33.050	41.000	41.633	41.000			
1110	33.925	33.675	33.050	41.100	41.700	41.067			
1120	33.925	33.700	33.125	41.100	41.667	41.200			
1130	33.975	33.700	33.075	41.200	41.767	41.300			
1140	33.975	33.700	33.150	41.200	41.833	41.333			
1150	33.975	33.700	33.150	41.200	41.833	41.667			
1160	34.000	33.700	33.100	41.200	41.933	41.733			
1170	34.025	33.750	33.125	41.400	42.000	41.733			
1180	34.050	33.775	33.125	41.400	42.067	41.800			
1190	34.050	33.775	33.125	41.400	42.133	41.833			
1200	34.050	33.775	33.150	41.400	42.133	41.867			
1210	34.075	33.800	33.150	41.500	42.233	41.967			
1220	34.075	33.800	33.200	41.600	42.300	41.967			
1230	34.075	33.800	33.150	41.700	42.367	42.033			
1240	34.125	33.850	33.250	41.700	42.467	42.033			
1250	34.125	33.875	33.200	41.800	42.467	42.033			

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
1260	34.125	33.875	33.225	41.800	42.467	42.167			
1270	34.150	33.900	33.250	41.900	42.600	42.167			
1280	34.175	33.900	33.250	41.900	42.700	42.200			
1290	34.250	33.900	33.250	42.000	42.700	42.267			
1300	34.175	33.900	33.275	42.000	42.700	42.333			
1310	34.225	33.925	33.375	42.100	42.767	42.300			
1320	34.225	33.925	33.300	42.200	42.867	42.400			
1330	34.225	33.925	33.300	42.300	42.900	42.467			
1340	34.225	33.975	33.325	42.300	43.067	42.500			
1350	34.300	33.975	33.325	42.400	43.133	42.567			
1360	34.300	34.000	33.350	42.400	43.133	42.600			
1370	34.300	34.000	33.350	42.500	43.233	42.667			
1380	34.300	34.000	33.375	42.600	43.300	42.733			
1390	34.325	34.000	33.375	42.700	43.367	42.667			
1400	34.375	34.025	33.400	42.700	43.467	42.767			
1410	34.400	34.000	33.425	42.800	43.500	42.800			
1420	34.400	34.050	33.400	42.900	43.600	42.867			
1430	34.400	34.050	33.425	43.000	43.700	42.933			
1440	34.425	34.150	33.450	43.200	43.900	43.033			
1450	34.475	34.100	33.425	43.300	43.933	43.033			
1460	34.550	34.150	33.450	43.300	43.867	43.000			
1470	34.475	34.100	33.450	43.400	43.833	43.133			
1480	34.475	34.100	33.450	43.500	43.733	43.200			
1490	34.500	34.200	33.450	43.600	43.700	43.200			
1500	34.525	34.150	33.500	43.700	43.767	43.167			
1510	34.575	34.150	33.525	43.900	43.800	43.300			
1520	34.575	34.250	33.525	44.000	43.833	43.300			
1530	34.575	34.175	33.525	44.100	43.900	43.367			
1540	34.600	34.175	33.525	44.200	43.967	43.300			
1550	34.600	34.275	33.525	44.300	44.000	43.433			
1560	34.625	34.225	33.525	44.500	44.067	43.400			
1570	34.625	34.250	33.525	44.600	44.167	43.400			
1580	34.650	34.325	33.550	44.700	44.233	43.433			
1590	34.650	34.250	33.550	44.800	44.267	43.533			
1600	34.675	34.250	33.600	44.900	44.300	43.600			
1610	34.675	34.350	33.625	45.100	44.367	43.567			
1620	34.675	34.275	33.625	45.200	44.433	43.533			
1630	34.725	34.300	33.625	45.300	44.500	43.600			
1640	34.725	34.300	33.650	45.300	44.567	43.633			

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
1650	34.725	34.325	33.650	45.500	44.633	43.767			
1660	34.750	34.325	33.675	45.600	44.667	43.833			
1670	34.750	34.325	33.675	45.700	44.733	43.833			
1680	34.750	34.325	33.700	45.800	44.800	44.000			
1690	34.775	34.350	33.675	45.900	44.800	44.067			
1700	34.775	34.425	33.700	46.000	44.867	44.100			
1710	34.800	34.350	33.700	46.100	44.933	44.167			
1720	34.800	34.450	33.700						
1730	34.800	34.450	33.700						
1740	34.800	34.400	33.725						
1750	34.850	34.425	33.700						
1760	34.850	34.425	33.725						
1770	34.850	34.475	33.700						
1780	34.875	34.450	33.725						
1790	34.875	34.450	33.725						
1800	34.900	34.450	33.750						
1810	34.900	34.525	33.725						
1820	34.925	34.525	33.750						
1830	34.900	34.550	33.775						
1840	34.925	34.525	33.775						
1850	34.925	34.600	33.800						
1860	34.975	34.600	33.800						
1870	34.950	34.625	33.800						
1880	34.950	34.550	33.800						
1890	34.975	34.550	33.800						
1900	35.000	34.650	33.800						
1910	34.975	34.625	33.850						
1920	35.000	34.625	33.825						
1930	35.025	34.575	33.875						
1940	35.025	34.650	33.875						
1950	35.025	34.650	33.875						
1960	35.025	34.625	33.875						
1970	35.025	34.650	33.900						
1980	35.025	34.675	33.875						
1990	35.050	34.650	33.900						
2000	35.125	34.675	33.900						
2010	35.075	34.725	33.900						
2020	35.100	34.725	33.925						
2030	35.100	34.650	33.925						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2040	35.125	34.725	33.925						
2050	35.125	34.675	33.925						
2060	35.125	34.725	33.925						
2070	35.175	34.750	33.950						
2080	35.175	34.775	33.925						
2090	35.200	34.750	33.925						
2100	35.175	34.800	33.950						
2110	35.175	34.800	33.975						
2120	35.175	34.825	33.950						
2130	35.225	34.825	33.975						
2140	35.225	34.825	34.000						
2150	35.250	34.825	34.000						
2160	35.250	34.825	33.975						
2170	35.275	34.850	34.025						
2180	35.275	34.850	34.025						
2190	35.300	34.825	34.025						
2200	35.300	34.925	34.025						
2210	35.325	34.925	34.050						
2220	35.325	34.925	34.050						
2230	35.350	34.925	34.050						
2240	35.325	34.925	34.050						
2250	35.350	34.975	34.075						
2260	35.350	34.925	34.050						
2270	35.375	35.000	34.100						
2280	35.400	34.975	34.125						
2290	35.400	35.000	34.125						
2300	35.400	35.025	34.125						
2310	35.425	35.025	34.125						
2320	35.425	35.025	34.150						
2330	35.425	35.050	34.150						
2340	35.450	35.075	34.150						
2350	35.450	35.075	34.125						
2360	35.525	35.075	34.175						
2370	35.525	35.100	34.175						
2380	35.525	35.125	34.200						
2390	35.525	35.150	34.200						
2400	35.550	35.175	34.250						
2410	35.575	35.175	34.250						
2420	35.600	35.150	34.250						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2430	35.600	35.200	34.250						
2440	35.625	35.225	34.275						
2450	35.625	35.250	34.275						
2460	35.650	35.275	34.300						
2470	35.650	35.275	34.300						
2480	35.650	35.300	34.325						
2490	35.650	35.325	34.350						
2500	35.650	35.350	34.325						
2510	35.675	35.350	34.350						
2520	35.700	35.350	34.375						
2530	35.700	35.375	34.400						
2540	35.725	35.400	34.400						
2550	35.750	35.400	34.400						
2560	35.775	35.400	34.400						
2570	35.800	35.450	34.450						
2580	35.775	35.450	34.475						
2590	35.825	35.450	34.475						
2600	35.825	35.500	34.475						
2610	35.875	35.500	34.475						
2620	35.875	35.500	34.525						
2630	35.950	35.475	34.500						
2640	35.925	35.550	34.525						
2650	35.925	35.550	34.550						
2660	36.025	35.575	34.575						
2670	35.975	35.550	34.575						
2680	36.025	35.625	34.575						
2690	36.000	35.625	34.575						
2700	36.025	35.650	34.600						
2710	36.025	35.675	34.600						
2720	36.125	35.675	34.625						
2730	36.075	35.725	34.625						
2740	36.075	35.725	34.650						
2750	36.075	35.725	34.650						
2760	36.100	35.750	34.675						
2770	36.125	35.825	34.700						
2780	36.125	35.825	34.700						
2790	36.150	35.825	34.700						
2800	36.225	35.825	34.725						
2810	36.225	35.850	34.725						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2820	36.200	35.850	34.725						
2830	36.200	35.875	34.775						
2840	36.200	35.900	34.800						
2850	36.225	35.925	34.800						
2860	36.275	35.950	34.800						
2870	36.275	35.975	34.825						
2880	36.275	35.950	34.850						
2890	36.375	36.025	34.875						
2900	36.300	36.050	34.875						
2910	36.400	36.050	34.900						
2920	36.375	36.050	34.900						
2930	36.425	36.100	34.900						
2940	36.375	36.050	34.900						
2950	36.450	36.125	34.925						
2960	36.475	36.150	34.950						
2970	36.425	36.175	34.950						
2980	36.500	36.200	34.950						
2990	36.500	36.225	34.975						
3000	36.475	36.225	34.975						
3010	36.550	36.275	34.975						
3020	36.500	36.300	35.000						
3030	36.600	36.325	35.025						
3040	36.600	36.350	35.050						
3050	36.600	36.375	35.050						
3060	36.575	36.400	35.100						
3070	36.650	36.375	35.100						
3080	36.625	36.475	35.200						
3090	36.700	36.475	35.125						
3100	36.725	36.500	35.175						
3110	36.750	36.550	35.200						
3120	36.750	36.550	35.200						
3130	36.700	36.500	35.250						
3140	36.800	36.600	35.250						
3150	36.850	36.575	35.275						
3160	36.850	36.650	35.325						
3170	36.800	36.600	35.350						
3180	36.875	36.700	35.425						
3190	36.900	36.675	35.400						
3200	36.925	36.775	35.425						



Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
3210	36.900	36.800	35.450						
3220	36.900	36.750	35.550						
3230	37.000	36.850	35.475						
3240	37.000	36.850	35.525						
3250	37.050	36.825	35.525						
3260	37.100	36.925	35.575						
3270	37.125	36.950	35.575						
3280	37.125	36.950	35.575						
3290	37.125	36.950	35.625						
3300	37.200	37.050	35.650						
3310	37.225	37.050	35.650						
3320	37.175	37.125	35.675						
3330	37.225	37.150	35.750						
3340	37.300	37.150	35.750						
3350	37.325	37.250	35.750						
3360	37.325	37.200	35.775						
3370	37.425	37.300	35.850						
3380	37.375	37.325	35.850						
3390	37.475	37.375	35.875						
3400	37.450	37.450	35.875						
3410	37.475	37.475	35.900						
3420	37.550	37.500	35.975						

**Lampiran 12 :** Tabel Hasil Pengujian Baterai dengan Sistem PCM Komposit Tembaga

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
10	31.150	31.050	31.075	31.250	31.300	31.250	31.167	31.150	31.133
20	31.125	31.025	31.075	31.300	31.400	31.700	31.300	31.300	31.233
30	31.150	31.075	31.075	31.400	31.467	31.800	31.500	31.550	31.400
40	31.150	31.125	31.125	31.600	31.567	31.900	31.733	31.850	31.667
50	31.175	31.050	31.150	31.700	31.700	32.000	32.033	32.250	32.067
60	31.175	31.050	31.100	31.850	31.800	32.200	32.367	32.550	32.267
70	31.250	31.175	31.200	31.950	31.933	32.250	32.667	32.950	32.567
80	31.275	31.200	31.175	32.000	32.067	32.450	32.967	33.250	32.900
90	31.325	31.225	31.200	32.200	32.200	32.550	33.300	33.650	33.100
100	31.350	31.250	31.225	32.300	32.300	32.700	33.633	33.950	33.433
110	31.375	31.275	31.300	32.350	32.400	32.800	33.900	34.250	33.733

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
120	31.400	31.300	31.300	32.500	32.567	32.900	34.267	34.550	33.967
130	31.475	31.300	31.300	32.600	32.667	33.000	34.567	34.850	34.167
140	31.475	31.325	31.325	32.750	32.800	33.100	34.867	35.100	34.467
150	31.525	31.350	31.400	32.850	32.933	33.250	35.100	35.450	34.733
160	31.600	31.400	31.425	32.950	33.067	33.350	35.433	35.750	35.000
170	31.600	31.400	31.400	33.150	33.133	33.450	35.767	36.000	35.233
180	31.600	31.450	31.425	33.150	33.300	33.550	35.967	36.400	35.467
190	31.650	31.450	31.425	33.350	33.367	33.650	36.167	36.600	35.733
200	31.700	31.475	31.450	33.450	33.467	33.750	36.400	36.900	35.967
210	31.725	31.500	31.475	33.550	33.600	33.800	36.700	37.150	36.167
220	31.750	31.575	31.500	33.600	33.733	33.950	36.900	37.400	36.433
230	31.800	31.550	31.525	33.700	33.833	34.050	37.067	37.650	36.600
240	31.800	31.550	31.575	33.900	34.033	34.150	37.300	37.950	36.867
250	31.875	31.650	31.575	34.000	34.067	34.250	37.467	38.150	37.067
260	31.975	31.575	31.600	34.100	34.167	34.350	37.667	38.450	37.233
270	31.900	31.650	31.625	34.200	34.300	34.450	37.833	38.650	37.500
280	32.000	31.725	31.675	34.300	34.400	34.550	38.000	38.800	37.667
290	32.000	31.750	31.700	34.400	34.567	34.650	38.200	39.000	37.800
300	32.000	31.675	31.700	34.500	34.667	34.750	38.400	39.300	38.067
310	32.050	31.725	31.725	34.600	34.767	34.800	38.567	39.500	38.233
320	32.100	31.750	31.775	34.800	34.867	34.900	38.733	39.700	38.433
330	32.100	31.750	31.775	34.800	34.967	35.000	38.867	39.950	38.600
340	32.150	31.850	31.825	35.000	35.033	35.100	39.067	40.200	38.700
350	32.200	31.800	31.825	35.000	35.167	35.200	39.200	40.400	38.900
360	32.200	31.875	31.875	35.150	35.267	35.300	39.333	40.700	39.100
370	32.225	31.925	31.900	35.250	35.367	35.400	39.500	40.950	39.300
380	32.300	31.950	31.900	35.350	35.467	35.400	39.667	41.100	39.367
390	32.300	31.950	31.925	35.450	35.567	35.500	39.733	41.300	39.500
400	32.325	31.950	32.000	35.500	35.667	35.600	39.900	41.500	39.667
410	32.375	32.025	32.000	35.600	35.767	35.700	40.067	41.650	39.800
420	32.400	32.050	32.000	35.750	35.833	35.800	40.200	41.800	39.967
430	32.425	32.050	32.025	35.850	35.933	35.800	40.367	42.000	40.100
440	32.450	32.100	32.075	35.850	35.967	35.900	40.500	42.100	40.333
450	32.500	32.125	32.075	36.000	36.067	36.000	40.667	42.300	40.367
460	32.525	32.125	32.100	36.000	36.167	36.050	40.800	42.400	40.600
470	32.550	32.150	32.125	36.150	36.267	36.100	40.967	42.550	40.767
480	32.625	32.175	32.150	36.200	36.333	36.200	41.133	42.650	40.833
490	32.625	32.225	32.200	36.400	36.433	36.300	41.433	42.800	41.167
500	32.725	32.225	32.200	36.500	36.533	36.400	41.600	43.100	41.233

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
510	32.625	32.275	32.200	36.500	36.567	36.400	41.767	43.250	41.367
520	32.725	32.325	32.250	36.550	36.633	36.500	41.900	43.350	41.633
530	32.750	32.325	32.300	36.700	36.800	36.600	42.067	43.450	41.667
540	32.775	32.325	32.300	36.800	36.800	36.650	42.267	43.600	41.800
550	32.825	32.325	32.300	36.850	36.933	36.700	42.433	43.750	41.967
560	32.800	32.350	32.300	36.900	36.933	36.700	42.533	43.850	42.167
570	32.875	32.400	32.400	36.950	37.033	36.800	42.733	44.100	42.267
580	32.925	32.425	32.400	37.100	37.067	36.950	42.933	44.250	42.333
590	32.850	32.425	32.400	37.100	37.133	36.900	43.100	44.300	42.467
600	32.950	32.425	32.400	37.250	37.233	37.050	43.267	44.550	42.600
610	32.925	32.425	32.500	37.250	37.267	37.100	43.467	44.750	42.733
620	33.000	32.475	32.400	37.400	37.333	37.150	43.667	44.950	42.867
630	33.025	32.525	32.425	37.400	37.433	37.250	43.867	45.050	43.000
640	33.050	32.525	32.500	37.500	37.433	37.250	44.067	44.750	43.133
650	33.075	32.525	32.500	37.500	37.533	37.350	44.267	44.850	43.300
660	33.125	32.550	32.600	37.600	37.600	37.400	44.433	44.850	43.333
670	33.150	32.575	32.500	37.700	37.667	37.450	44.633	45.000	43.467
680	33.150	32.575	32.525	37.800	37.733	37.450	44.833	45.050	43.567
690	33.200	32.625	32.550	37.900	37.800	37.550	45.033	45.150	43.700
700	33.150	32.625	32.600	37.950	37.867	37.550	45.200	45.250	43.800
710	33.200	32.625	32.600	38.000	37.933	37.650	45.400	45.300	43.900
720	33.250	32.675	32.600	38.100	38.000	37.750	45.600	45.400	44.033
730	33.275	32.750	32.600	38.150	38.067	37.750	45.833	45.500	44.033
740	33.275	32.700	32.600	38.200	38.067	37.850	46.000	45.600	44.200
750	33.250	32.725	32.650	38.300	38.167	37.950	46.167	45.700	44.300
760	33.250	32.725	32.700	38.350	38.233	37.950	46.333	45.850	44.433
770	33.300	32.800	32.700	38.400	38.300	38.050	46.533	45.900	44.533
780	33.350	32.750	32.700	38.500	38.367	38.150	46.667	46.000	44.633
790	33.350	32.775	32.700	38.500	38.367	38.250	46.833	46.150	44.733
800	33.350	32.775	32.725	38.600	38.400	38.200	47.000	46.300	44.833
810	33.350	32.775	32.750	38.650	38.533	38.250	47.133	46.350	44.933
820	33.425	32.800	32.775	38.750	38.600	38.300	47.300	46.400	45.067
830	33.450	32.825	32.800	38.750	38.600	38.350	47.467	46.550	45.167
840	33.450	32.825	32.800	38.800	38.633	38.450	47.600	46.650	45.267
850	33.450	32.850	32.825	38.850	38.700	38.550	47.700	46.750	45.400
860	33.450	32.875	32.850	38.900	38.733	38.550	47.900	46.850	45.533
870	33.450	32.875	32.875	38.950	38.800	38.550	48.000	47.000	45.633
880	33.525	32.875	32.875	39.050	38.833	38.650	48.133	47.050	45.733
890	33.550	32.875	32.875	39.150	38.900	38.700	48.233	47.100	45.867

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
900	33.550	32.875	32.900	39.150	38.933	38.750	48.367	47.350	45.967
910	33.550	32.975	32.875	39.200	39.000	38.800	48.467	47.400	46.100
920	33.550	32.975	32.900	39.250	39.033	38.850	48.567	47.550	46.200
930	33.550	32.925	32.875	39.300	39.100	38.900	48.700	47.700	46.367
940	33.550	32.975	32.950	39.350	39.133	38.950	48.767	47.800	46.467
950	33.625	33.050	32.975	39.400	39.200	39.000	48.833	47.900	46.600
960	33.650	32.975	32.975	39.450	39.267	39.050	49.100	48.050	46.700
970	33.650	32.975	32.975	39.600	39.333	39.100	49.400	48.200	46.900
980	33.650	33.075	32.950	39.600	39.433	39.200	49.433	48.250	47.067
990	33.675	33.075	33.050	39.650	39.433	39.200	49.500	48.550	47.167
1000	33.675	33.075	32.975	39.750	39.533	39.250	49.567	48.650	47.300
1010	33.725	33.075	33.075	39.850	39.500	39.300	49.667	48.750	47.400
1020	33.775	33.125	33.025	39.850	39.533	39.300	49.800	48.950	47.567
1030	33.750	33.150	33.025	39.850	39.633	39.400	49.967	49.000	47.700
1040	33.775	33.175	33.125	39.950	39.700	39.400	50.067	49.150	47.800
1050	33.775	33.175	33.125	39.950	39.733	39.500	50.200	49.300	47.933
1060	33.800	33.175	33.075	40.100	39.700	39.500	50.333	49.500	47.967
1070	33.800	33.175	33.075	40.150	39.833	39.600	50.500	49.550	48.133
1080	33.800	33.175	33.075	40.100	39.800	39.600	50.767	49.800	48.233
1090	33.825	33.175	33.125	40.200	39.867	39.650			
1100	33.825	33.200	33.125	40.200	39.900	39.700			
1110	33.825	33.225	33.125	40.300	40.000	39.750			
1120	33.850	33.225	33.125	40.300	40.000	39.800			
1130	33.850	33.275	33.175	40.400	40.100	39.800			
1140	33.850	33.275	33.175	40.450	40.100	39.900			
1150	33.875	33.275	33.200	40.500	40.167	39.950			
1160	33.900	33.275	33.225	40.550	40.200	39.950			
1170	33.925	33.275	33.225	40.600	40.233	40.000			
1180	33.950	33.275	33.225	40.700	40.300	40.050			
1190	33.950	33.300	33.225	40.750	40.367	40.100			
1200	33.950	33.300	33.275	40.750	40.400	40.150			
1210	33.950	33.325	33.275	40.850	40.433	40.250			
1220	33.950	33.375	33.275	40.900	40.467	40.250			
1230	33.950	33.375	33.275	40.950	40.533	40.300			
1240	34.000	33.375	33.300	40.950	40.633	40.350			
1250	34.025	33.350	33.325	40.950	40.667	40.450			
1260	34.025	33.375	33.325	41.050	40.700	40.450			
1270	34.025	33.375	33.325	41.150	40.733	40.550			
1280	34.025	33.400	33.350	41.200	40.800	40.550			

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
1290	34.025	33.475	33.350	41.250	40.833	40.650			
1300	34.025	33.425	33.375	41.300	40.900	40.650			
1310	34.125	33.450	33.350	41.350	40.967	40.750			
1320	34.125	33.525	33.375	41.400	41.000	40.800			
1330	34.125	33.450	33.375	41.450	41.100	40.850			
1340	34.125	33.475	33.400	41.500	41.100	40.900			
1350	34.125	33.525	33.425	41.550	41.100	40.950			
1360	34.125	33.550	33.425	41.650	41.200	41.000			
1370	34.125	33.500	33.425	41.650	41.300	41.050			
1380	34.150	33.500	33.450	41.750	41.333	41.100			
1390	34.150	33.600	33.450	41.750	41.367	41.200			
1400	34.175	33.600	33.475	41.850	41.367	41.250			
1410	34.200	33.625	33.475	41.900	41.433	41.300			
1420	34.200	33.550	33.525	41.950	41.567	41.350			
1430	34.200	33.575	33.500	42.000	41.567	41.400			
1440	34.225	33.600	33.525	42.150	41.733	41.500			
1450	34.225	33.675	33.550	42.200	41.767	41.600			
1460	34.250	33.625	33.575	42.250	41.767	41.700			
1470	34.250	33.700	33.600	42.300	41.900	41.700			
1480	34.250	33.725	33.600	42.350	41.867	41.800			
1490	34.300	33.700	33.600	42.450	41.933	41.800			
1500	34.300	33.700	33.600	42.550	42.000	41.900			
1510	34.300	33.725	33.525	42.600	42.067	41.950			
1520	34.300	33.725	33.600	42.600	42.067	42.000			
1530	34.350	33.725	33.625	42.650	42.167	42.050			
1540	34.325	33.750	33.600	42.750	42.200	42.100			
1550	34.350	33.775	33.675	42.750	42.267	42.150			
1560	34.350	33.725	33.600	42.850	42.333	42.250			
1570	34.375	33.775	33.700	42.950	42.467	42.300			
1580	34.400	33.775	33.700	43.000	42.433	42.400			
1590	34.400	33.800	33.625	43.000	42.500	42.450			
1600	34.400	33.800	33.625	43.150	42.567	42.500			
1610	34.400	33.825	33.725	43.100	42.633	42.550			
1620	34.425	33.825	33.725	43.300	42.733	42.550			
1630	34.425	33.825	33.725	43.300	42.767	42.650			
1640	34.450	33.825	33.725	43.400	42.800	42.700			
1650	34.475	33.875	33.750	43.400	42.867	42.800			
1660	34.475	33.875	33.750	43.500	42.933	42.850			
1670	34.500	33.875	33.775	43.550	42.967	42.850			

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
1680	34.475	33.875	33.800	43.600	43.033	42.900			
1690	34.525	33.900	33.700	43.700	43.133	43.000			
1700	34.525	33.875	33.700	43.750	43.167	43.150			
1710	34.525	33.925	33.725	43.800	43.233	43.250			
1720	34.525	33.925	33.800						
1730	34.525	33.925	33.800						
1740	34.525	33.925	33.825						
1750	34.525	33.950	33.775						
1760	34.525	33.925	33.800						
1770	34.575	33.925	33.800						
1780	34.550	33.925	33.900						
1790	34.575	33.975	33.825						
1800	34.575	33.975	33.800						
1810	34.600	33.975	33.900						
1820	34.625	33.975	33.900						
1830	34.625	33.975	33.825						
1840	34.625	33.975	33.875						
1850	34.625	34.000	33.875						
1860	34.625	34.025	33.925						
1870	34.600	34.025	33.900						
1880	34.650	34.025	33.900						
1890	34.625	34.025	33.900						
1900	34.675	34.025	33.900						
1910	34.675	34.050	34.000						
1920	34.675	34.075	34.000						
1930	34.700	34.125	33.950						
1940	34.625	34.075	33.975						
1950	34.700	34.075	33.975						
1960	34.725	34.150	33.975						
1970	34.675	34.150	33.975						
1980	34.675	34.100	34.000						
1990	34.700	34.175	34.000						
2000	34.675	34.200	34.000						
2010	34.700	34.125	34.000						
2020	34.700	34.175	34.025						
2030	34.700	34.225	34.000						
2040	34.775	34.225	34.000						
2050	34.700	34.250	34.000						
2060	34.700	34.150	34.000						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2070	34.725	34.225	34.050						
2080	34.725	34.175	34.075						
2090	34.750	34.250	34.025						
2100	34.725	34.200	34.075						
2110	34.775	34.250	34.075						
2120	34.825	34.275	34.075						
2130	34.800	34.225	34.100						
2140	34.800	34.300	34.100						
2150	34.800	34.300	34.100						
2160	34.800	34.250	34.100						
2170	34.800	34.325	34.125						
2180	34.825	34.350	34.225						
2190	34.850	34.300	34.175						
2200	34.825	34.375	34.175						
2210	34.825	34.400	34.200						
2220	34.850	34.400	34.175						
2230	34.850	34.400	34.175						
2240	34.850	34.350	34.175						
2250	34.875	34.450	34.225						
2260	34.900	34.375	34.200						
2270	34.900	34.450	34.225						
2280	34.900	34.475	34.250						
2290	34.925	34.450	34.250						
2300	34.925	34.500	34.275						
2310	34.950	34.525	34.275						
2320	34.950	34.525	34.275						
2330	35.000	34.450	34.275						
2340	35.000	34.450	34.350						
2350	35.000	34.550	34.300						
2360	35.000	34.550	34.325						
2370	35.000	34.500	34.350						
2380	35.000	34.600	34.375						
2390	35.050	34.600	34.375						
2400	35.100	34.625	34.400						
2410	35.075	34.525	34.400						
2420	35.100	34.600	34.425						
2430	35.100	34.650	34.450						
2440	35.100	34.650	34.450						
2450	35.125	34.675	34.475						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2460	35.175	34.700	34.475						
2470	35.175	34.700	34.500						
2480	35.200	34.725	34.525						
2490	35.175	34.700	34.550						
2500	35.200	34.750	34.550						
2510	35.250	34.725	34.550						
2520	35.250	34.725	34.575						
2530	35.275	34.725	34.575						
2540	35.275	34.825	34.575						
2550	35.275	34.825	34.625						
2560	35.300	34.800	34.625						
2570	35.325	34.875	34.600						
2580	35.325	34.875	34.650						
2590	35.350	34.850	34.625						
2600	35.350	34.850	34.675						
2610	35.375	34.850	34.700						
2620	35.400	34.900	34.700						
2630	35.425	34.950	34.700						
2640	35.425	34.925	34.725						
2650	35.425	35.025	34.725						
2660	35.450	34.950	34.750						
2670	35.475	35.050	34.750						
2680	35.475	34.950	34.750						
2690	35.525	34.975	34.800						
2700	35.525	34.975	34.850						
2710	35.525	35.050	34.825						
2720	35.550	35.050	34.825						
2730	35.600	35.075	34.825						
2740	35.600	35.050	34.850						
2750	35.600	35.050	34.875						
2760	35.600	35.150	34.900						
2770	35.650	35.075	34.900						
2780	35.650	35.125	34.925						
2790	35.600	35.150	34.925						
2800	35.700	35.175	35.025						
2810	35.700	35.150	34.950						
2820	35.700	35.150	34.975						
2830	35.725	35.250	35.025						
2840	35.750	35.250	35.050						



Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
2850	35.700	35.275	35.025						
2860	35.725	35.325	35.125						
2870	35.750	35.250	35.050						
2880	35.825	35.350	35.075						
2890	35.800	35.275	35.125						
2900	35.850	35.275	35.125						
2910	35.800	35.350	35.125						
2920	35.900	35.350	35.125						
2930	35.900	35.350	35.150						
2940	35.825	35.350	35.150						
2950	35.850	35.425	35.225						
2960	35.925	35.400	35.300						
2970	35.950	35.450	35.225						
2980	35.975	35.450	35.225						
2990	35.975	35.450	35.275						
3000	36.000	35.450	35.300						
3010	36.025	35.575	35.325						
3020	36.050	35.525	35.325						
3030	36.050	35.550	35.425						
3040	36.100	35.550	35.375						
3050	36.100	35.575	35.400						
3060	36.125	35.600	35.425						
3070	36.125	35.625	35.425						
3080	36.175	35.650	35.450						
3090	36.200	35.675	35.475						
3100	36.175	35.700	35.525						
3110	36.250	35.725	35.525						
3120	36.250	35.725	35.575						
3130	36.250	35.775	35.575						
3140	36.250	35.800	35.600						
3150	36.325	35.825	35.575						
3160	36.350	35.925	35.650						
3170	36.350	35.875	35.675						
3180	36.400	35.925	35.750						
3190	36.400	35.925	35.700						
3200	36.450	35.950	35.750						
3210	36.475	35.975	35.750						
3220	36.475	36.000	35.775						
3230	36.500	36.050	35.775						

Waktu (S)	Discharging Rate (1C)			Discharging Rate (2C)			Discharging Rate (3C)		
	Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)			Temperatur Rata - Rata (°C)		
	1C (3 mm)	1C (6 mm)	1C (9mm)	2C (3 mm)	2C (6 mm)	2C (9mm)	3C (3 mm)	3C (6 mm)	3C (9mm)
3240	36.525	36.050	35.825						
3250	36.575	36.075	35.850						
3260	36.575	36.100	35.875						
3270	36.600	36.150	35.900						
3280	36.700	36.150	35.925						
3290	36.675	36.175	35.950						
3300	36.675	36.200	36.000						
3310	36.725	36.300	36.025						
3320	36.775	36.275	36.100						
3330	36.825	36.300	36.100						
3340	36.825	36.350	36.150						
3350	36.850	36.400	36.175						
3360	36.925	36.400	36.200						
3370	36.925	36.450	36.250						
3380	36.925	36.500	36.275						
3390	36.950	36.525	36.350						
3400	37.025	36.600	36.375						
3410	37.050	36.600	36.400						
3420	37.075	36.675	36.475						

**Lampiran 13 :** Tabel Hasil Perhitungan Laju Kenaikan Temperatur pada Variasi C-Rate 1C dan Ketebalan PCM 3mm (°C/s)

Laju Kenaikan Temperatur pada Variasi C-Rate 1C dan Ketebalan PCM 3mm (°C/s)						
Range Waktu (s)	Aluminium 3mm (1C)	Grafit 3mm (1C)	Silica 3mm (1C)	Tembaga 3mm (1C)	PCM Murni 3mm (1C)	Natural Convection (1C)
0-100	0.0017	0.0033	0.0013	0.0020	0.0035	0.0052
100-200	0.0030	0.0033	0.0025	0.0035	0.0048	0.0083
200-300	0.0030	0.0030	0.0023	0.0030	0.0038	0.0060
300-400	0.0033	0.0033	0.0013	0.0032	0.0038	0.0060
400-500	0.0023	0.0033	0.0030	0.0040	0.0042	0.0053
500-600	0.0027	0.0023	0.0020	0.0023	0.0033	0.0063
600-700	0.0017	0.0023	0.0017	0.0020	0.0027	0.0038
700-800	0.0020	0.0023	0.0017	0.0020	0.0030	0.0045
800-900	0.0017	0.0017	0.0008	0.0020	0.0017	0.0040
900-1000	0.0020	0.0017	0.0008	0.0013	0.0018	0.0017
1000-1100	0.0010	0.0013	0.0013	0.0015	0.0020	0.0025

<b>Laju Kenaikan Temperatur pada Variasi C-Rate 1C dan Ketebalan PCM 3mm (°C/s)</b>						
<b>Range Waktu (s)</b>	<b>Aluminium 3mm (1C)</b>	<b>Grafit 3mm (1C)</b>	<b>Silica 3mm (1C)</b>	<b>Tembaga 3mm (1C)</b>	<b>PCM Murni 3mm (1C)</b>	<b>Natural Convection (1C)</b>
1100-1200	0.0010	0.0017	0.0008	0.0013	0.0013	0.0020
1200-1300	0.0010	0.0010	0.0007	0.0007	0.0017	0.0020
1300-1400	0.0020	0.0010	0.0015	0.0015	0.0013	0.0023
1400-1500	0.0003	0.0017	0.0003	0.0013	0.0015	0.0020
1500-1600	0.0010	0.0003	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
1600-1700	0.0010	0.0007	0.0005	0.0013	0.0017	0.0010
1700-1800	0.0007	0.0010	0.0005	0.0005	0.0013	0.0010
1800-1900	0.0007	0.0020	0.0005	0.0010	0.0005	0.0010
1900-2000	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	0.0005
2000-2100	0.0003	0.0000	0.0007	0.0005	0.0010	0.0005
2100-2200	0.0010	0.0010	0.0002	0.0010	0.0010	0.0008
2200-2300	0.0007	0.0010	0.0005	0.0010	0.0013	0.0010
2300-2400	0.0010	0.0017	0.0015	0.0017	0.0015	0.0013
2400-2500	0.0010	0.0010	0.0013	0.0010	0.0018	0.0017
2500-2600	0.0017	0.0017	0.0020	0.0015	0.0018	0.0025
2600-2700	0.0010	0.0017	0.0013	0.0017	0.0020	0.0023
2700-2800	0.0007	0.0017	0.0015	0.0018	0.0018	0.0033
2800-2900	0.0013	0.0013	0.0005	0.0015	0.0012	0.0027
2900-3000	0.0017	0.0020	0.0020	0.0015	0.0027	0.0023
3000-3100	0.0013	0.0027	0.0020	0.0018	0.0020	0.0025
3100-3200	0.0017	0.0020	0.0025	0.0027	0.0033	0.0038
3200-3300	0.0017	0.0030	0.0025	0.0022	0.0033	0.0052
3300-3400	0.0030	0.0040	0.0030	0.0035	0.0037	0.0048

**Lampiran 14 :** Tabel Hasil Perhitungan Laju Kenaikan Temperatur pada Variasi C-Rate 1C dan Ketebalan PCM 3mm (°C/s)

<b>Laju Kenaikan Temperatur pada Variasi C-Rate 3C dan Ketebalan PCM 9mm (°C/s)</b>						
<b>Range Waktu (s)</b>	<b>Aluminium 9mm (3C)</b>	<b>Grafit 9mm (3C)</b>	<b>Silica 9mm (3C)</b>	<b>Tembaga 9mm (3C)</b>	<b>PCM Murni 9mm (3C)</b>	<b>Natural Convection (3C)</b>
0-100	0.0213	0.0195	0.0230	0.0190	0.0210	0.0405
100-200	0.0227	0.0205	0.0253	0.0230	0.0255	0.0593
200-300	0.0180	0.0185	0.0210	0.0190	0.0215	0.0500
300-400	0.0127	0.0160	0.0160	0.0157	0.0215	0.0338
400-500	0.0147	0.0145	0.0157	0.0147	0.0175	0.0348
500-600	0.0130	0.0110	0.0137	0.0110	0.0110	0.0297
600-700	0.0160	0.0075	0.0120	0.0117	0.0115	0.0208
700-800	0.0100	0.0085	0.0103	0.0133	0.0150	0.0218

Laju Kenaikan Temperatur pada Variasi C-Rate 3C dan Ketebalan PCM 9mm (°C/s)						
Range Waktu (s)	Aluminium 9mm (3C)	Grafit 9mm (3C)	Silica 9mm (3C)	Tembaga 9mm (3C)	PCM Murni 9mm (3C)	Natural Convection (3C)
800-900	0.0103	0.0085	0.0113	0.0127	0.0150	0.0215
900-1000	0.0107	0.0105	0.0133	0.0103	0.0160	0.0188

**Lampiran 15 :** Tabel Hasil Perhitungan Densitas PCM Komposit *Solid & Liquid* antar Variasi Material *Filler*

Densitas PCM Komposit <i>Solid &amp; Liquid</i> antar Variasi Material <i>Filler</i>							
Jenis Material <i>Filler</i>	Paraffin wax Properties			Material <i>Filler</i> Properties		Densitas <i>Solid</i> PCM Komposit (kg/m3)	Densitas <i>Liquid</i> PCM Komposit (kg/m3)
	Mass fraction	Densitas <i>Solid</i> (kg/m3)	Densitas <i>Liquid</i> (kg/m3)	Mass fraction	Densitas <i>Solid</i> (kg/m3)		
Aluminium	0.7	910	790	0.3	2698	1446.4	1362.4
Grafit	0.7	910	790	0.3	2250	1312	1228
Silika	0.7	910	790	0.3	2800	1477	1393
Tembaga	0.7	910	790	0.3	8930	3316	3232

**Lampiran 16 :** Tabel Hasil Perhitungan *Specific heat* (Cp) PCM Komposit *Solid & Liquid* antar Variasi Material *Filler*

Specific heat (Cp) PCM Komposit <i>Solid &amp; Liquid</i> antar Variasi Material <i>Filler</i>												
Jenis Material <i>Filler</i>	Paraffin Wax Properties					Material <i>Filler</i> Properties			Komposit		Cp <i>Solid</i> PCM Komposit (J/KgK)	Cp <i>Liquid</i> PCM Komposit (J/KgK)
	Mass Fraction	Densitas <i>Solid</i> (kg/m3)	Densitas <i>Liquid</i> (kg/m3)	Cp <i>Solid</i> (J/KgK)	Cp <i>Liquid</i> (J/KgK)	Mass Fraction <i>filler</i>	Densitas (kg/m3)	Cp (J/KgK)	Densitas <i>Solid</i> (kg/m3)	Densitas <i>Liquid</i> (kg/m3)		
Aluminium	0.7	910	790	2000	2150	0.3	2698	900	1446.4	1362.4	1384.44	1407.38
Grafit	0.7	910	790	2000	2150	0.3	2250	707.7	1312	1228	1335.14	1357.20
Silika	0.7	910	790	2000	2150	0.3	2800	1200	1477	1393	1545.02	1577.14
Tembaga	0.7	910	790	2000	2150	0.3	8930	385	3316	3232	695.24	686.99

**Lampiran 17 :** Tabel Hasil Perhitungan Kalor Laten PCM Komposit antar Variasi Material *Filler*

Kalor Laten PCM Komposit antar Variasi Material <i>Filler</i>					
Jenis Material <i>Filler</i>	Mass fraction Wax	Densitas Wax (kg/m3)	Kalor Laten Wax (J/Kg)	Densitas Komposit (kg/m3)	Kalor Laten PCM Komposit (J/Kg)
Aluminium	0.7	910	190000	1446.4	83676.7146
Grafit	0.7	910	190000	1312	92248.4756
Silika	0.7	910	190000	1477	81943.128
Tembaga	0.7	910	190000	3316	36498.7937

**Lampiran 18 :** Tabel Hasil Perhitungan *Volume Fraction* PCM Komposit *Solid & Liquid* antar Variasi Material *Filler*

Volume Fraction Filler Setiap Variasi Material						
Jenis Material Filler	Wax		Material Filler		Voume Fraction Filler	Volume Fraction Wax
	Mass fraction	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Mass fraction	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )		
Aluminium	0.7	910	0.3	2698	<b>0.126</b>	<b>0.874</b>
Grafit	0.7	910	0.3	2250	<b>0.148</b>	<b>0.852</b>
Silika	0.7	910	0.3	2800	<b>0.122</b>	<b>0.878</b>
Tembaga	0.7	910	0.3	8930	<b>0.042</b>	<b>0.958</b>

**Lampiran 19 :** Tabel Hasil Perhitungan Konduktivitas PCM Komposit *Solid & Liquid* antar Variasi Material *Filler*

Konduktivitas PCM Komposit antar Variasi Material												
Jenis Material Filler	Volume Fraction Wax	Volume Fraction Filler( $\phi$ )	Filler Particle Size ( $\phi$ m)	Aspect Ratio of Filler Particle (A)	K pcm solid (W/mK)	K pcm liquid (w/mK)	K material filler (w/mK)	B solid	B liquid	$\psi$	K komposit solid (W/mK)	K komposit liquid (w/mK)
Aluminium	0.874	0.126	0.524	1.58	0.24	0.22	210	0.9970567	0.997302	1.2189433	<b>1.42</b>	<b>1.42</b>
Grafit	0.852	0.148	0.524	1.58	0.24	0.22	80	0.9922965	0.992936	1.2560973	<b>1.51</b>	<b>1.51</b>
Silika	0.878	0.122	0.524	1.58	0.24	0.22	1.5	0.6704981	0.692791	1.2119426	<b>1.25</b>	<b>1.26</b>
Tembaga	0.958	0.042	0.524	1.58	0.24	0.22	398	0.9984457	0.998575	1.0725426	<b>1.12</b>	<b>1.12</b>

**Lampiran 20 :** Tabel Hasil Perhitungan *Thermal Diffusivity* PCM Komposit *Solid & Liquid* antar Variasi Material *Filler*

Thermal Diffusivity PCM Komposit antar Variasi Material									
Jenis Material Filler	Densitas Solid PCM Komposit (kg/m <sup>3</sup> )	Densitas Liquid PCM Komposit (kg/m <sup>3</sup> )	Cp Solid PCM Komposit (J/KgK)	Cp Liquid PCM Komposit (J/KgK)	K komposit solid (W/mk)	K komposit liquid (W/mK)	Thermal Diffusivity Solid (m <sup>2</sup> /s)	Thermal Diffusivity Liquid (m <sup>2</sup> /s)	
Aluminium	1446.4	1362.4	1384.44	1407.38	1.42	1.42	<b>7.0731E-07</b>	<b>7.39E-07</b>	
Grafit	1312	1228	1335.14	1357.20	1.51	1.51	<b>8.6177E-07</b>	<b>9.06E-07</b>	
Silika	1477	1393	1545.02	1577.14	1.25	1.26	<b>5.4957E-07</b>	<b>5.75E-07</b>	
Tembaga	3316	3232	695.24	686.99	1.12	1.12	<b>4.8409E-07</b>	<b>5.03E-07</b>	

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Medan, 19 Maret 2003 dan merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Harapan Indah Medan, SD Pangudi Luhur Yogyakarta, SMP Marsudirini Bekasi, dan SMA Marsudirini Bekasi. Setelah lulus dari bangku SMA pada tahun 2020, penulis melanjutkan pendidikan pada jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS pada tahun 2020 dan terdaftar dengan NRP 5007201239. Dalam masa perkuliahan, penulis aktif dalam berbagai organisasi dan kegiatan, termasuk sebagai koordinator divisi Procurement & Logistics Supply Specialist dari Anargya ITS Electric Vehicle Team pada tahun 2022 hingga sekarang. Selain itu, penulis juga menjadi staf Divisi Organisasi di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) dari tahun 2021 hingga 2023. Di Departemen Teknik Mesin

Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan kepanitiaan, seperti Gerigi ITS 2021, Fucarty 2022, KDDO 2022 dan ETU 2023 & 2024. Penulis memiliki pengalaman magang di PT Kilang Pertamina Internasional pada bulan Juli hingga Agustus 2023 dan di Balai Besar Logam dan Mesin Kementerian Industri pada bulan Januari hingga Februari 2023.

Untuk informasi lebih lanjut mengenai penelitian ini beserta kritik dapat menghubungi penulis melalui email: [mikejps1933@gmail.com](mailto:mikejps1933@gmail.com)