

TUGAS AKHIR - TM234802

EKSPERIMEN DAN STUDI NUMERIK KONVEKSI PAKSA DAN NATURAL PADA BATERAI LiFePO_4 DENGAN VARIASI JARAK SEL BATERAI

MAHIB SULTAN SETIAJI

NRP 5007201170

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

2025



TUGAS AKHIR - TM234802

EKSPERIMEN DAN STUDI NUMERIK KONVEKSI PAKSA DAN NATURAL PADA BATERAI LiFePO_4 DENGAN VARIASI JARAK PADA SEL BATERAI

MAHIB SULTAN SETIAJI

NRP 5007201170

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

2025



FINAL PROJECT - TM234802

***EXPERIMENT AND NUMERICAL STUDY FORCED AND
NATURAL CONVECTION ON LiFePO_4 BATTERY WITH
CELL SPACING VARIATIONS***

MAHIB SULTAN SETIAJI

NRP 5007201170

Advisor

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

NIP 198208192012121003

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and System Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

LEMBAR PENGESAHAN

EKSPERIMEN DAN STUDI NUMERIK KONVEKSI PAKSA DAN NATURAL PADA BATERAI LiFePO₄ DENGAN VARIASI JARAK SEL BATERAI

TUGAS AKHIR

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

Oleh: **Mahib Sultan Setiaji**

NRP. 5007201170

Disetujui oleh Tim Sidang Tugas Akhir:

- | | |
|--|------------|
| 1. Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, ST, MSc, IPM, AEng | Pembimbing |
| 2. Ir. Ary Bachtiar Krishna Putra, ST, MT, Ph.D, IPM, AEng | Penguji |
| 3. Prof. Dr. Ir. Prabowo, MEng, IPU, AEng | Penguji |
| 4. Tri Vicca Kusumadewi, S.T., M.Sc. | Penguji |

SURABAYA

JULI, 2025

APPROVAL SHEET

EXPERIMENT AND NUMERICAL STUDY FORCED AND NATURAL CONVECTION ON LiFePO₄ BATTERY WITH CELL SPACING VARIATIONS

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements

For obtaining Sarjana Teknik degree at

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Departement of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Sepuluh Nopember Institute of Technology

By:

Mahib Sultan Setiaji

NRP. 5007201170

Approved by Final Project Examiner Team:

- | | |
|---|----------|
| 1. Dr. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng | Advisor |
| 2. Prof. Dr. Ir. Prabowo, MEng, IPU, AEng | Examiner |
| 3. Ir. Ary Bachtiar Khrisna Putra, S.T., M.T., Ph.D., IPM | Examiner |
| 4. Tri Vicca Kusumadewi, S.T., M.Sc. | Examiner |

SURABAYA

JULY 2025

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP	: Mahib Sultan Setiaji / 5007201170
Program Studi	: S-1 Teknik Mesin
Dosen Pembimbing / NIP	: Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng / 198208192012121003

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul **“EKSPERIMEN DAN STUDI NUMERIK KONVEKSI PAKSA DAN NATURAL PADA BATERAI LiFePO_4 DENGAN VARIASI JARAK SEL BATERAI”** adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 17 Juli 2025

Mengetahui
Dosen Pembimbing

Mahasiswa

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

Mahib Sultan Setiaji
NRP 5007201170

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Mahib Sultan Setiaji
Departement : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Dr. Ir. Is. Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc., IPM, AEng /
198208192012121003

Hereby declare that the final project with the title of “**EXPERIMENT AND NUMERICAL STUDY FORCED AND NATURAL CONVECTION ON LiFePO₄ BATTERY WITH CELL SPACING VARIATIONS**” is the result of my own work, original, and written by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, 17 July

Acknowledged

Advisor

Student,

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

NIP. 198208192012121003

Mahib Sultan Setiaji

NRP. 5007201170

ABSTRAK

EKSPERIMEN DAN STUDI NUMERIK KONVEKSI PAKSA DAN NATURAL PADA BATERAI LiFePO_4 DENGAN VARIASI JARAK SEL BATERAI

Nama Mahasiswa / NRP : Mahib Sultan Setiaji / 5007201170
Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T, M.Sc. IPM

ABSTRAK

Karena kebutuhan energi tiap tahun bertambah, diperlukan adanya inovasi pada penggunaan energi jika ingin mencapai *net zero emission* pada tahun 2050 mendatang. Baterai adalah salah satu solusi yang sangat baik untuk mengurangi konsumsi energi yang bersumber dari minyak dan gas. Baterai memiliki salah satu kelemahan yaitu rentang suhu kerja yang cukup pendek. Maka dari itu pentingnya menjaga suhu operasi baterai perlu diketahui. Penelitian ini menguji suhu pada permukaan tiga buah baterai LiFePO_4 3.2 V 100Ah yang ditempatkan di dalam kotak saat kondisi *discharging* dengan *C-rates* 0.2C. Penelitian ini membandingkan antara pendinginan secara konveksi paksa dengan fan berukuran diameter 7 cm yang menghasilkan kecepatan udara 6 m/s dengan konveksi natural. Penelitian ini juga menggunakan variasi jarak pada tiap sel baterainya sebesar 2 cm dan 7.6 cm. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam praktikum mata kuliah Perpindahan Panas dan Metode Komputasi Fluida di Departemen Teknik Mesin ITS. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa eksperimen yang dilakukan memiliki nilai error yang kecil sehingga validasi dapat diterima. Hasil penelitian ini juga menunjukkan temperature akhir tertinggi didapatkan dari hasil variasi natural dengan jarak antar baterai 2 cm dan temperature akhir terendah pada variasi konveksi paksa dengan jarak 7.6 cm.

Kata kunci: LiFePO_4 , Konveksi, Pendinginan Baterai

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

EXPERIMENT AND NUMERICAL STUDY FORCED AND NATURAL CONVECTION ON LiFePO_4 BATTERY WITH CELL SPACING VARIATIONS

Student Name / NRP : Mahib Sultan Setiaji / 5007201170
Department : Mechanical Engineering FTIRS - ITS
Advisor : Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, S.T, M.Sc. IPM

ABSTRACT

As the demand for energy increases every year, innovation in energy usage is essential to achieve net zero emissions by 2050. Batteries are one of the best solutions to reduce energy consumption derived from oil and gas. One of the drawbacks of batteries is their relatively narrow operating temperature range. Therefore, it is important to understand how to maintain the operating temperature of batteries. This study examines the surface temperature of three LiFePO_4 3.2V 100Ah batteries inside a box during discharging at a C-rate of 0.2C. The study compares forced convection cooling using a 7 cm diameter fan producing an airflow of 6 m/s with natural convection. It also uses different spacing variations between each battery cell, 2 cm and 7.6 cm. This study is expected to serve as a reference for the Heat Transfer and Computational Fluid Dynamics laboratory courses at the Department of Mechanical Engineering, ITS. The simulation results indicate that the experiment has a small error value, thus the validation is acceptable. The findings also show that the highest final temperature was obtained from the natural convection variation with a 2 cm spacing between batteries, while the lowest final temperature was observed in the forced convection variation with a 7.6 cm spacing.

Keywords: LiFePO_4 , Convection, Battery Cooling.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur terhadap kehadirat Allah SWT karena berkat Rahmat dan hidayat-Nya penyusunan tugas akhir dengan judul **“EKSPERIMEN DAN STUDI NUMERIK KONVEKSI PAKSA DAN NATURAL PADA BATERAI LiFePO₄ DENGAN VARIASI JARAK SEL BATERAI”** dapat diselesaikan dengan baik. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan penididan S-1 jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesematan ini penulis ingin sangat berterima kasih kepada orang-orang baik yang selalu mendukung, menemani, bahkan membantu penulis dalam mengerjakan tugas akhir dan studinya. Orang-orang terebut adalah:

1. Keluarga inti saya yang terdiri dari Bapak Uut, Ibu Sinta, dan adik kesayangan saya yaitu Ira. Karena mereka lah yang selalu memberikan dukungan penuh kepada saya bahkan saat saya mengalami penyakit ginjal kronis hingga gagal ginjal. Terkhusus ibu saya Ibu Sinta yang rela memberikan salah satu ginjalnya kepada saya agar saya dapat melanjutkan hidup dan menyelesaikan tugas akhir ini. Tidak lupa juga kepada keluarga besar saya yang tidak bisa disebutkan satu persatu karena sudah mendukung dan merawat kami sekeluarga saat saya sedang masa pemulihan pasca operasi transplantasi ginjal.
2. Bapak Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo S.T., M.Sc., IPM selaku dosen pembimbing saya yang selalu memberikan waktu dan kepercayaan kepada saya sebagai mahasiswa bimbingannya juga arahan terhadap penyelesaian tugas akhir ini.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Prabowo, MEng, IPU, AEng, Bapak Ary Bachtiar Krishna Putra, S.T., M.T., Ph.D.,IPM , dan Ibu Tri Vicca Kusumadewi, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji saya yang memeberikan masukan dan kritik terhadap tugas akhir saya agar menjadi lebih baik.
4. Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Mesin yang sudah memberikan ilmu pengetahuan tentang Teknik mesin, makna hidup, tujuan, dan banyak hal yang lain. Terkhusus juga kepada Ibu Vivien yang walaupun sudah tidak lagi mengajar di Teknik Mesin ITS saat ini, beliau sangat membantu saya saat saya masih gagal ginjal.
5. Teman special penulis yaitu Zalfa yang selalu mendukung, menemani, dan mendorong saya untuk dapat menyelesaikan dan menjalani hidup lebih baik. Sahabat-sahabat penulis yang biasa disebut N Family yang ada saat penulis sedang butuh hiburan dan pandangan lain atau baru tentang bidang lain dan isu terkini. Termasuk juga teman seperjuangan penulis yaitu Aldi, Misel, Adista yang banyak membantu penulis untuk menyelesaikan studinya.
6. Dr. Nunuk dan seluruh perawat dan pegawai di Rumah Sakit Darmo yang merawat dan mendukung saya saat masih terkena penyait gibjal kronis hingga gagal ginjal dan seluruh Tim Dokter dan tim perawat RSUP Sardjito yang menangani operasi transplantasi ginjal saya.
7. Teman-teman laboratorium kompor dan perpindahan panas yang membantu mengerjakan tugas akhir ini.
8. Semua pihak lain yang tidak dapat ditulis satu persatu. Terima kasih atas bantuan dan doa baiknya.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan semua pihak yang telah memmbantu penulis menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis menyadari bahwa masih belum sempurna terhadap

tulisannya sehingga diharapkan adanya kritik dan saran dari berbagai pihak agar tulisan ini dapat bermanfaat bagi peneliti, pengurus praktikum, dan pembaca.

Surabaya, 17 Juli 2025

Penulis

Mahib Sultan Setiaji

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
STATEMENT OF ORIGINALITY	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	2
BAB 2	3
2.1 Penelitian Terdahulu	3
2.1.1 <i>Numerical Simulation of Cooling Plate Using K-Epsilon Turbulence Model Cool Down Large-Sized Graphite/LiFePO₄ Battery at High C-Rates</i>	3
2.1.2 <i>Numerical Simulations for Indirect and Direct Cooling of 54 V LiFePO₄ Battery Pack</i>	4
2.1.3 <i>Experimental and numerical investigation of the LiFePO₄ Battery Colling by Natural Convection</i>	7
2.2 Dasar Teori	9
2.2.1 Komponen Utama Baterai Lithium-Ion	10
2.2.2 Jenis dan Karakteristik	10
2.2.3 Proses Charging dan Discharging	12
2.2.4 Battery Management System	12
2.2.5 Perpindahan Panas	13
2.2.6 Generasi Panas pada Baterai	16
2.2.7 Metode Komputasi Fluida	17
BAB 3	19
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	19
3.2 Studi Literatur	20

3.3	Pengumpulan Data	20
3.3.1	Data Variasi Percobaan	20
3.3.2	Spesifikasi Baterai	20
3.3.3	Spesifikasi <i>Battery Tester</i>	20
3.3.4	Spesifikasi Termometer <i>Data Acquisition</i>	21
3.4	Desain Eksperimen	22
3.4.1	Alat dan Bahan	22
3.4.2	Perakitan Alat	24
3.4.3	Prosedur Percobaan	25
3.5	Penyelesaian Numerik	29
3.5.1	Persiapan Geometri	29
3.5.2	<i>Grid Independency Test</i>	32
3.5.3	<i>Meshing</i>	32
3.5.4	<i>Processing</i>	33
3.5.5	<i>Post-Processing</i>	34
3.6	<i>Timeline</i> Pelaksanaan	35
	BAB 4	37
4.1	Data Hasil Eksperimen Permukaan Temperatur Baterai	37
4.1.1	Konveksi Natural dengan Jarak 2 cm	37
4.1.2	Konveksi Natural dengan Jarak 7.6 cm	37
4.1.3	Konveksi Paksa dengan Jarak 2 cm	37
4.1.4	Konveksi paksa dengan Jarak 7.6 cm	37
4.2	Analisis Perbandingan Permukaan Temperatur Baterai dari Hasil Eksperimen dan Hasil Simulasi	37
4.2.1	Persamaan Generasi Panas	37
4.2.2	Konveksi Natural dengan Jarak 2cm	42
4.2.3	Konveksi Natural dengan Jarak 7.6 cm	47
4.2.4	Konveksi Paksa dengan Jarak 2 cm	52
4.2.5	Konveksi Paksa dengan Jarak 7.6 cm	58
4.3	Analisis Perbandingan Permukaan Temperatur Baterai Berdasarkan Jenis Konveksi	62
4.3.1	Jarak 2 cm	62
4.3.2	Jarak 7.6 cm	67
4.4	Analisis Perbandingan Temperatur Permukaan Baterai Berdasarkan Jarak Antar Sel Baterai	71
4.4.1	Konveksi Natural	71
4.4.2	Konveksi Paksa	75
4.5	Perbandingan Temperatur dari Satu Variasi	80

4.6	Distribusi Temperatur pada Baterai	84
4.6.1	Variasi Konveksi Natural 2 cm	84
4.6.2	Variasi Konveksi Natural 7.6 cm	85
4.6.3	Variasi Konveksi Paksa 2 cm	86
4.6.4	Variasi Konveksi Paksa 7.6 cm	87
BAB 5		89
5.1	Kesimpulan	89
5.2	Saran	89
	DAFTAR PUSTAKA	91
	LAMPIRAN.....	93
	BIODATA PENULIS	107

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.7 Gambar Peletakan Sensor Termal pada Baterai (Panchal, 2022)	3
Gambar 2.8 Grafik Temperatur Aliran Air Terhadap Waktu pada Arus Listrik 20 A dengan Suhu Kerja 5°C, 15°C, 25°C, dan 35°C (Panchal, 2022).....	4
Gambar 2.9 Grafik Temperatur Aliran Air Terhadap Waktu pada Arus Listrik 40 A dengan Suhu Kerja 5°C, 15°C, 25°C, dan 35°C (Panchal, 2022).....	4
Gambar 2.10 Grafik Temperatur Paket Baterai dengan Pendinginan Tidak Langsung pada Kondisi Discharging 2C (kiri) dan 10C (Kanan) (Li, 2022)	5
Gambar 2.11 Grafik Temperatur Maksimum Paket baterai Pada kondisi Discharging 10C dengan Pendinginan Udara Langsung (Li, 2022).....	5
Gambar 2.12 Grafik Temperatur Maksimum Paket Baterai pada Kondisi Discharging 10C dengan Larutan Ber-flourin (Li, 2022)	6
Gambar 2.13 Grafik Temperatur Maksimal dengan Variasi Jarak Sel pada Paket Baterai dengan Pendinginan Langsung Satu Fasa (Li, 2022)	6
Gambar 2.14 Grafik Perbandingan antara Larutan Ber-Flourin Dua Fasa dan Lainnya Secara Pendinginan Langsung dengan Kondisi Discharging 10C (Li, 2022).....	7
Gambar 2.15 Distribusi Temperatur dengan Kondisi Discharge 1C (Kalkan, 2021).....	7
Gambar 2.16 Distribusi Temperatur dengan Kondisi Discharge 2C (Kalkan, 2021).....	8
Gambar 2.17 Distribusi Temperatur dengan Kondisi Discharge 3C (Kalkan, 2021).....	8
Gambar 2.18 Distribusi Temperatur dengan Kondisi Discharge 4C (Kalkan, 2021).....	8
Gambar 2.19 Distribusi Temperatur dengan Kondisi Discharge 5C (Kalkan, 2021).....	9
Gambar 2.20 Grafik Perbandingan Hasil Nilai dari Analisa Numerik dan Eksperimen (Kalkan, 2021).....	9
Gambar 2.1 Ilustrasi Komponen Baterai Li-Ion (Zubi, 2018)	10
Gambar 2.4 Gambar Proses Charging dan Discharging (LG Energy Solution, 2021)	12
Gambar 2. 5 Gambaran Umum Generasi Panas Pada Baterai (Ma, 2018)	16
Gambar 3.1 Flowchart Percobaan	19
Gambar 3.2 Skema Peralatan Pengujian	24
Gambar 3.3 Skema Peletakan Thermocouple pada Baterai	25
Gambar 3.4 Pengukuran Kecepatan Aliran Udara pada Fan	25
Gambar 3.5 Pengukuran Tegangan Baterai	26
Gambar 3.6 Baterai dalam Kondisi Tidak Siap Digunakan.....	26
Gambar 3.7 Pemasangan Battery Tester pada Baterai	27
Gambar 3.8 Pemasangan DAQ pada Permukaan Baterai	27
Gambar 3.9 Pemasangan Flashdisk pada DAQ	28
Gambar 3.10 Setting dari Battery Tester	28
Gambar 3.11 Geometri Variasi Konveksi Natural dengan Jarak Antar Baterai 2 cm	29
Gambar 3.12 Geometri Variasi Konveksi Natural dengan Jarak Antar Baterai 7.6 cm	29
Gambar 3.13 Geometri Variasi Konveksi Paksa dengan Jarak Antar Baterai 2 cm.....	29
Gambar 3.14 Geometri Variasi Konveksi Paksa dengan Jarak Antar Baterai 7.6 cm.....	29
Gambar 3. 15 Dimensi Baterai dan Peletakan Channel	30
Gambar 3. 16 Dimensi Variasi Konveksi Natural 2 cm	30
Gambar 3. 17 Dimensi Variasi Konveksi Natural 7.6 cm	31
Gambar 3. 18 Dimensi Variasi Konveksi Paksa 2 cm	31
Gambar 3. 19 Dimensi Variasi Konveksi Paksa 7.6 cm	32
Gambar 3.20 Meshing dari Gemoetri Variasi Konveksi Natural 2 cm.....	32
Gambar 3.21 Meshing dari Gemoetri Variasi Konveksi Natural 7.6 cm.....	33

Gambar 3.22 Meshing dari Gemoetri Variasi Konveksi Paksal 2 cm	33
Gambar 3.23 Meshing dari Gemoetri Variasi Konveksi Paksal 7.6 cm	33
Gambar 4.1 Grafik Heat Generation Tiap Baterai pada Variasi Natural 2 cm	39
Gambar 4.2 Grafik Heat Generation Tiap Baterai pada Variasi Natural 7.6 cm	39
Gambar 4.3 Grafik Heat Generation Tiap Baterai pada Variasi Paksa 2 cm.....	40
Gambar 4.4 Grafik Heat Generation Tiap Baterai pada Variasi Paksa 7.6 cm.....	41
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada Variasi Konveksi Natural 2 cm.....	46
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada Variasi Konveksi Natural 7.6 cm.....	51
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada Variasi Konveksi Paksa 2 cm.....	56
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada Variasi Konveksi Paksa 7.6 cm.....	61
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Temperatur pada Variasi Jarak 2 cm	66
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Temperatur pada Variasi Jarak 7.6 cm	71
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Temperatur pada Variasi Konveksi Natural	75
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Temperatur pada Variasi Konveksi Paksa	79
Gambar 4.13 Grafik Temperatur Tiap Channel Variasi Konveksi Natural 2 cm	80
Gambar 4.14 Grafik Temperatur Tiap Channel Variasi Konveksi Natural 7.6 cm	80
Gambar 4.15 Boundary Layer Konveksi Natural 2 cm	81
Gambar 4.16 Boundary Layer Konveksi Natural 7.6 cm	81
Gambar 4.17 Grafik Temperatur Tiap Channel Variasi Konveksi Paksa 2 cm.....	82
Gambar 4.18 Grafik Temperatur Tiap Channel Variasi Konveksi Paksa 7.6 cm.....	82
Gambar 4.19 Boundary Layer Konveksi Paksa 2 cm	83
Gambar 4.20 Boundary Layer Konveksi Paksa 7.6 cm	83
Gambar 4.21 Distribusi Temperatur Baterai Variasi Konveksi Natural 2 cm.....	84
Gambar 4.22 Distribusi Temperatur Baterai Variasi Konveksi Natural 7.6 cm.....	85
Gambar 4.23 Distribusi Temperatur Baterai Variasi Konveksi Paksa 2 cm.....	86
Gambar 4.24 Distribusi Temperatur Baterai Variasi Konveksi Paksa 7.6 cm.....	87

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 General Performance dari Baterai Li-Ion	11
Tabel 2.2 Properties dari Baterai LiFePO ₄	11
Tabel 2.3 Tabel Perbandingan Generasi Panas Baterai Li-Ion	17
Tabel 3.1 Variasi Percobaan	20
Tabel 3.2 Spesifikasi Baterai	20
Tabel 3.3 Spesifikasi Battery Tester	20
Tabel 3.4 Spesifikasi Data Acquisition Thermocouple	21
Tabel 3.5 Alat dan Bahan	22
Tabel 3.6 Tabel Perhitungan Grid Independency Test	32
Tabel 3.7 <i>Set Up Model</i> Variasi Konveksi Natural.....	34
Tabel 3.8 Set Up Model Variasi Konveksi Paksa.....	34
Tabel 3.9 <i>Set Up Properties</i> Material Baterai.....	34
Tabel 3.10 <i>Set Up Cell Zone Condition</i> dan <i>Boundary Condition</i>	34
Tabel 3.11 <i>Set Up Calculation</i>	34
Tabel 3.12 Tabel Timeline.....	35
Tabel 4.1 Persamaan Grafik Generasi Panas Terhadap Waktu	42
Tabel 4.2 Tabel Perhitungan RMSE Hasil Eksperimen dan Simulasi Variasi Natural 2 cm ..	47
Tabel 4.3 Tabel RMSE untuk Variasi Konveksi Natural Jarak 7.6 cm	52
Tabel 4.4 Tabel RMSE Variasi Konveksi Paksa dengan Jarak 2 cm	57
Tabel 4.5 Tabel RMSE Konveksi Paksa Variasi Jarak 7.6 cm.....	62
Tabel 4.6 Tabel Distribusi Temperatur Konveksi Natural 2 cm	85
Tabel 4.7 Tabel Distribusi Temperatur Konveksi Natural 7.6 cm	86
Tabel 4.8 Tabel Distribusi Temperatur Konveksi Paksa 2 cm.....	87
Tabel 4.9 Tabel Distribusi Temperatur Konveksi Paksa 2 cm	88

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berkembangnya zaman, kebutuhan energi juga akan semakin bertambah. Berdasarkan penelitian statistic dari BP Statistical Review of World Energy di tahun 2021, kebutuhan energi mengalami peningkatan sebanyak 5.8% (Dale, 2022). Jika peningkatan kebutuhan terus terjadi dan umat manusia hanya bergantung pada minyak dan gas, maka pemanasan global tidak akan terelakkan lagi. Hal ini memicu peneliti untuk mengurangi penggunaan bahan bakar minyak dan gas untuk memenuhi kebutuhan energi dengan menggunakan energi terbarukan seperti angin, air, matahari, dan lain-lain. Akan tetapi kendala dari sumber-sumber energi terbarukan ini adalah energi yang dihasilkan tidak bersifat uniform. Banyak hal yang mempengaruhi seperti keadaan cuaca dan lingkungan sehingga energi yang diambil selalu berfluktuatif (Ellabban, 2014). Maka dari itu dibutuhkan baterai untuk menyimpan energi agar saat dimana energi sulit didapat, masih terdapat cadangan energi yang sudah disimpan.

Salah satu jenis baterai yang saat ini umum digunakan adalah jenis baterai lithium-ion (Li-ion). Jenis baterai ini sering kita jumpai di smartphone, kendaraan listrik, dan masih banyak lagi. Keunggulan jenis baterai Li-ion ini adalah memiliki kepadatan energi yang lebih besar, memiliki umur yang relative lebih panjang (Diouf, 2015). Akan tetapi baterai ini juga memiliki masalah seperti proses pembuangan limbahnya, tingginya biaya pembuatannya, dan yang paling utama adalah temperature yang tinggi saat digunakan karena besarnya energy yang disimpan. Temperature yang terlalu tinggi pada baterai bisa menurunkan performa dari kinerja baterai itu sendiri seperti berkurangnya kapasistas dan daya. Jika suhu baterai sangat tinggi maka akan menyebabkan *thermal runaway* yang dapat meledakkan baterai. Penyebab baterai menjadi overheating terdapat beberapa faktor, seperti arus pengisian yang terlalu tinggi, suhu lingkungan yang tinggi, dan kerusakan pada sel baterai (Ping, 2018). Baterai juga tidak boleh beroperasi pada suhu yang terlalu rendah. Suhu yang terlalu rendah akan membuat baterai mengalami perlambatan dari reaksi kimia yang terjadi hingga mengakibatkan penurunan konduktivitas pada elektrolit dan difusivitas pada elektroda. Maka dari itu iang et al meneliti bahwa baterai Li-ion memiliki rentang suhu kerja dari 10 °C hingga 40 °C agar dapat memberikan performa penyimpanan, charging dan discharging yang maksimal. Untuk menjaga temperatur baterai agar tetap direntang tersebut diperlukan proses pendinginan yang baik. Banyak cara untuk menjaga temperatur baterai, diantaranya seperti penggunaan *forced air cooling* (Qin, 2020), *natural air cooling* atau *free convection* (Kalkan, 2021), penggunaan PCM (*Phase Change Material*) (Murali, 2021), serta penggunaan *liquid-based thermal management system* (Liu, 2022).

Berdasarkan penjelasan diatas, sangat penting untuk kita dapat menjaga temperatur baterai dengan bantuan metode-metode yang sudah ditemukan sebelumnya. Penelitian ini akan berfokus pada metode air cooling untuk pendinginan baterai dengan variasi konveksi paksa dan natural serta jarak peletakan baterai. Diharapkan hasil penelitian ini dapat membantu menemukan kondisi yang cocok untuk menghasilkan performa baterai yang paling baik. Serta dapat digunakan untuk acuan praktikum mata kuliah Perpindahan Panas dan Metode Komputasi Fluida di Departemen Teknik Mesin ITS.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang sudah diuraikan diatas, rumusan masalah untuk penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan angin dari fan pada temperature di permukaan baterai lithium-ion pada fase *discharge*?
2. Bagaimana pengaruh variasi jarak baterai lithium-ion pada temperature di permukaan baterai lithium-ion pada fase *discharge*?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian dapat difokuskan dan tidak mencakup hal yang terlalu luas, diperlukan batasan-batasan. Berikut adalah batasan masalah yang digunakan:

1. Penelitian hanya menganalisa temperature pada permukaan baterai pada fase discharge selama dua jam.
2. Penelitian hanya menggunakan baterai jenis LiFePO₄ 3.2 V 100 Ah.
3. Perpindahan panas yang dianalisa hanya secara konveksi.
4. Kecepatan angin dari fan untuk konveksi paksa dianggap konstan.
5. Temperatur awal dan lingkungan penelitian dianggap konstan sebesar 29°C.
6. Penelitian ini hanya mengaji pengaruh dari variasi kecepatan angin dan jarak antar baterai terhadap temperature baterai.

1.4 Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang sudah diuraikan diatas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan angin dari fan pada temperature di permukaan baterai lithium-ion pada fase *discharge*.
2. Mengetahui pengaruh variasi jarak baterai lithium-ion pada temperature di permukaan baterai lithium-ion pada fase *discharge*.

1.5 Manfaat

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

1. Sebagai acuan untuk modul praktikum mata kuliah Perpindahan Panas dan Metode Komputasi Fluida.
2. Sebagai sarana penerapan ilmu yang sudah dipelajari selama masa perkuliahan di Teknik Mesin ITS.

BAB 2

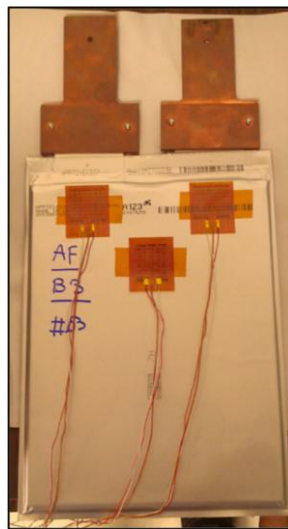
DASAR TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Berikut ini adalah beberapa referensi jurnal yang dijadikan referensi untuk mengerjakan tugas akhir ini.

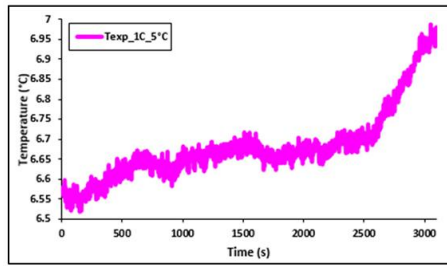
2.1.1 *Numerical Simulation of Cooling Plate Using K-Epsilon Turbulence Model Cool Down Large-Sized Graphite/LiFePO₄ Battery at High C-Rates*

Penelitian ini mempelajari profil kecepatan dan suhu dalam pelat pendingin (dengan diameter 6 mm) yang ditempatkan pada baterai LiFePO₄ tipe *pouch* berukuran besar dilakukan melalui teknik laboratorium dan simulasi. Dalam studi ini, kami menggunakan reverse engineering (RE), pemindaian computed tomography (CT), serta perangkat lunak Detroit Engineering Products (DEP) MeshWorks 8.0 untuk pembuatan mesh permukaan pelat dingin, dan STAR CCM+ untuk simulasi kondisi tunak. Simulasi numerik dilakukan pada arus 20 A (1C) dan 40 A (2C) dengan berbagai suhu operasi. Untuk eksperimen, tiga sensor fluks panas dipasang di lokasi yang berbeda-beda, satu di dekat terminal negatif (anoda), satu lagi di dekat terminal positif (katoda) karena produksi panas lebih tinggi di area elektroda, dan satu lainnya di tengah baterai.

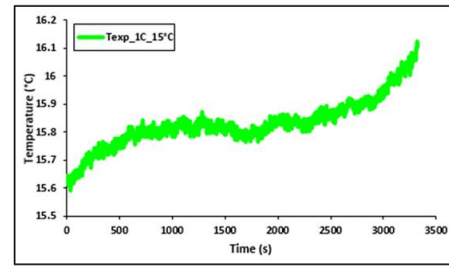


Gambar 2.1 Gambar Peletakan Sensor Termal pada Baterai (Panchal, 2022)

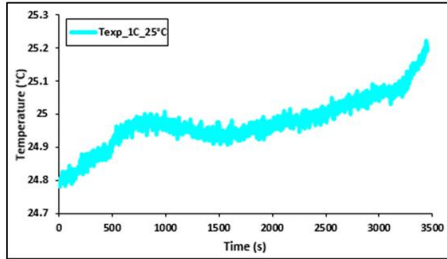
Selain itu, model turbulensi k-realizable dalam STAR CCM+ digunakan untuk mensimulasikan aliran dalam pelat pendingin microchannel, serta simulasi CFD (computational fluid dynamics) dilakukan di bawah beban pelepasan arus konstan (CC). Validasi dilakukan dengan data laboratorium untuk memastikan pendinginan yang memadai dalam rentang suhu yang diperlukan. Berikut adalah grafik hasil simulasi yang telah dilakukan Panchal dan kawan-kawan.



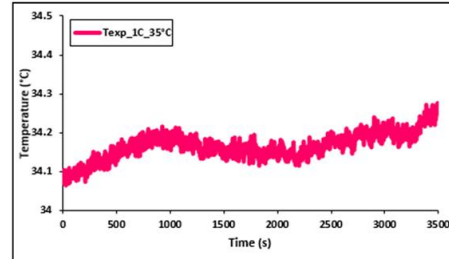
Water temperature profile at 20 A_5 °C



Water temperature profile at 20 A_15 °C

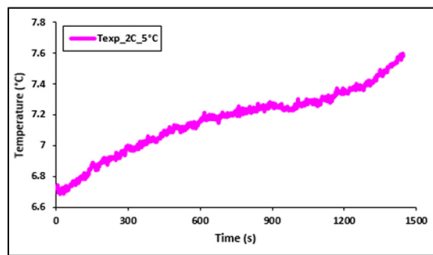


Water temperature profile at 20 A_25 °C

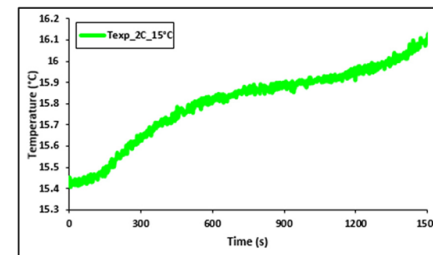


Water temperature profile at 20 A_35 °C

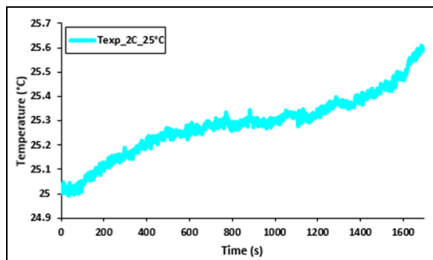
Gambar 2.2 Grafik Temperatur Aliran Air Terhadap Waktu pada Arus Listrik 20 A dengan Suhu Kerja 5°C, 15°C, 25°C, dan 35°C (Panchal, 2022)



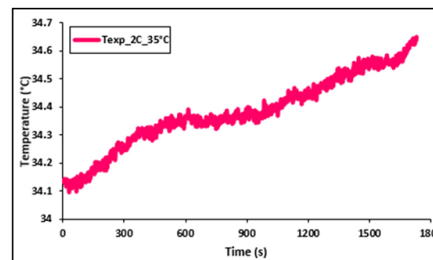
Water temperature profile at 40 A_5 °C



Water temperature profile at 40 A_15 °C



Water temperature profile at 40 A_25 °C



Water temperature profile at 40 A_35 °C

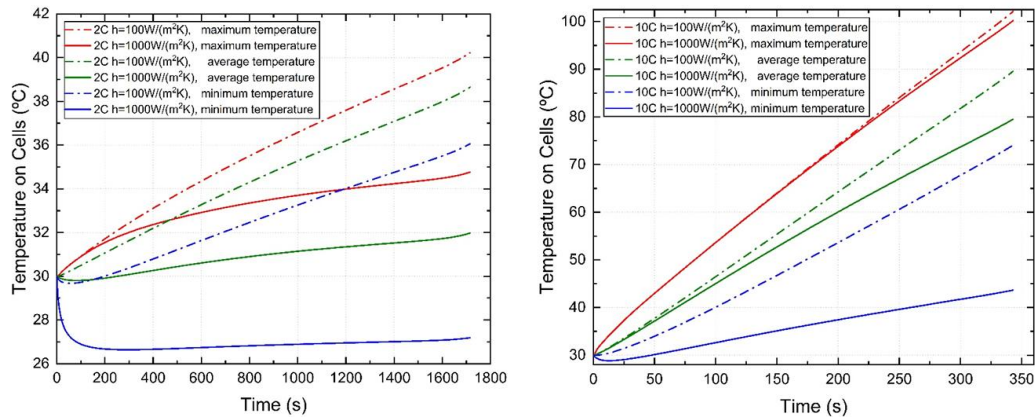
Gambar 2.3 Grafik Temperatur Aliran Air Terhadap Waktu pada Arus Listrik 40 A dengan Suhu Kerja 5°C, 15°C, 25°C, dan 35°C (Panchal, 2022)

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan meningkatnya C-rate dan suhu lingkungan, kontur suhu pada pelat pendingin juga meningkat.

2.1.2 Numerical Simulations for Indirect and Direct Cooling of 54 V LiFePO₄ Battery Pack

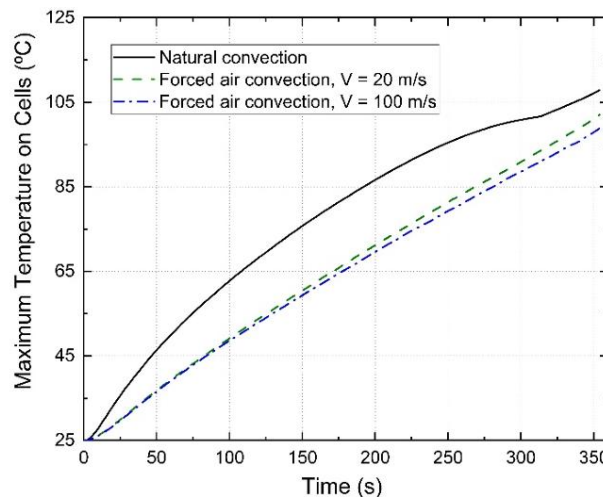
Pada penelitian ini, dilakukan simulasi termal tiga dimensi untuk paket baterai Lithium-ion 54 V yang terdiri dari 18 sel baterai LiFePO₄ tipe pouch yang dihubungkan secara seri, dengan menggunakan model multi-skala elektrokimia-termal-fluida. Model sirkuit ekuivalen (ECM) diterapkan sebagai model elektrokimia pada setiap simpul sel baterai, kemudian digabungkan dengan persamaan termal dan fluida skala makro untuk membentuk model paket baterai. Melalui model ini, efek pendinginan dari sistem manajemen termal baterai (BTMS), baik pendinginan

langsung maupun tidak langsung, pada paket baterai di bawah kondisi pengosongan cepat dievaluasi. Hasilnya menunjukkan bahwa pada pengosongan 2C, pendinginan tidak langsung melalui pelat bawah dapat menghilangkan panas secara efektif dan menjaga suhu paket baterai. Namun, pada pengosongan 10C, suhu maksimum paket baterai akan melampaui 100°C dan distribusi suhu menjadi sangat tidak merata jika menggunakan metode pendinginan tidak langsung melalui pelat bawah untuk paket baterai.



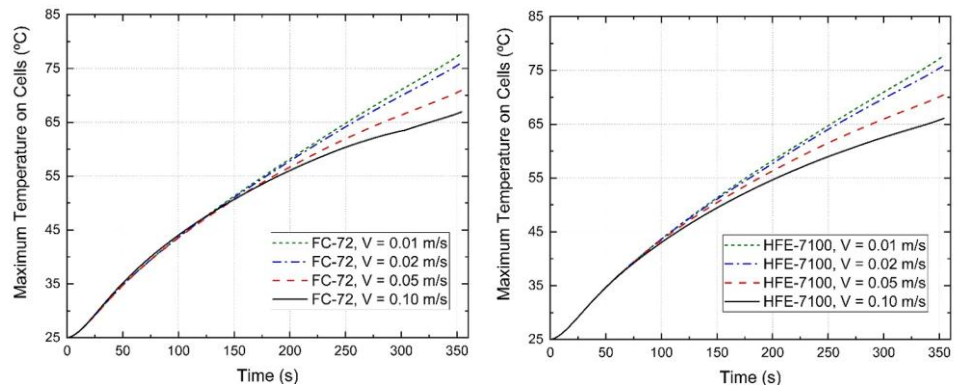
Gambar 2.4 Grafik Temperatur Paket Baterai dengan Pendinginan Tidak Langsung pada Kondisi Discharging 2C (kiri) dan 10C (Kanan) (Li, 2022)

Pendinginan udara langsung juga tidak mampu memenuhi kebutuhan pendinginan paket baterai pada tingkat pengosongan 10C. Kemungkinan penyebabnya adalah koefisien perpindahan panas konvektif pada pendinginan udara langsung yang kecil, sehingga sulit untuk memenuhi kebutuhan pelepasan panas pada kondisi 10C tersebut.



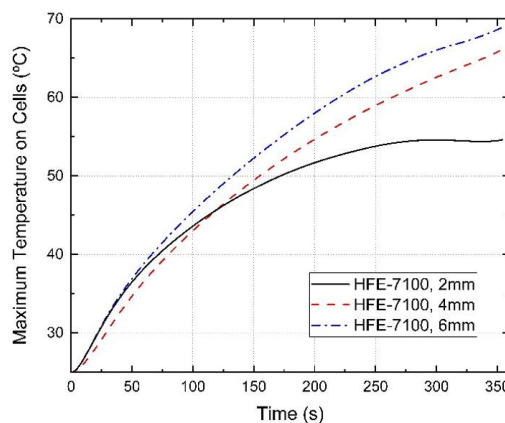
Gambar 2.5 Grafik Temperatur Maksimum Paket baterai Pada kondisi Discharging 10C dengan Pendinginan Udara Langsung (Li, 2022)

Ketika pendinginan langsung satu fase dengan cairan berfluorinasi digunakan, suhu maksimum paket baterai pada kondisi pengosongan 10C dapat dikendalikan sekitar 65°C hingga 75°C .



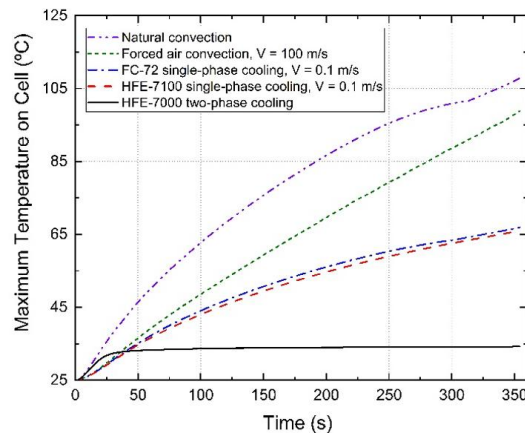
Gambar 2.6 Grafik Temperatur Maksimum Paket Baterai pada Kondisi Discharging 10C dengan Larutan Ber-flourin (Li, 2022)

Dibandingkan dengan sistem pendinginan udara langsung, pendinginan langsung satu fase menggunakan cairan berfluorinasi menunjukkan penurunan tekanan yang lebih rendah dan keseragaman suhu paket baterai yang lebih optimal. Dari penelitian lebih lanjut mengenai metode ini, ditemukan bahwa meningkatkan aliran pendingin dan mempersempit jarak antar sel baterai dapat meningkatkan kinerja pendinginan secara signifikan.



Gambar 2.7 Grafik Temperatur Maksimal dengan Variasi Jarak Sel pada Paket Baterai dengan Pendinginan Langsung Satu Fasa (Li, 2022)

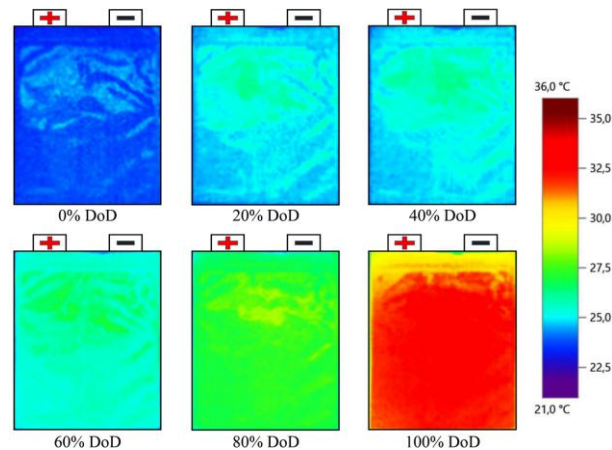
Berikutnya dilakukan metode pendinginan baru, yaitu pendinginan rendam dua fase, dieksplorasi untuk aplikasi pada paket baterai. Dengan metode ini, suhu maksimum paket baterai pada pengosongan 10C dapat dijaga di bawah 35°C, dan pada saat yang bersamaan, keseragaman suhu yang baik dalam paket baterai berhasil dicapai.



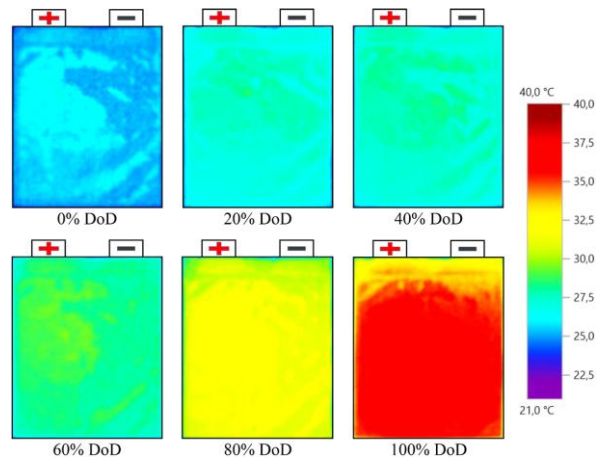
Gambar 2.8 Grafik Perbandingan antara Larutan Ber-Flourin Dua Fasa dan Lainnya Secara Pendinginan Langsung dengan Kondisi Discharging 10C (Li, 2022)

2.1.3 *Experimental and numerical investigation of the LiFePO₄ Battery Colling by Natural Convection*

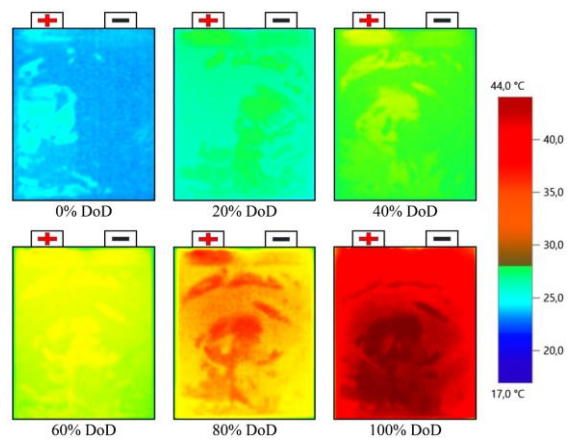
Jurnal ini membahas tentang Kinerja termal baterai tipe pouch LiFePO₄ (LFP) dalam rentang laju pelepasan 1C-5C pada suhu lingkungan 23°C dengan kondisi konveksi alami atau natural diselidiki secara eksperimental dan numerik. Perubahan suhu baterai yang bergantung pada waktu diukur menggunakan kamera termal untuk setiap pelepasan, dan perubahan maksimum, minimum, serta rata-rata pada permukaan baterai dianalisis. Selain itu, laju perpindahan panas melalui baterai dihitung untuk setiap laju pelepasan dalam kondisi konveksi alami baterai, serta distribusi suhu dan kecepatan pada permukaan baterai juga diteliti. Didapatkan hasil temperatur maksimal pada baterai terdapat pada kondisi discharging 5C dengan nilai 52.2°C. Berikut adalah distribusi temperatur pada permukaan baterai yang didapat dari kamera.



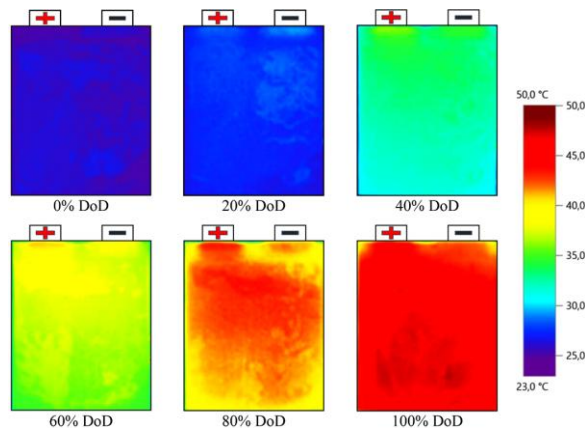
Gambar 2.9 Distribusi Temperatur dengan Kondisi Discharge 1C (Kalkan, 2021)



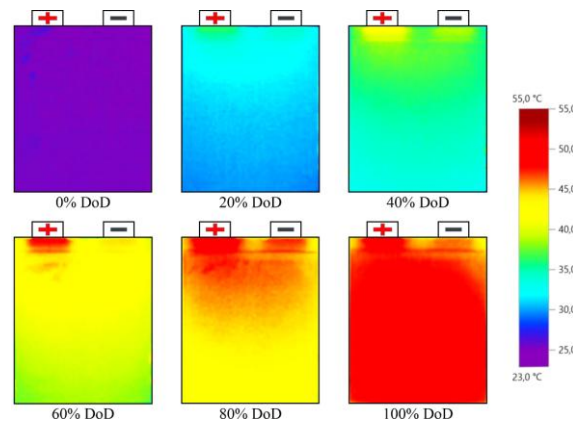
Gambar 2.10 Distribusi Temperatur dengan Kondisi Discharge 2C (Kalkan, 2021)



Gambar 2.11 Distribusi Temperatur dengan Kondisi Discharge 3C (Kalkan, 2021)

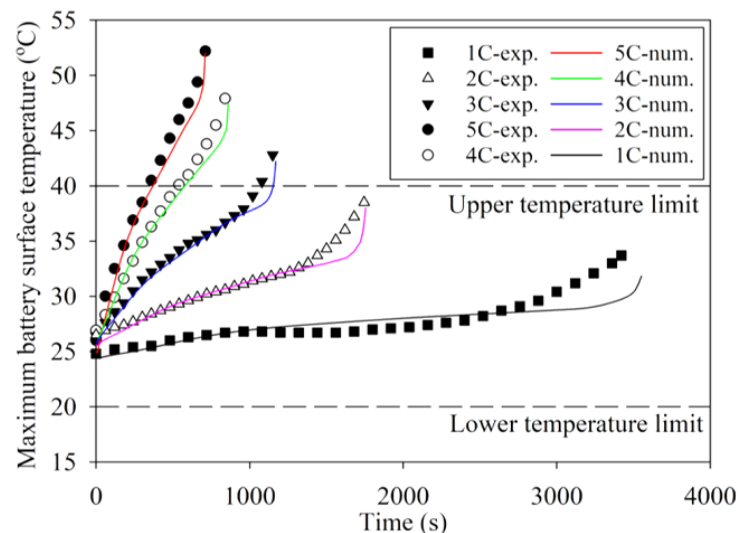


Gambar 2.12 Distribusi Temperatur dengan Kondisi Discharge 4C (Kalkan, 2021)



Gambar 2.13 Distribusi Temperatur dengan Kondisi Discharge 5C (Kalkan, 2021)

Setelah mendapatkan hasil dari eksperimen, Kalkan dan kawan-kawan membandingkan nilai eksperimen dengan nilai dari hasil analisa numerik yang menghasilkan bahwa terdapat perbedaan sebesar 6.7°C. Berikut dibawah ini adalah grafik perbandingannya.



Gambar 2.14 Grafik Perbandingan Hasil Nilai dari Analisa Numerik dan Eksperimen (Kalkan, 2021)

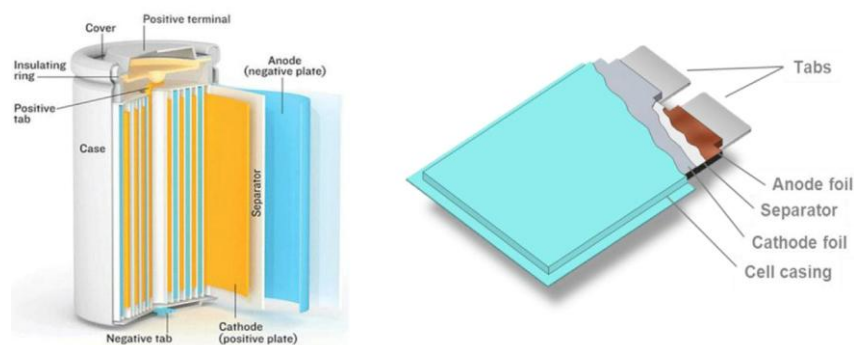
Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pendinginan baterai secara konveksi alami tidak cukup baik untuk mendinginkan baterai dalam keadaan pengosongan yang tinggi.

2.2 Dasar Teori

Baterai Li-ion adalah jenis baterai yang paling sering digunakan dalam perangkat elektronik modern, seperti *smartphone*, laptop, kendaraan listrik, dan gadget-gadget lainnya. Baterai ini banyak digunakan karena memiliki kepadatan energi yang tinggi, umur pakai yang panjang dan kemampuan *charge-discharge* yang cepat. Baterai ini menggunakan ion Lithium (Li^+) yang bergerak dari anoda ke katodanya untuk proses *discharging* atau pengosongan dan dari katoda ke anoda untuk proses *charging* atau pengisian baterai. Perumusan kimia dari Lithium-Ion pertama kali diperkenalkan di masyarakat luas pada tahun 1990 oleh Dr. John Goodenough dari University of Texas. Hingga sejak saat itu baterai Lithium-Ion menjadi jenis baterai yang paling banyak dimanufaktur pada tahun 2013 (Wagner, 2015).

2.2.1 Komponen Utama Baterai Lithium-Ion

Baterai Li-ion memiliki beberapa komponen utama seperti anoda (elektroda positif), katoda (elektroda negatif), separator atau pemisah, dan elektrolit. Anoda yang berfungsi untuk tempat penyimpanan sementara ion Lithium ini umumnya menggunakan material grafit. Grafit dipilih karena memiliki kapasitas tinggi namun memiliki biaya yang rendah. Katoda atau elektroda negatif umumnya mengandung dari senyawa logam-logam tertentu dapat berinteraksi dengan ion lithium seperti Kobalt (Co), Mangan (Mn), dan Fosfat (PO_4). Untuk elektrolit, pada umumnya menggunakan campuran dari senyawa alkil karbonat seperti etilen karbonat ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$), dimetil karbonat ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$), dietil karbonat ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_3$) dan garam lithium (LiPF_6). Elektrolit berfungsi untuk menjadi media pergerakan ion Lithium dari anoda ke katoda atau sebaliknya. Separator atau pemisah ini pada umumnya terbuat dari bahan polimer yang tidak menghantarkan listrik seperti polyetilen (PE) atau polipropilen (PP). Fungsi dari separator ini adalah untuk memisahkan antara anode dan katode agar tidak terjadi *short circuit* pada betari yang akan mengakibatkan baterai menjadi rusak. Separator juga harus dapat memungkinkan ion lithium bergerak bebas dari anoda ke katoda atau sebaliknya. Gambar dibawah adalah contoh sederhana dari baterai Li-Ion.



Gambar 2.15 Ilustrasi Komponen Baterai Li-Ion (Zubi, 2018)

Terdapat pula bagian yang biasa disebut BMS atau *Battery Management System* pada baterai Li-Ion. BMS adalah bagian yang mengontrol secara keseluruhan performa baterai layaknya otak pada manusia. BMS juga memberikan perlindungan terhadap pengisian berlebih, pengosongan berlebih, suhu tinggi, suhu rendah, hubung singkat, dan mode kegagalan lainnya. Selain perlindungan, BMS juga menyediakan fungsi pemantauan terhadap fungsionalitas baterai seperti *State of Health*, *State of Charge*, dan tegangan maksimum yang masih dimiliki baterai. BMS terdiri atas *Master Controller* yang biasanya berbentuk PCB, sensor, dan software yang dapat mengontrol semua bagian bekerja secara optimal.

2.2.2 Jenis dan Karakteristik

Baterai Lithium-Ion memiliki beberapa jenis yang saat ini umum digunakan dan tiap jenis juga memiliki karakteristiknya masing-masing. Berikut adalah gambar tabel perbandingan dari jenis-jenis baterai Li-Ion dan performa umumnya.

Tabel 2.1 General Performance dari Baterai Li-Ion

Source: (Wagner, 2015)

	Lithium Iron Phosphate	Lithium Manganese Oxide	Lithium Titanate	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Nickel Cobalt Alumunium	Lithium Nickel Manganese
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	1400	1200-3000	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)						

Tabel 2.2 Properties dari Baterai LiFePO₄

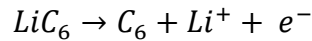
Source: (Sun, 2022)

Item	Battery	Alumunium	Copper	PCM	Air
Density (kg/m3)	2616	2719	8978	900	1.2
Thermal Conductivity (W/m.K)	1.3 (Radial) / 20.7 (Axial)	202.4	386	0.2	0.02
Specific Heat Capacity (J/kg.K)	910	871	381	2220	1005
Latent Heat (kJ/kg)	NA	NA	NA	137	NA
Melting Temp (°C)	NA	660	1085	40	NA

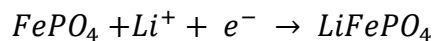
2.2.3 Proses Charging dan Discharging

Baterai Li-Ion memiliki prinsip kerja yang sama seperti baterai lain pada umumnya. Pada proses *discharging*, ion-ion lithium bergerak kembali dari anoda ke katoda melalui medium elektrolit, melewati separator. Proses ini memungkinkan pelepasan energi yang telah tersimpan di anoda ke katoda. Elektron bergerak dari anoda melalui sirkuit eksternal ke katoda, menghasilkan arus listrik yang dapat digunakan oleh perangkat. Reaksi pada saat *discharging* dapat ditulis sebagai berikut dengan asumsi jenis baterai Li-Ion yang digunakan adalah LFP.

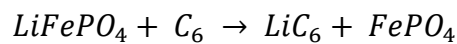
Pada anoda:



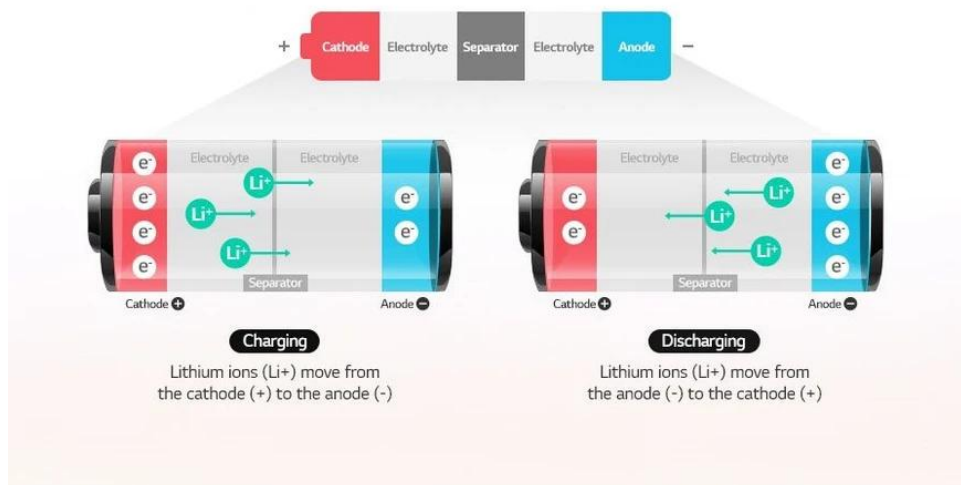
Pada katoda:



Sama halnya dengan proses *charging*, di mana ion-ion lithium (Li^+) bergerak dari katoda melalui medium elektrolit, melewati separator, dan menuju anoda. Pergerakan ion ini memungkinkan penyimpanan energi di anoda. Elektron (e^-) bergerak melalui sirkuit eksternal dari katoda ke anoda untuk menjaga keseimbangan muatan.



Penjelasan diatas dapat dilihat secara lebih sederhana melalui gambar dibawah ini.



Gambar 2.16 Gambar Proses Charging dan Discharging (LG Energy Solution, 2021)

2.2.4 Battery Management System

Paket atau pack baterai lithium-ion membutuhkan Battery Management System (BMS) untuk menjaga keamanan dan memperpanjang umur baterai. BMS bertugas mengatur daya dan energi dalam paket baterai agar mencapai masa pakai yang diinginkan. Biasanya, baterai portabel untuk perangkat seperti laptop hanya perlu menyediakan daya selama satu hingga dua tahun dan beroperasi dalam rentang suhu yang terbatas. Dalam beberapa aplikasi mobil listrik (EV), ada yang tidak menggunakan BMS, tetapi penggunaan BMS biasanya hanya dirancang untuk penggunaan satu atau dua kali. Umur baterai dalam aplikasi tersebut mungkin hanya perlu bertahan selama satu musim balap, sehingga masalah garansi dan umur panjang tidak menjadi prioritas. Namun, secara umum, produk produksi massal selalu menggunakan BMS. Baterai lithium-ion memerlukan pengelolaan khusus untuk memastikan keamanan, berbeda

dengan baterai kimia lainnya seperti baterai timbal-asam, yang dapat berfungsi tanpa kontrol elektronik dan lebih tahan terhadap kondisi penggunaan berlebihan tanpa risiko *thermal runaway*. Sebaliknya, baterai lithium-ion harus diatur agar tetap berada dalam batas aman untuk tegangan, suhu, dan arus.

2.2.5 Perpindahan Panas

Kinerja baterai Li-Ion cenderung sangat dipengaruhi oleh suhu. Suhu tinggi dapat mempercepat penuaan dan menyebabkan *thermal runaway*. Dilaporkan bahwa transfer muatan yang lambat pada antarmuka elektroda/elektrolit menyebabkan kinerja yang buruk pada suhu rendah. Pada suhu yang sangat rendah, kapasitas sel menurun secara signifikan dibandingkan dengan kapasitas nominal pada suhu ruangan. Rentang suhu kerja yang luas memiliki pengaruh besar terhadap kinerja dan keamanan. Rentang suhu operasi yang optimal tersedia untuk mencegah penurunan kinerja yang tidak diinginkan akibat lingkungan. Tujuan manajemen termal baterai adalah untuk menjaga baterai dalam rentang suhu optimal. Misalnya, penuaan dan peningkatan resistansi yang disebabkan oleh suhu tinggi, serta penurunan kapasitas dan daya yang tersedia akibat suhu rendah. Maka dari itu perlu kita untuk mengetahui cara-cara dari pengaturan panas pada baterai dan apa saja yang dapat mempengaruhi temperatur dalam baterai untuk mencapai temperatur operasionalnya.

2.2.5.1 Konduksi

Konduksi mengacu pada transportasi energi dalam suatu medium akibat adanya gradien suhu, dan mekanisme fisiknya adalah aktivitas acak atom atau molekul. Perpindahan panas secara konduksi diatur oleh Hukum Fourier, dan penggunaan hukum tersebut untuk menentukan fluks panas bergantung pada pemahaman tentang cara suhu bervariasi dalam medium (distribusi suhu). Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan:

q_x = Laju perpindahan panas (Watt)

k = Konduktivitas termal material (W/m. K)

A = Luas permukaan material yang searah dengan flux panas (m^2)

$\frac{dT}{dx}$ = Perbedaan temperatur sepanjang jarak x (m. K)

Atau dapat ditulis dengan versi flux panas

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan:

q_x'' = flux panas (W/m^2)

2.2.5.2 Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi melibatkan dua mekanisme utama. Selain transfer energi yang terjadi karena gerakan acak molekul (difusi), energi juga dipindahkan melalui pergerakan fluida. Pergerakan fluida ini berkaitan dengan kenyataan bahwa, pada waktu tertentu, sejumlah besar molekul bergerak bersama-sama sebagai kelompok. Gerakan ini, saat terjadi gradien suhu, turut mendukung perpindahan panas. Karena molekul-molekul dalam kelompok tetap memiliki gerakan acak, total perpindahan panas merupakan kombinasi dari transfer energi melalui gerakan acak

molekul dan pergerakan fluida. Berikut adalah persamaan umum perpindahan panas secara konveksi.

$$q = h \cdot A \cdot (T_w - T_f) \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan:

q = Laju perpindahan panas (Watt)

h = Koefisien konveksi dari fluida ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

A = Luas permukaan dinding yang dialiri fluida (m^2)

T_w = Temperatur dinding (K)

T_f = Temperatur fluida (K)

Pada baterai, perpindahan panas paling banyak terjadi melalui konveksi. Konveksi pada baterai pun dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu konveksi secara paksa dan alami atau natural. Konveksi secara paksa maksudnya adalah perlu upaya agar udara atau fluida yang membawa panas dari sebuah permukaan seperti kipas angin yang meniup atau pompa air yang mendorong air melewati permukaan tersebut. Sementara untuk konveksi secara natural adalah menggunakan efek buyansi dari fluida yang memiliki perbedaan temperatur. Fluida yang memiliki temperatur lebih tinggi akan memiliki massa jenis yang lebih rendah, sehingga akan memaksa bagian lain dari fluida yang memiliki temperatur lebih rendah untuk turun ke bawah dan mengenai bagian dari permukaan.

Pada konveksi aliran paksa, kita perlu untuk mengetahui jenis dari aliran fluida itu sendiri dan nilai dari bilangan Nusselt agar dapat memperkirakan nilai koefisien konveksinya. Cara untuk mengetahui jenis aliran adalah dengan mencari nilai Reynold Number. Berikut adalah cara perhitungan bilangan Reynold.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L_c}{\eta} \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan:

Re = Bilangan Reynold

ρ = Massa jenis fluida (kg/s)

v = Kecepatan aliran fluida (m/s)

L_c = Panjang karakteristik dari permukaan yang dialiri fluida (m)

η = Viskositas dinamik fluida (N.s/m^2)

Setelah nilai bilangan Reynold diketahui, baru dapat ditentukan jenis aliran yang melewati sebuah permukaan aliran laminar atau turbulen. Berikutnya adalah menentukan nilai bilangan Nusselt. Untuk mencari nilai bilangan Nusselt terdapat banyak cara yang bergantung pada jenis aliran dan geometri permukaan yang dilewati fluida. Hubungan antara nilai bilangan Nusselt dan koefisien konveksi dituliskan sebagai berikut.

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \dots \dots \dots (2.5)$$

dimana:

- Nu = Bilangan Nusselt
h = Koefisien konveksi fluida (W/m².K)
L = Jarak permukaan yang dialiri fluida (m)
k = Konduktivitas termal fluida (W/m.K)

Pada konveksi natural, kita perlu memperhatikan nilai bilangan Grashof. Bilangan Grashof adalah nilai dari rasio dari gaya buyansi dan gaya viscous pada fluida. Bilangan Rayleigh pada konveksi natural sama pentingnya dengan bilangan Reynold pada kondisi aliran paksa. Bilangan Grashof dapat didapat dengan rumus berikut ini.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_w - T_f) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \dots \dots \dots (2.6)$$

dengan:

- Ra = Bilangan Rayleigh
Gr = Bilangan Grashof
Pr = Bilangan Prandtl
g = Percepatan gravitasi (m/s²)
T_w = Temperatur dinding (K)
T_f = Temperatur fluida (K)
L = Panjang dinding yang dialiri fluida (m)
ν = Viskositas kinematik fluida (m²/s)
α = Difusivitas Termal Fluida (m²/s)

2.2.5.3 Radiasi

Radiasi termal adalah energi yang dilepaskan oleh suatu materi yang memiliki suhu lebih dari nol absolut. Walaupun fokus utama adalah pada radiasi yang berasal dari permukaan padat, cairan dan gas juga dapat memancarkan energi. Proses pemancaran ini berkaitan dengan perubahan konfigurasi elektron dalam atom atau molekul penyusun materi tersebut. Energi dalam radiasi ini dibawa oleh gelombang elektromagnetik atau foton. Berbeda dengan konduksi atau konveksi yang membutuhkan medium fisik untuk mentransfer energi, radiasi tidak memerlukan medium, bahkan proses radiasi berlangsung paling efektif di dalam ruang hampa. Berikut adalah persamaan umum perpindahan panas secara radiasi.

$$q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \left(T_w^4 - T_{sur}^4 \right) \dots \dots \dots (2.7)$$

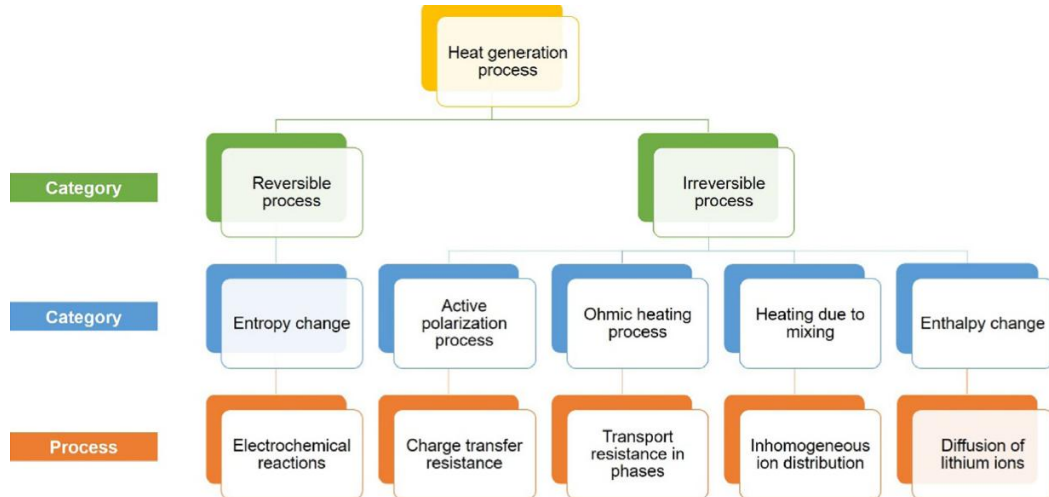
dengan:

- q = Laju perpindahan panas secara radiasi
σ = Konstanta Boltzmann (5.67 x 10⁻⁸ W/m² . K⁴)
ε = Emisivitas permukaan dinding
A = Luas permukaan dinding (m²)
T_w = Temperatur dinding (K)

T_{sur} = Temperatur sekitar (K)

2.2.6 Generasi Panas pada Baterai

Pada generasi panas baterai Li-Ion, masih banyak peneliti yang berusaha memahami mekanisme di balik generasi panas dan hubungannya dengan berbagai komponen dalam sel baterai. Tapi bisa digambarkan sebagian besarnya sebagai gambar berikut.



Gambar 2. 17 Gambaran Umum Generasi Panas Pada Baterai (Ma, 2018)

Bernardi et al. mengembangkan persamaan energi yang mencakup reaksi elektrokimia, perubahan fase, efek pencampuran, dan pemanasan Joule yang mempengaruhi suhu sel. Bernardi dan kawan-kawan meurumuskan sebuah persamaan yang cukup terkenal dan digunakan sebagai dasar perhitungan generasi panas pada baterai lithium-ion. Persamaannya adalah sebagai berikut.

$$Q_t = I \cdot (V_{oc} - V_t) + I \cdot \left(T \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \right) \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan:

Q_t = Generasi Panas yang dihasilkan (Watt)

I = Arus (Ampere)

V_{oc} = Tegangan *Open Circuit* (Volt)

V_t = Tegangan saat mengeluarkan arus (Volt)

T = Temperatur (K)

Berikutnya ada Rachel Gerver dan Jeremy Meyers membangun model tiga dimensi yang menggabungkan fenomena termal dan Listrik. Model ini membantu menyelidiki difusi, migrasi, dan kinetika transfer muatan dalam baterai Lithium-ion. Jake Christensen et al. melakukan pemodelan baterai dengan menggabungkan model elektrokimia satu dimensi dengan model termal tiga dimensi. Model ini memberikan arahan untuk menyelesaikan reaksi termal-elektrokimia yang digabungkan untuk berbagai jenis sel dan memahami kimianya. Smith et al. mempelajari perilaku baterai Lithium-ion selama pengisian dan pengosongan dengan mengembangkan model elektrokimia yang mencakup kinetika elektrokimia, spesies, dan persamaan diferensial parsial muatan. dapat dikatakan bahwa beberapa peneliti menggunakan reaksi elektrokimia dan beberapa lainnya menggunakan parameter rangkaian listrik yang

berbeda seperti tegangan rangkaian terbuka, tegangan terminal, keadaan pengisian, dan kedalaman pengosongan untuk memprediksi pembangkitan panas dalam sel baterai. Akan tetapi secara umum dapat diketahui jika generasi panas berhubungan dengan perubahan energi dari listrik ke panas dalam arus listrik. Rumus umumnya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$E_g = I^2 \cdot R \dots \dots \dots (2.9)$$

dengan:

E_g = Energi panas yang dibangkitkan (generasi energi) (Watt)

I = Arus listrik (Ampere)

R = Hambatan listrik (resistansi) (Ohm)

Choudari dan kawan-kawan melakukan eksperimen pada beberapa jenis elektroda untuk mendapatkan nilai energi panas yang didapatkan dari generasi panas di baterai Li-Ion.

Tabel 2.3 Tabel Perbandingan Generasi Panas Baterai Li-Ion

Source: Choudary, 2020

Electrode Material (cathode)	Capacity (mAh/g) At 4.4V	Total heat evolved (J/g) At 4.4V
LiCoO ₂	170	1100
LiNiO ₂	234	1300
LiNi _{0.8} Co _{0.2} O ₂	221	1600
LiMn ₂ O ₄	123	860
Li[Ni _{3/8} Co _{1/4} Mn _{3/8}]O ₂	185	290
LiFePO ₄	160	520

Generasi panas dalam baterai ini akan memiliki dampak jika tidak dapat dikontrol. Panas yang dibangkitkan dalam paket baterai dapat mempercepat degradasi dan memperpendek masa pakai baterai, yang pada akhirnya mempengaruhi performa keseluruhan. Peningkatan panas dalam paket baterai menjadi signifikan karena terdiri dari banyak sel. Secara umum, kenaikan suhu sebesar 1°C dapat mengurangi umur baterai hingga 2 bulan dalam rentang suhu operasi 30°C hingga 40°C. Jika suhu terus meningkat, hal ini akan menyebabkan penurunan daya dan kapasitas, serta dapat memicu *thermal runaway* hingga menyebabkan ledakan pada baterai. Degradasi ini biasanya ditandai dengan berkurangnya energi dan daya yang dapat digunakan. (Choudari, 2020)

2.2.7 Metode Komputasi Fluida

Computational fluid dynamics (CFD) adalah metode analisis yang digunakan untuk mempelajari aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena lain seperti reaksi kimia melalui simulasi komputer. Teknik ini sangat efektif dan memiliki berbagai aplikasi baik di sektor industri maupun non-industri. Beberapa contohnya termasuk analisis aerodinamika pada pesawat dan kendaraan, pembakaran dalam mesin internal dan turbin gas, serta aplikasi pada turbomachinery dan lainnya. Prinsip kerja CFD melibatkan diskritisasi untuk menyelesaikan perhitungan numerik dalam volume kontrol yang lebih kecil. Pada setiap volume kontrol tersebut, digunakan persamaan

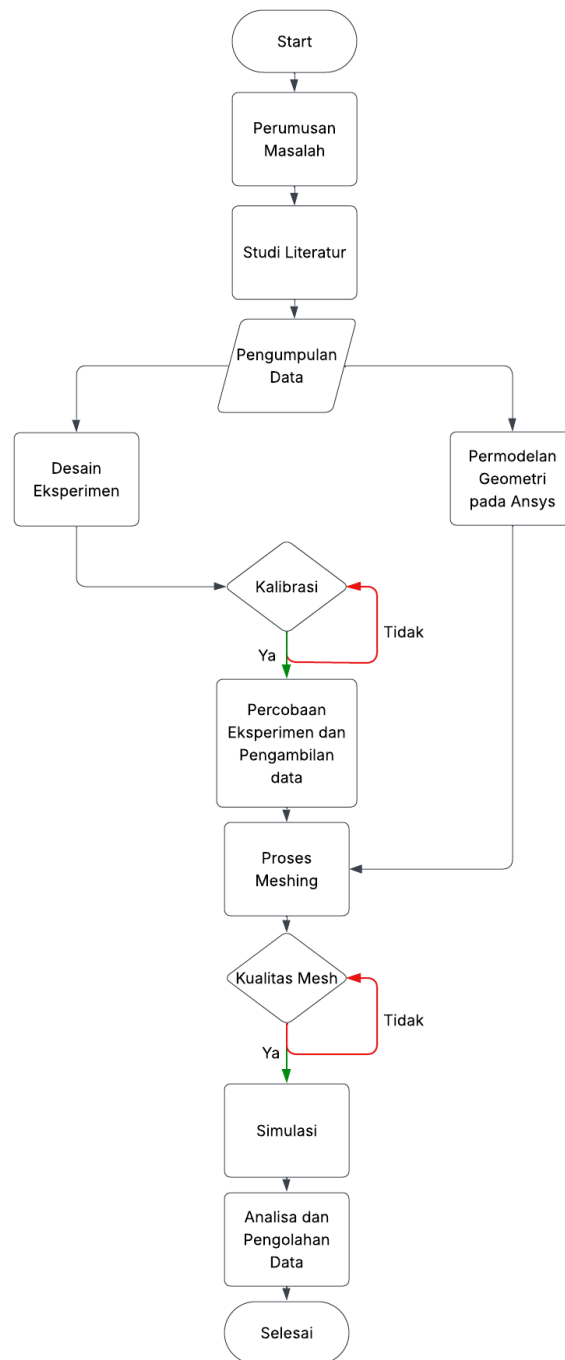
seperti hukum konservasi massa, momentum, dan energi. CFD memainkan peran penting dalam desain produk dan proses industri, seperti mesin, dengan memungkinkan simulasi serta visualisasi fluida yang kompleks secara akurat. Hal ini mencakup distribusi tekanan, pola aliran, dan parameter lainnya. Dibandingkan dengan metode eksperimental, CFD lebih hemat biaya dan mampu melakukan iterasi berbagai desain dengan cepat tanpa memerlukan prototipe fisik.. Untuk memudahkan penggunaan, semua paket CFD komersial dilengkapi dengan antarmuka pengguna yang intuitif untuk memasukkan parameter masalah dan meninjau hasilnya. Dengan demikian, setiap kode CFD terdiri dari tiga bagian utama: pra-pemrosesan, penyelesaian, dan pasca-pemrosesan. (Versteeg, 2007)

BAB 3

METODOLOGI

3.1 *Flowchart* Penelitian

Berikut dibawah ini adalah langkah-langkah dari penelitian yang dilakukan digambarkan dengan menggunakan *flowchart*.



Gambar 3.1 Flowchart Percobaan

3.2 Studi Literatur

Pada tahap awal penelitian, peneliti melakukan tinjauan literatur untuk mengumpulkan informasi yang berkaitan dengan topik yang diteliti. Tinjauan literatur ini penting untuk memperdalam pemahaman tentang topik tersebut. Melalui pemahaman yang baik terhadap literatur yang relevan, peneliti dapat menyusun proposal penelitian yang menyeluruh dan dapat dilaksanakan. Tinjauan literatur ini melibatkan pengumpulan sumber seperti jurnal, buku, dan artikel mengenai perpindahan panas pada baterai LFP.

3.3 Pengumpulan Data

Berikut adalah data-data yang digunakan dalam penelitian ini.

3.3.1 Data Variasi Percobaan

Berikut adalah table variasi yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3.1 Variasi Percobaan

Variasi	Konveksi	Jarak Antar Baterai
1	Natural	2 cm
2		7.6 cm
3	Paksa	2 cm
4		7.6 cm

3.3.2 Spesifikasi Baterai

Berikut adalah table data dari spesifikasi baterai yang digunakan. Perlu diketahui bahwa spesifikasi yang tertulis pada table adalah spesifikasi untuk tiap sel baterai. Total baterai yang digunakan berjumlah tiga baterai.

Tabel 3.2 Spesifikasi Baterai

Parameter	Spesifikasi	Kondisi
Kapasitas	100 Ah	25°C
Voltase	3.2 V	>0°C
Berat	2.1 kg	
Suhu Penyimpanan	30-60°C	Humiditas <85%
Dimensi (PxLxT)	13x3.6x20.5 cm ³	
Arus Charging Max	1C	25°C
Arus Discharge Max	1C	25°C
Arus Charge Normal	0.2C	25°C
Arus Discharge Normal	0.2C	25°C
Cut Off Voltage	2.5 V	> 0°C

3.3.3 Spesifikasi Battery Tester

Berikut adalah spesifikasi dari *battery tester* yang digunakan.

Tabel 3.3 Spesifikasi Battery Tester

Spesifikasi	Detail
Name	EBC-A40L Battery Capacity Tester
Voltage	110V / 220V

<i>Maximum Discharge Power</i>	<i>200W</i>
<i>Voltage Range</i>	<i>0-5V</i>
<i>Current Range</i>	<i>0.1-40A</i>
<i>Current Accuracy</i>	<i>0.2% ±0.01A</i>
<i>Discharge Mode</i>	<i>CC constant current discharge / CP constant power</i>
<i>Discharge Termination</i>	<i>Time / Voltage is below the set lower limit / Manual</i>
<i>Charging Mode</i>	<i>CV constant current and constant voltage charging</i>
<i>Charging Termination</i>	<i>Constant voltage current is lower than the set lower limit / Manual</i>
<i>Cooling Method</i>	<i>Active cooling by fan</i>
<i>Accessories</i>	<i>One online cable, one pair of test cables, one power cable</i>
<i>Size</i>	<i>44 x 29 x 27 cm</i>
<i>Capacity Measurement</i>	<i>- Within 10Ah, resolution 0.001Ah</i> <i>- 10Ah-100Ah, resolution 0.01Ah</i> <i>- Above 100Ah, resolution 0.1Ah</i>

3.3.4 Spesifikasi Termometer *Data Acquisition*

Thermometer yang digunakan pada penelitian ini berjenis thermocouple. Thermocouple ini digunakan untuk mengukur dan mencatat temperature pada permukaan baterai. Berikut adalah table spesifikasi dari thermocouple.

Tabel 3.4 Spesifikasi *Data Acquisition Thermocouple*

Spesifikasi	Detail
<i>Graduation Thermocouple</i>	<i>J/K/T/E/S/N/B/R</i>
<i>Accuracy</i>	<i>0.2% + 1°C</i>
<i>Range</i>	<i>-200°C ~ 1800°C (variation depend on graduation)</i>
<i>Resolution</i>	<i>0.1°C</i>
<i>Channels</i>	<i>8 channels; 128 channels are available</i>
<i>Speed</i>	<i>Fast: 100ms/channel, Medium: 500ms/channel, Slow: 1s/channel</i>
<i>Correction</i>	<i>Error correction for each channel</i>
<i>Comparator</i>	<i>High & low beep function for each channel</i>
<i>Interface</i>	<i>RS232C, U-disc, USB</i>
<i>Software</i>	<i>ATS45 data acquisition software</i>
<i>Cold Junction Accuracy</i>	<i>0.5°C</i>
<i>Other Functions</i>	<i>TFT-LCD True color display, broken thermocouple check function</i>
<i>Power Supply</i>	<i>Voltage: 85VAC ~260VAC, Frequency: 50Hz/60Hz, Power: 10VA</i>
<i>Dimension & Weight</i>	<i>216 x 88 x 300 mm, Weight: 3 kg</i>
<i>Accessories</i>	<i>K thermocouple 8 channels (2 meters/channel)</i>

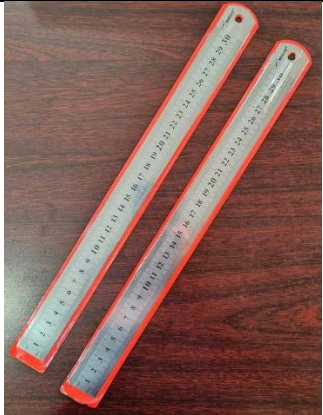
3.4 Desain Eksperimen

3.4.1 Alat dan Bahan

Berikut adalah alat dan bahan yang digunakan dalam eksperimen ini.

Tabel 3.5 Alat dan Bahan

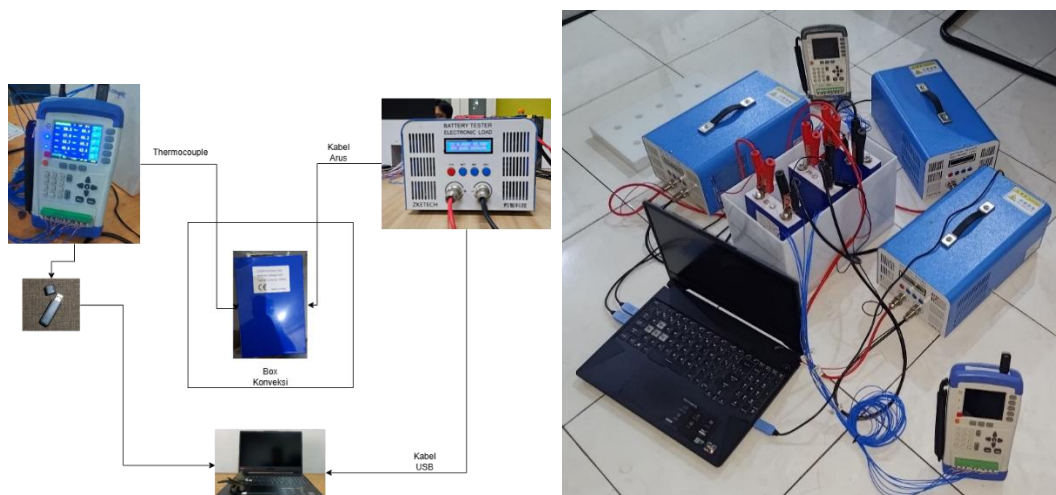
No	Nama Alat dan Bahan	Keterangan	Gambar
1.	Baterai Li-Ion	Digunakan sebagai objek utama penelitian yang diteliti temperaturnya selama proses <i>discharging</i>	
2.	<i>Battery Tester (EBC-A40L Battery Capacity Tester)</i>	Digunakan untuk mengatur arus <i>charging-discharging</i> pada baterai yang diuji. Juga mengatur <i>cut-off voltage</i> pada baterai saat pengujian	
3.	<i>Thermocouple 8 channel Applent AT 4808</i>	Digunakan sebagai <i>Data Acquisition (DAQ)</i> untuk mengukur dan mencatat temperatur pada percobaan	
4.	<i>Electric Fan</i>	Digunakan untuk meniup angin agar terjadi konveksi paksa pada baterai	

5.	Box Konveksi Natural	Digunakan sebagai tempat penelitian dan pengambilan data temperature pada variasi konveksi natural	
6.	Multimeter	Digunakan untuk mengetahui kondisi pertama kali baterai sebelum digunakan	
7.	Kabel	Digunakan untuk menghubungkan antara baterai dan battery tester	
8.	Penggaris	Digunakan mengukur geometri dari baterai dan kotak konveksi	
9.	Flash disk	Digunakan untuk menyimpan sementara data temperature yang dicatat oleh DAQ	

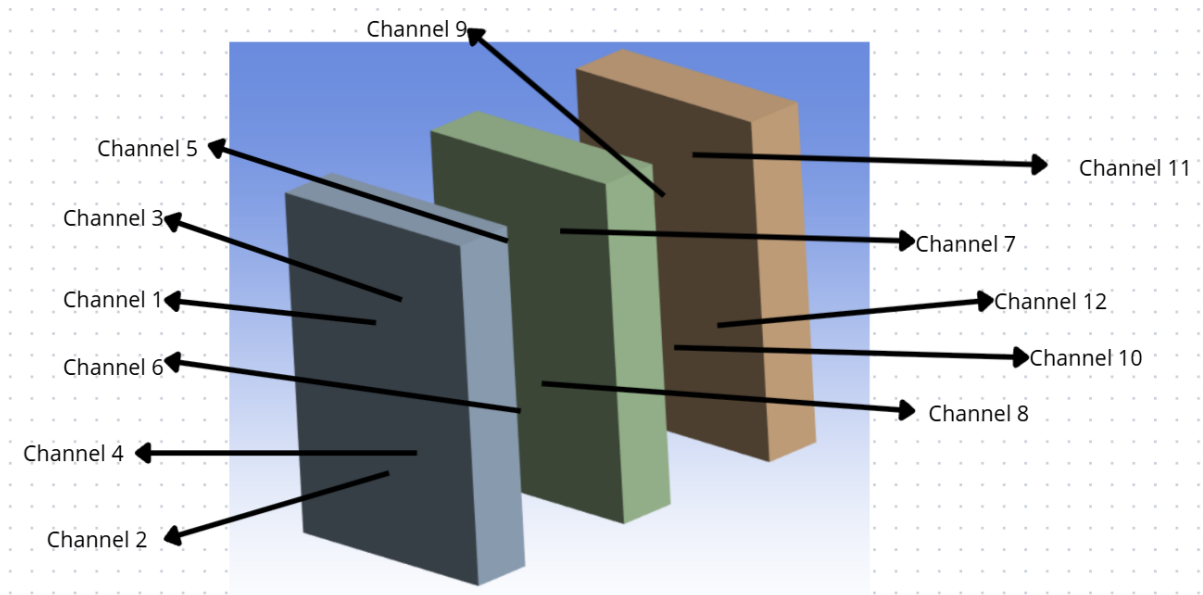
9.	Laptop	Digunakan untu mengolah data yang sudah diperoleh dari eksperimen dan melakukan simulasi	
10.	Flowmeter	Digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara dari <i>fan</i>	
11.	Box Konveksi Paksa	Digunakan sebagai tempat penelitian dan pengambilan data temperature pada variasi konveksi paksa	

3.4.2 Perakitan Alat

Berikut adalah skema perakitan dari semua alat dan bahan yang sudah dipersiapkan.



Gambar 3.2 Skema Peralatan Pengujian



Gambar 3.3 Skema Peletakan *Thermocouple* pada Baterai

3.4.3 Prosedur Percobaan

Berikut adalah prosedur atau tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini.

1. Mempersiapkan alat dan bahan yang sudah disebutkan di table 3.6.
2. Mengukur kecepatan aliran udara pada *fan* yang dihubungkan langsung pada laptop menggunakan flowmeter agar dapat mengetahui koefisien konveksinya. Proses pengukuran dapat dilihat seperti gambar berikut.



Gambar 3.4 Pengukuran Kecepatan Aliran Udara pada Fan

3. Mengukur tegangan baterai dengan multimeter agar tau kondisi baterai pertama kali sebelum digunakan seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.5 Pengukuran Tegangan Baterai

Apabila baterai menunjukkan angka sekitar 3.2 V maka baterai memiliki voltase yang baik dan siap digunakan. Jika baterai menunjukkan voltase kurang dari 3.2 V, maka baterai tidak siap digunakan. Contoh baterai yang tidak siap digunakan seperti pada berikut ini. Jika baterai tidak siap digunakan maka perlu dicas terlebih dahulu.



Gambar 3.6 Baterai dalam Kondisi Tidak Siap Digunakan

4. Rangkaian peralatan disiapkan untuk mengamati perubahan suhu permukaan baterai selama proses pelepasan daya (discharging) dengan menggunakan Battery Tester (EBC-A40L Battery Capacity Tester). Battery Tester kemudian dihubungkan ke terminal positif dan negatif baterai sesuai dengan pengaturan yang terlihat pada gambar di bawah ini.



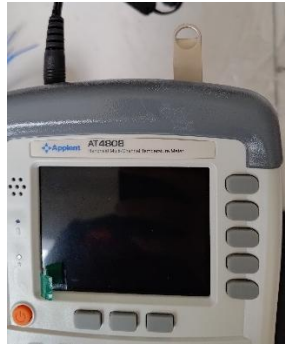
Gambar 3.7 Pemasangan *Battery Tester* pada Baterai

5. Berikutnya DAQ dipasang pada bagian permukaan dari baterai seperti gambar berikut ini.



Gambar 3.8 Pemasangan DAQ pada Permukaan Baterai

6. *Flashdisk* dipasang pada DAQ untuk menyimpan data temperature yang didapat dari percobaan seperti gambar dibawah ini.



Gambar 3.9 Pemasangan Flashdisk pada DAQ

7. *Battery Tester* (EBC-A40L *Battery Capacity Tester*) dihubungkan pada laptop dan diatur pada opsi D-CC dengan *cut-off voltage* 2.50 V dan *ampere* 20 A karena C-rate yang digunakan adalah 0.2C. Berikut adalah gambar contoh setting dari *battery tester* melalui aplikasi EB Tester Software.



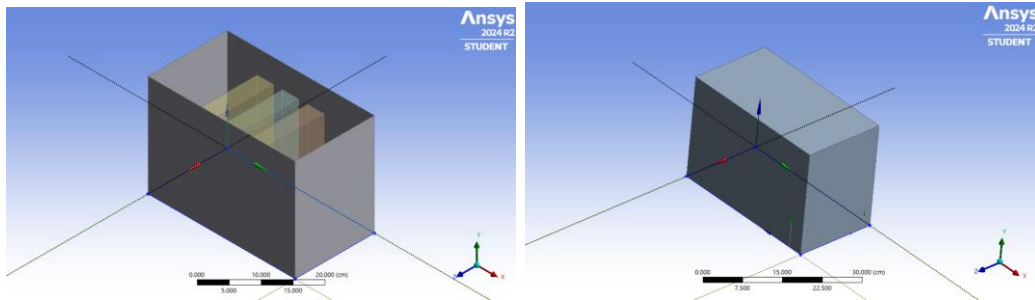
Gambar 3.10 Setting dari *Battery Tester*

8. Percobaan dimulai jika semua baterai dalam keadaan baik dan penuh secara kapasitas. Pengujian yang dilakukan yaitu:
- Pendinginan secara konveksi natural dengan jarak antar sel baterai sebesar 2 cm sebagai **variasi 1**.
 - Pendinginan secara konveksi natural dengan jarak antar sel baterai sebesar 7.6 cm sebagai **variasi 2**.
 - Pendinginan secara konveksi paksa dengan jarak antar sel sebesar 2 cm sebagai **variasi 3**.
 - Pendinginan secara konveksi paksa dengan jarak antar sel sebesar 7.6 cm sebagai **variasi 4**.
9. Tiap percobaan eksperimen diakhiri ketika baterai mencapai voltase *cut off* nya.
10. Data temperature hasil eksperimen dicatat pada table pengamatan.
11. Data dianalisa lalu diambil kesimpulan dari eksperimen yang sudah dilakukan.

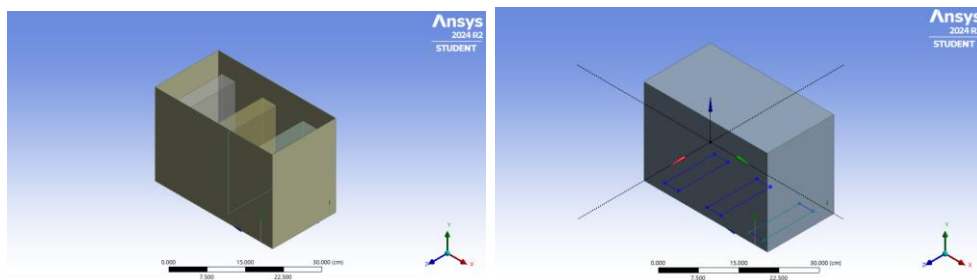
3.5 Penyelesaian Numerik

3.5.1 Persiapan Geometri

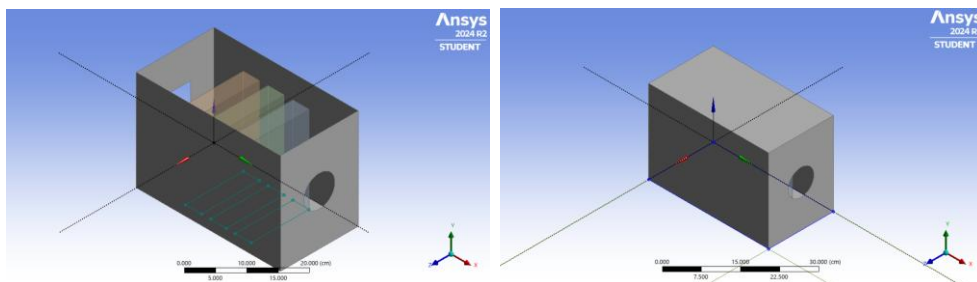
Berikut adalah geometri yang dibuat dengan aplikasi Ansys.



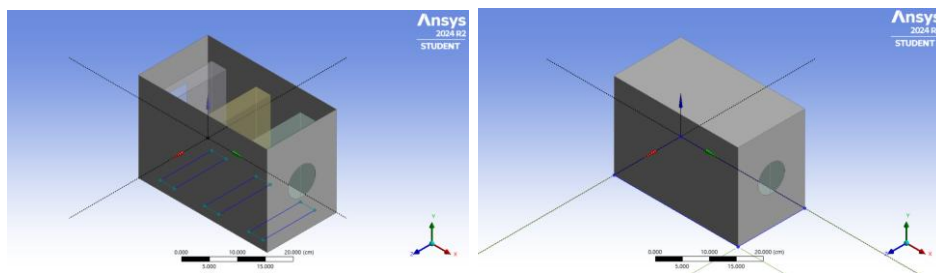
Gambar 3.11 Geometri Variasi Konveksi Natural dengan Jarak Antar Baterai 2 cm



Gambar 3.12 Geometri Variasi Konveksi Natural dengan Jarak Antar Baterai 7.6 cm

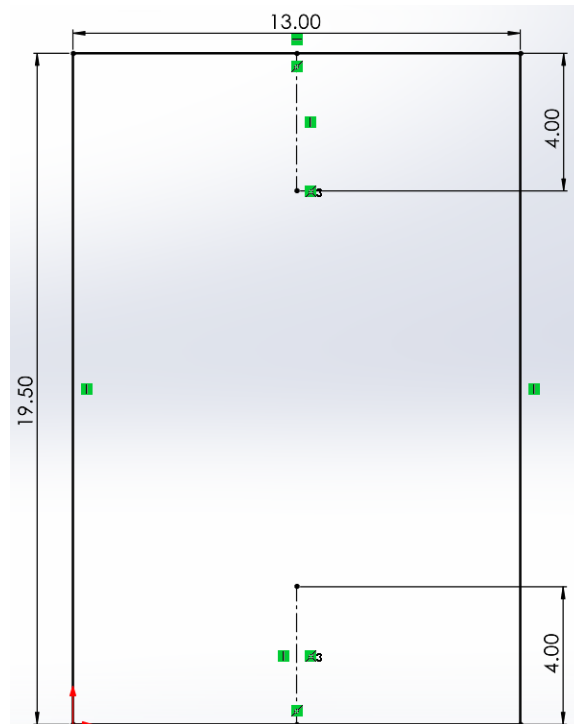


Gambar 3.13 Geometri Variasi Konveksi Paksa dengan Jarak Antar Baterai 2 cm

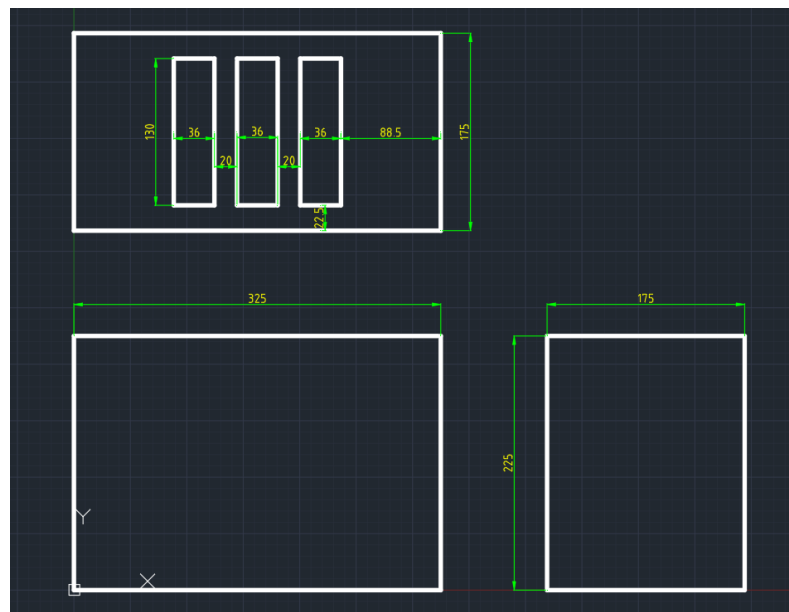


Gambar 3.14 Geometri Variasi Konveksi Paksa dengan Jarak Antar Baterai 7.6 cm

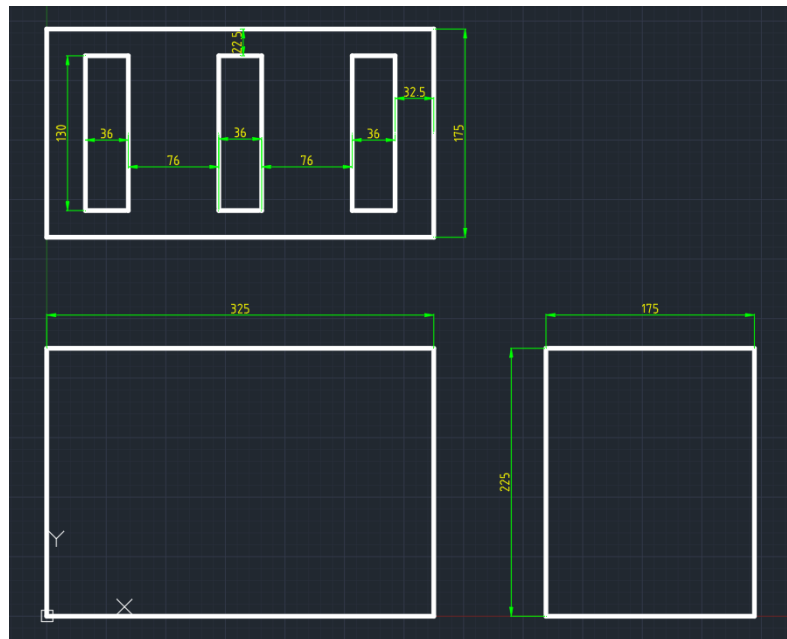
Berikut adalah dimensi dari baterai dan domain.



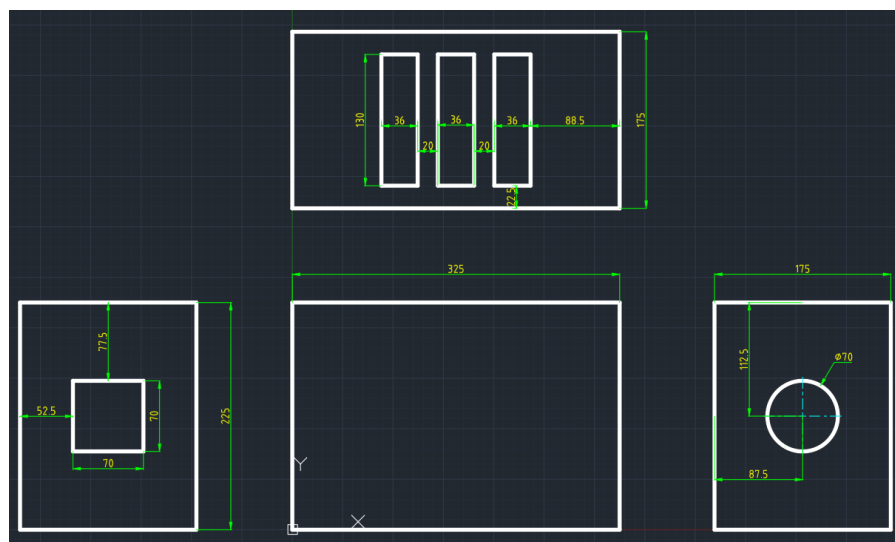
Gambar 3. 15 Dimensi Baterai dan Peletakan Channel



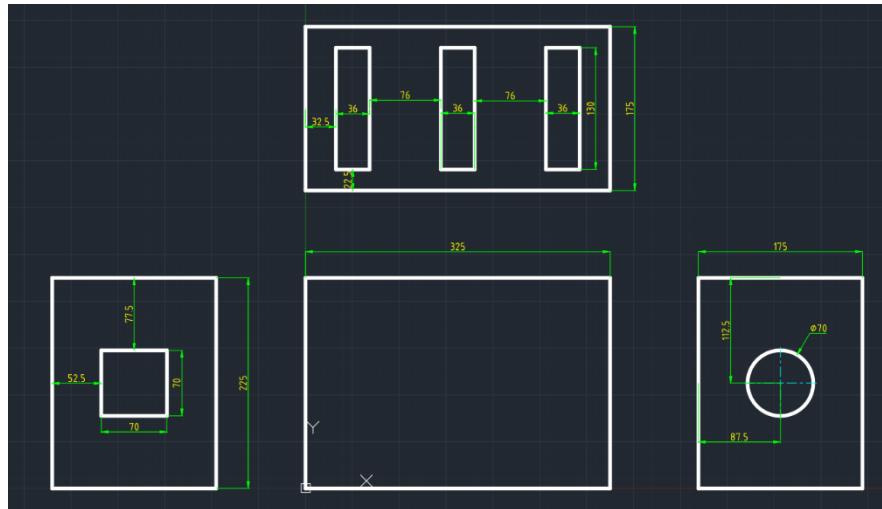
Gambar 3. 16 Dimensi Variasi Konveksi Natural 2 cm



Gambar 3. 17 Dimensi Variasi Konveksi Natural 7.6 cm



Gambar 3. 18 Dimensi Variasi Konveksi Paksa 2 cm



Gambar 3. 19 Dimensi Variasi Konveksi Paksa 7.6 cm

3.5.2 *Grid Independency Test*

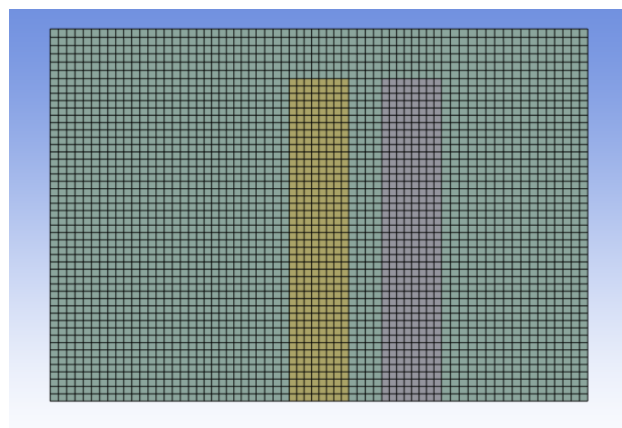
Sebelum melakukan meshing, perlu dicari banyaknya nodes dan element dari meshing yang paling optimal hingga tidak ada perbedaan dari hasil yang didapatkan dari tiap mesh yang dilakukan. Berikut adalah perhitungan GIT yang membandingkan antara hasil temperature yang didapat pada channel 2. Diharapkan nilai relative error dari nilai temperature yang didapatkan kurang dari 1%.

Tabel 3.6 Tabel Perhitungan Grid Independency Test

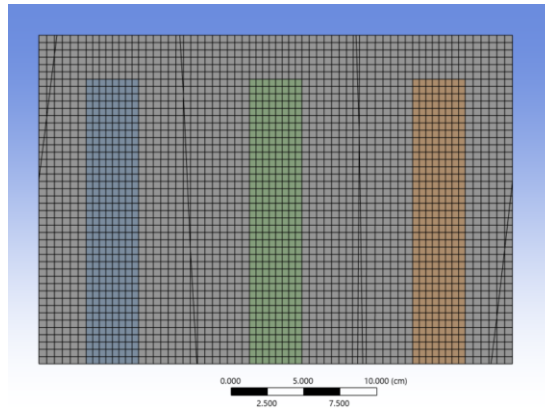
Jumlah Elemen	Temperatur (C°)	Relative Error (%)
1644	43.23369219	3.176078973
12604	41.90282536	1.589591372
113600	41.247164	0.028294628
487887	41.23549657	

3.5.3 *Meshing*

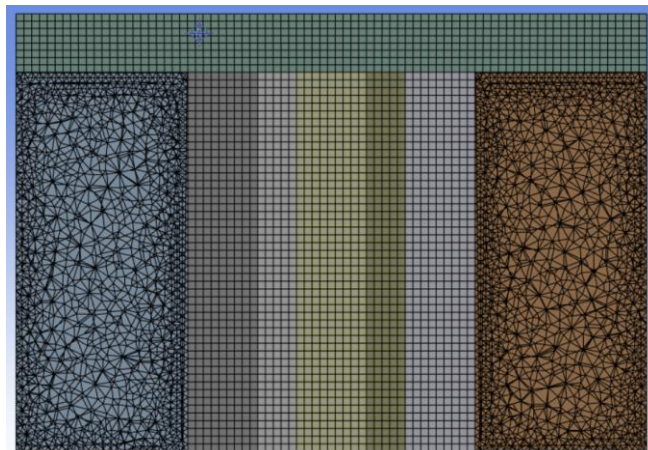
Berikut adalah *meshing* yang dilakukan pada geometri di aplikasi Ansys.



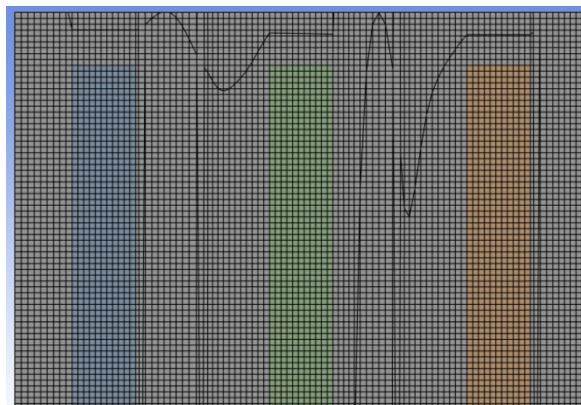
Gambar 3.20 Meshing dari Gemoetri Variasi Konveksi Natural 2 cm



Gambar 3.21 Meshing dari Gemoetri Variasi Konveksi Natural 7.6 cm



Gambar 3.22 Meshing dari Gemoetri Variasi Konveksi Paksal 2 cm



Gambar 3.23 Meshing dari Gemoetri Variasi Konveksi Paksal 7.6 cm

3.5.4 Processing

Proses *processing* adalah melakukan setup atau persiapan pada ANSYS Fluent sedemikian rupa menyerupai kondisi asli eksperimen agar mendapatkan hasil sesuai dengan yang diinginkan. Berdasarkan data spesifikasi baterai dan jurnal-jurnal referensi, setup simulasi ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3.7 Set Up Model Variasi Konveksi Natural

Solver	Settings
Type	Pressure-Based
Time	Transient
Velocity Formulation	Absolute
Gravity	On
Add-on Module	Energy
Viscous Condition	Laminar

Tabel 3.8 Set Up Model Variasi Konveksi Paksa

Solver	Settings
Type	Pressure-Based
Time	Transient
Velocity Formulation	Absolute
Gravity	On
Add-on Module	Energy
Viscous Condition	Turbulent k-ε

Tabel 3.9 Set Up Properties Material Baterai

Parameter	Materials
<i>Density</i>	2616 kg / m ³
<i>Specific Heat</i>	910 J / kg.K
<i>Thermal Conductivity</i>	20.7 W / m.K

Tabel 3.10 Set Up Cell Zone Condition dan Boundary Condition

Settings	Values
Temperature	302 K
Material	Baterai
Heat Generation	(Terlampir, dimasukkan di source term)

Tabel 3.11 Set Up Calculation

Calculation Parameters	Settings
Number of Time Steps	720
Time Step Size	10 s
Max Iterations / Time Step	25
Method	Simple, First Order Implicit

3.5.5 Post-Processing

Post-processing adalah tahap dimana data dari hasil simulasi sebelumnya diambil dan dianalisis. Pada tahap ini, visualisasi kontur suhu dari setiap percobaan diperoleh. Data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis untuk meneliti pengaruh rasio jarak sel baterai dan jenis konveksi terhadap distribusi suhu dan laju pemanasan di permukaan baterai.

3.6 *Timeline* Pelaksanaan

Berikut adalah *timeline* yang disiapkan untuk menyelesaikan penelitian ini.

Tabel 3.12 Tabel Timeline

Jenis Kegiatan	Identifikasi Masalah dan Studi Literatur	Pembuatan Geometri	Seminar Proposal	Proses Simulasi dan Pengambilan Data	Analisis Data	Sidang Tugas Akhir	Penyusunan Laporan
Agustus							
September							
Oktober							
November							
Desember							
Januari							
Februari	Libur						
Maret							
April							
Juni							
Juli							

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Eksperimen Permukaan Temperatur Baterai

Berikut adalah hasil data dari eksperimen pengambilan data yang sudah dilakukan:

4.1.1 Konveksi Natural dengan Jarak 2 cm

(Terlampir)

4.1.2 Konveksi Natural dengan Jarak 7.6 cm

(Terlampir)

4.1.3 Konveksi Paksa dengan Jarak 2 cm

(Terlampir)

4.1.4 Konveksi paksa dengan Jarak 7.6 cm

(Terlampir)

4.2 Analisis Perbandingan Permukaan Temperatur Baterai dari Hasil Eksperimen dan Hasil Simulasi

4.2.1 Persamaan Generasi Panas

Untuk melakukan simulasi diperlukan data-data dan hasil perhitungan dari hasil eksperimen yang sudah dilakukan seperti nilai generasi panas pada baterai. Perhitungan nilai generasi panas didapatkan dengan menggunakan persamaan yang dikemukakan oleh Bernardi (1985) dengan rumus sebagai berikut.

$$Q_t = I \cdot (V_{oc} - V_t) + I \cdot \left(T \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \right)$$

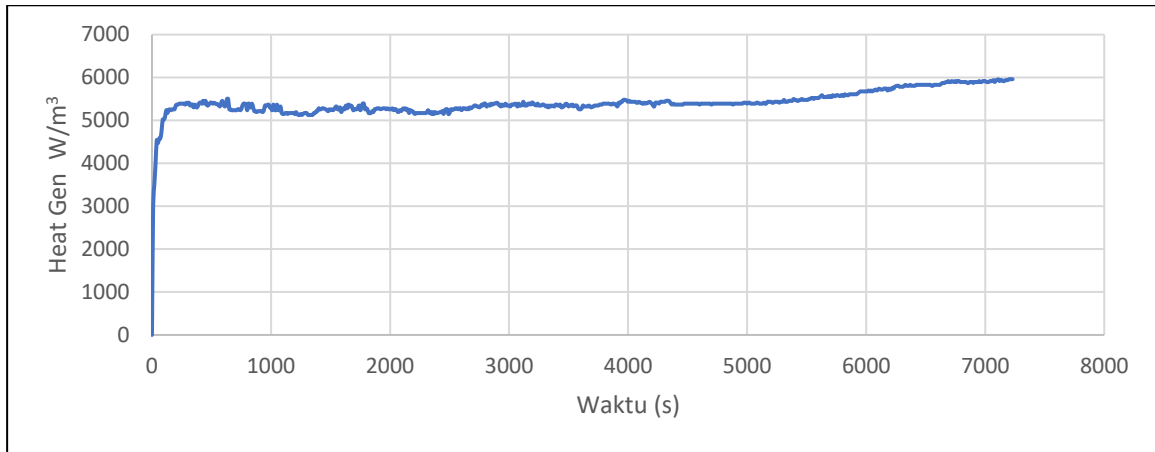
Dapat dilihat bahwa rumus bangkitan panas yang dikemukakan oleh Bernardi tersebut dipengaruhi oleh arus, voltase *open circuit*, voltase saat pengeluaran arus, dan temperature. Rumus ini menggambarkan energi bangkitan panas secara reversible dan irreversible. Irreversible untuk perhitungan ($V_{oc} - V_t$) dan reversible untuk $T \frac{\partial V_{oc}}{\partial T}$. Untuk energi bangkitan panas irreversible pada baterai ini bagian yang paling berpengaruh adalah *Joule Heating* yang disebabkan oleh adanya resistansi di dalam baterai. Bagian reversible dari rumus diatas adalah adanya perubahan entropi. Pada simulasi yang dilakukan perhitungan $T \frac{\partial V_{oc}}{\partial T}$ tidak dilakukan karena perlu penelitian sendiri untuk mencari nilai perubahan voltase *open circuit* terhadap temperature. Menurut Huang dan kawan-kawan juga nilai ini dapat diabaikan karena cenderung kecil sekali hingga 0.00003 V/K. Berikutnya dapat dicari untuk nilai bangkitan panas pada baterai untuk setiap waktu dengan contoh perhitungan pada channel 1 di baterai dari eksperimen dengan variasi Natural dan jarak antar baterai 2 cm pada detik ke 7200 sebagai berikut.

$$I = 20 \text{ A}; \quad V_{oc} = 1.997 \text{ V}; \quad V_t = 1.725 \text{ V};$$

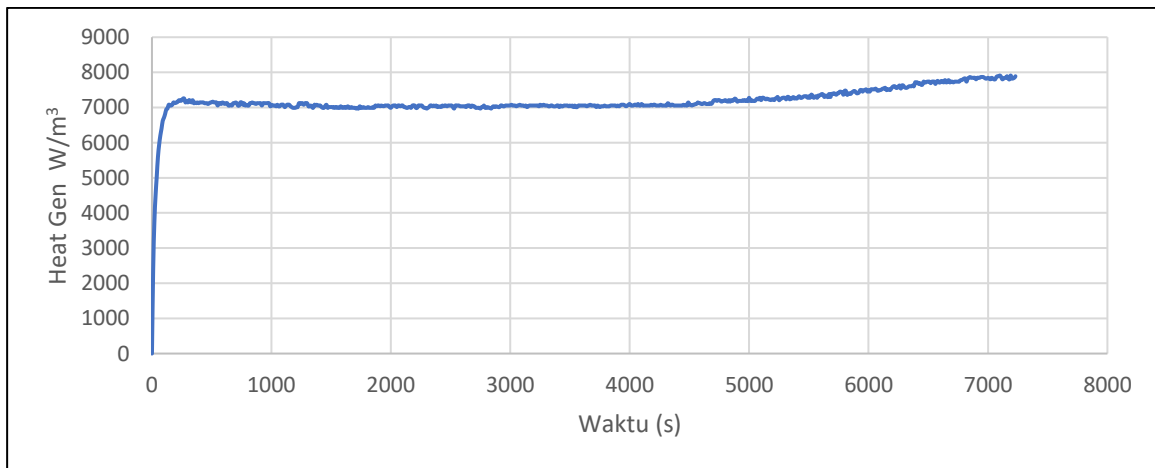
$$Q_t = (20) \cdot (1.997 - 1.725) + (20) \cdot (0)$$

$$Q_t = 5.44 \text{ Watt}$$

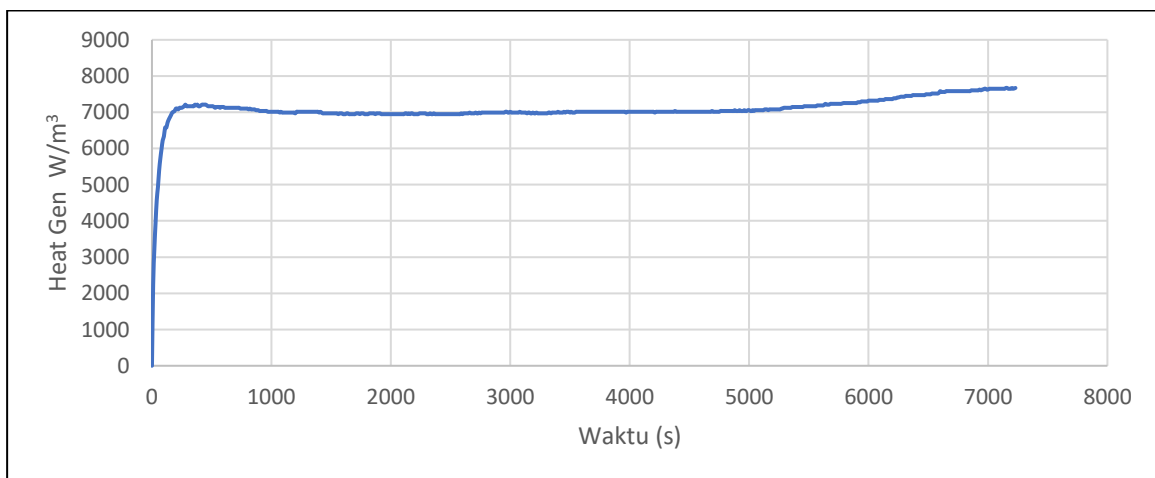
Setelah nilai generasi panasnya didapat, nilai tersebut perlu dibagi dengan volume baterai agar dapat dimasukkan ke dalam Ansys Fluent. Diketahui dimensi dari baterai adalah $13 \times 19.5 \times 3.6 \text{ cm}^3$ sehingga didapatkan nilai $Q/V = 5960.99 \text{ W/m}^3$. Perhitungan ini berlaku untuk setiap waktu yang diambil data voltasenya sehingga mendapatkan gambar grafik antara generasi panas terhadap waktu. Berikut adalah grafik-grafik yang didapatkan dari tiap baterai tiap variasi.



a

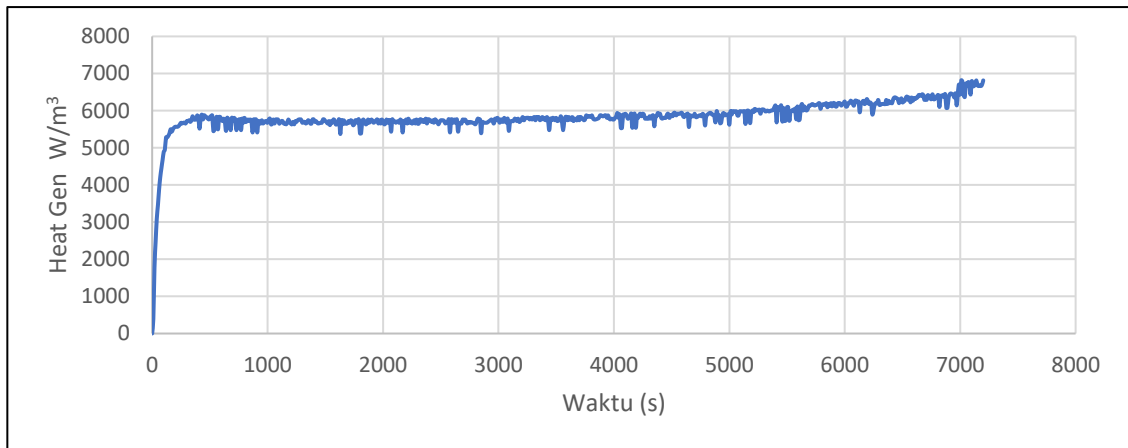


b

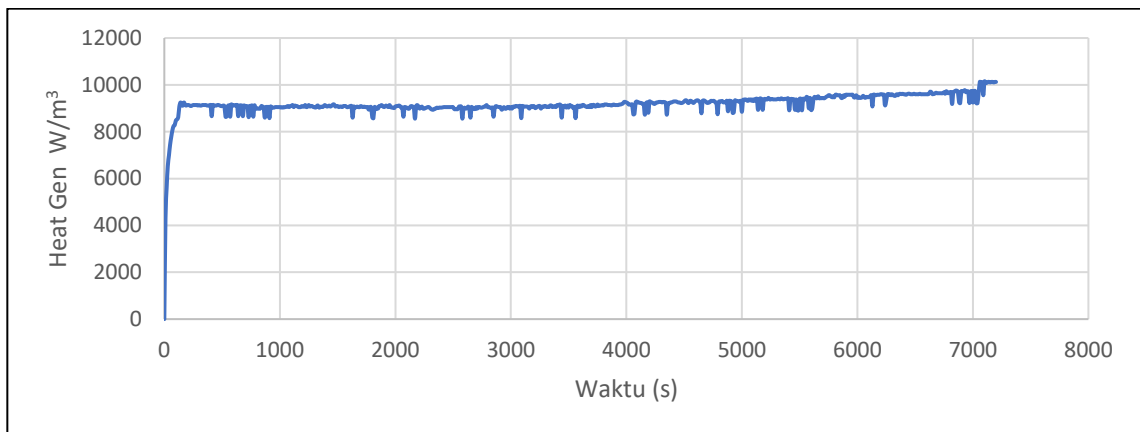


c

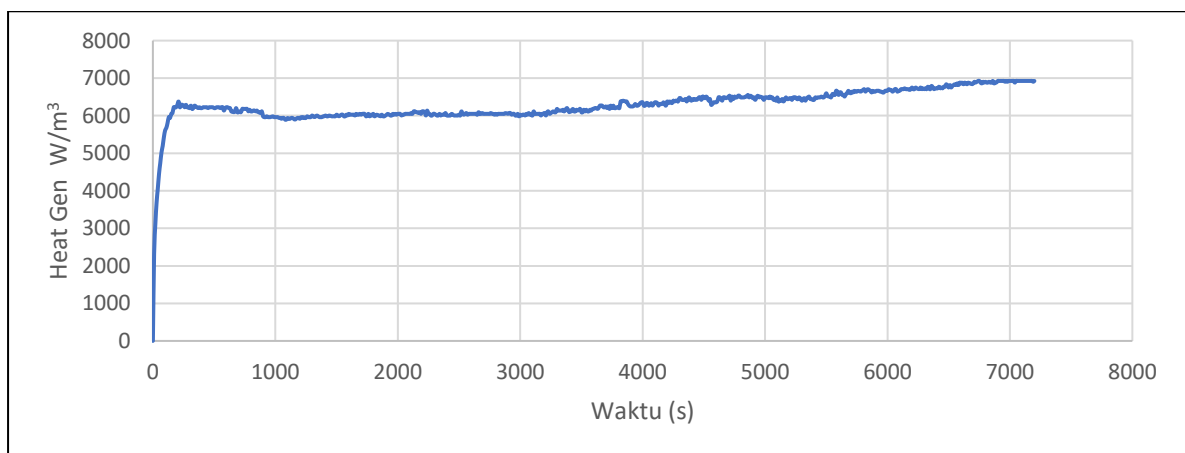
Gambar 4.1 Grafik Heat Generation Tiap Baterai pada Variasi Natural 2 cm



a

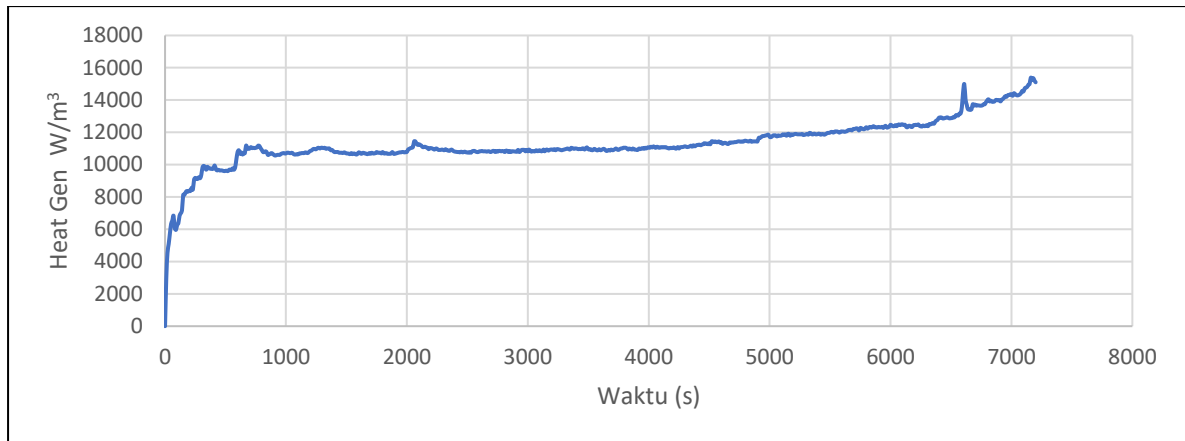


b

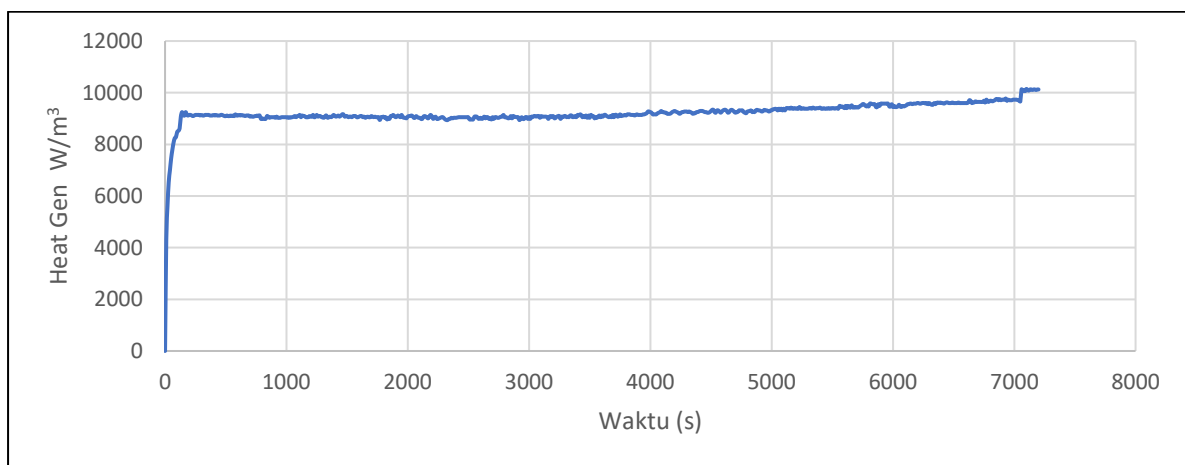


c

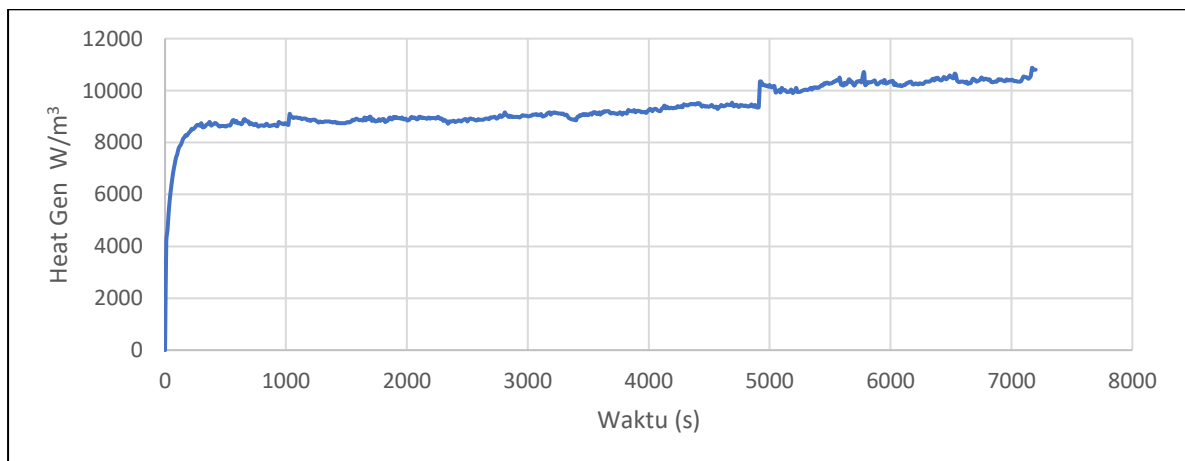
Gambar 4.2 Grafik Heat Generation Tiap Baterai pada Variasi Natural 7.6 cm



a

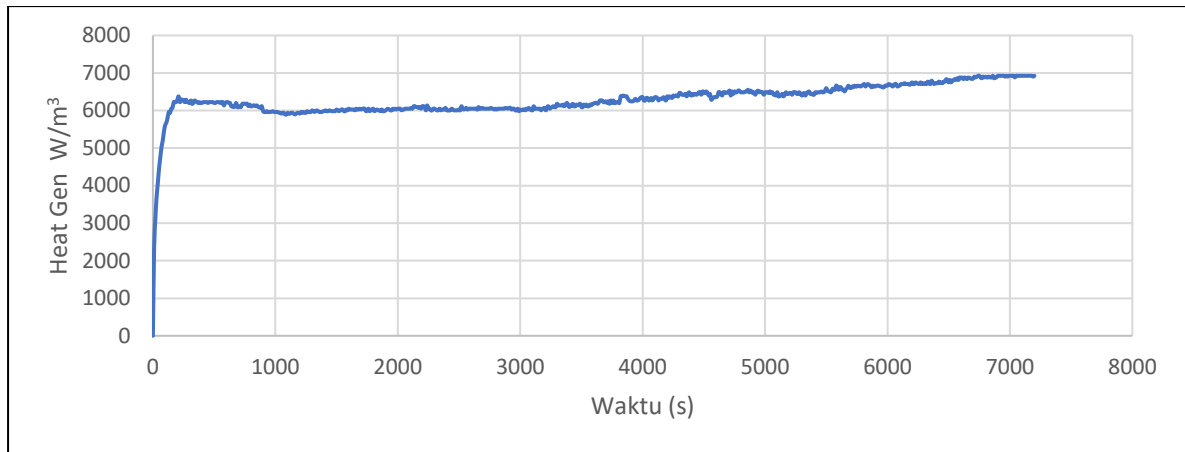


b

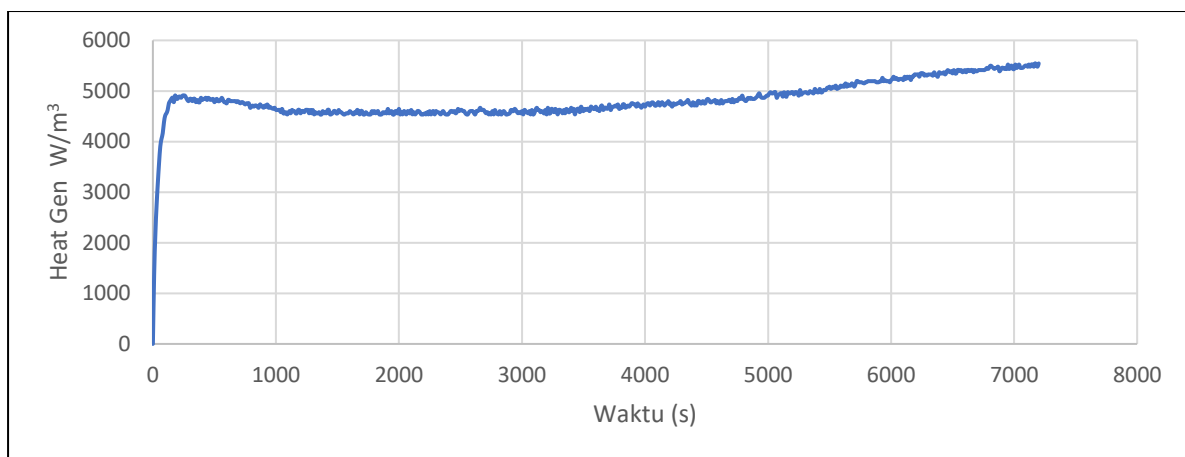


c

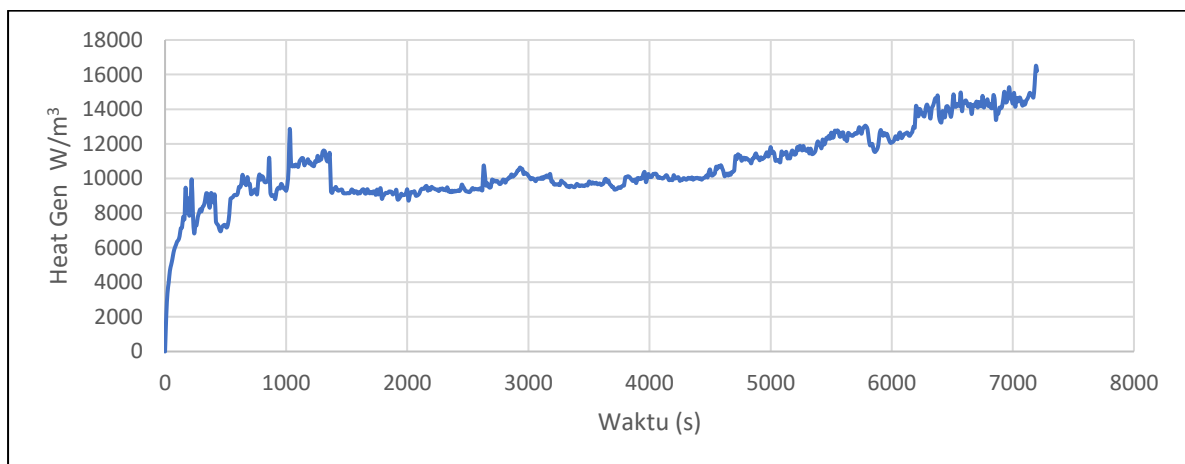
Gambar 4.3 Grafik Heat Generation Tiap Baterai pada Variasi Paksa 2 cm



a



b



c

Gambar 4.4 Grafik Heat Generation Tiap Baterai pada Variasi Paksa 7.6 cm

Setelah membuat grafik generasi panas terhadap waktu dari tiap baterai tiap variasi eksperimen, dapat dicari persamaan garisnya menggunakan Excel untuk dapat dimasukkan ke dalam Ansys Fluent sebagai UDF Expression. Namun untuk dapat memasukkan persamaan-persamaan tersebut diperlukan file tersendiri yang memiliki format (.c) dan perlu dimasukkan ke dalam file fluentnya. File format .c tersebut

berisi kode dengan Bahasa C++. Persamaan-persamaan tersebut dapat dilihat pada halaman lampiran. Berikut adalah table persamaan dari tiap baterai tiap variasi eksperimen.

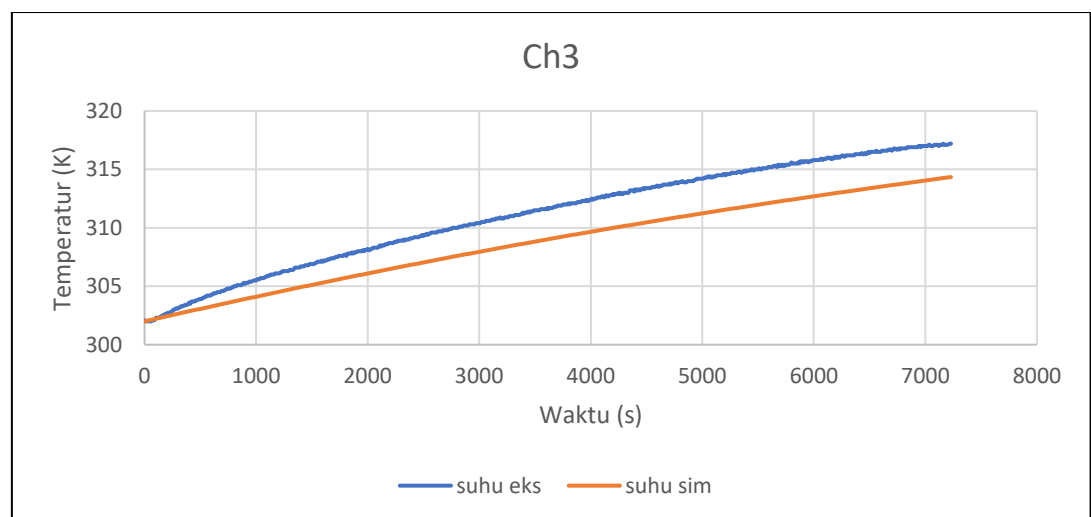
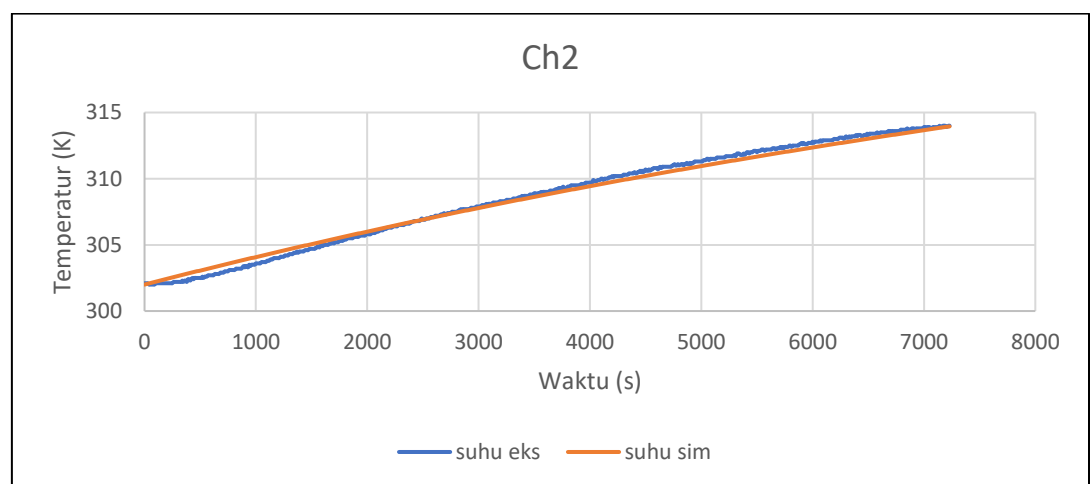
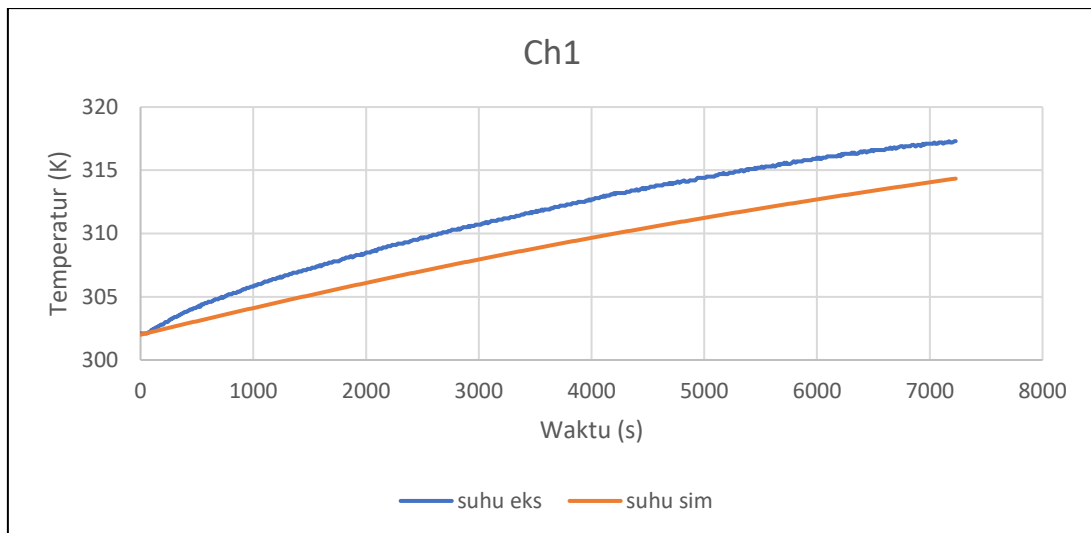
Tabel 4.1 Persamaan Grafik Generasi Panas Terhadap Waktu

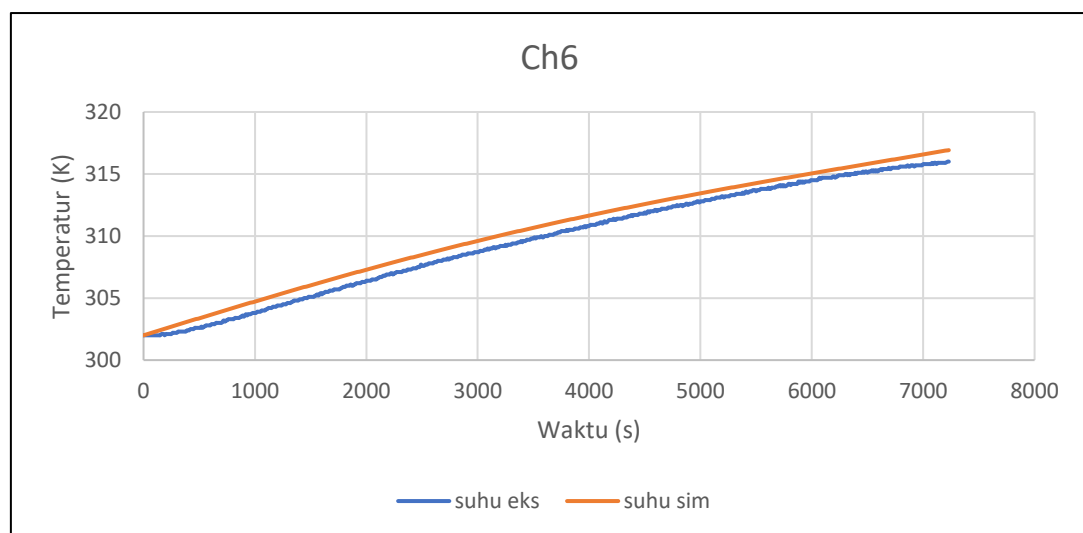
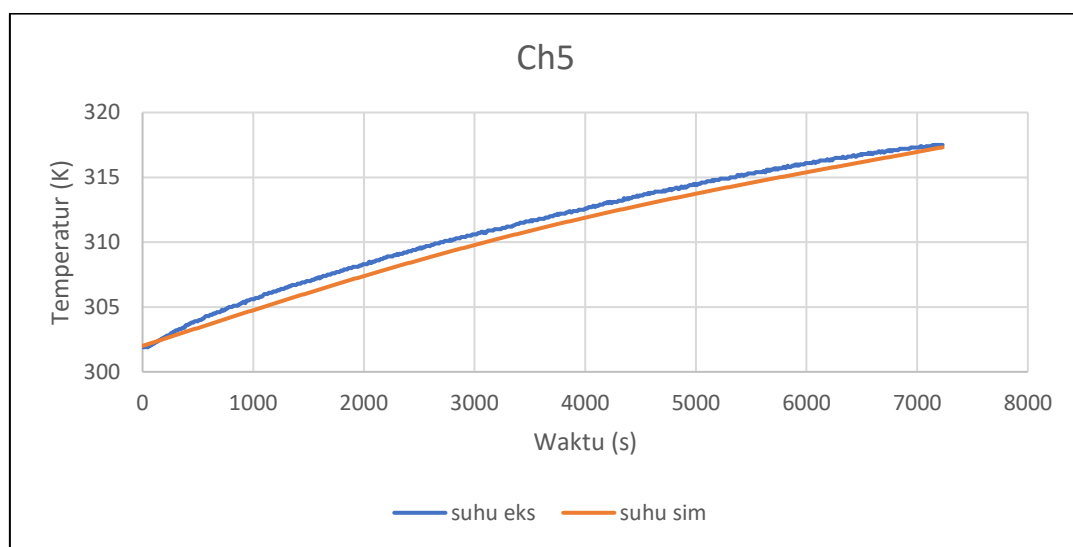
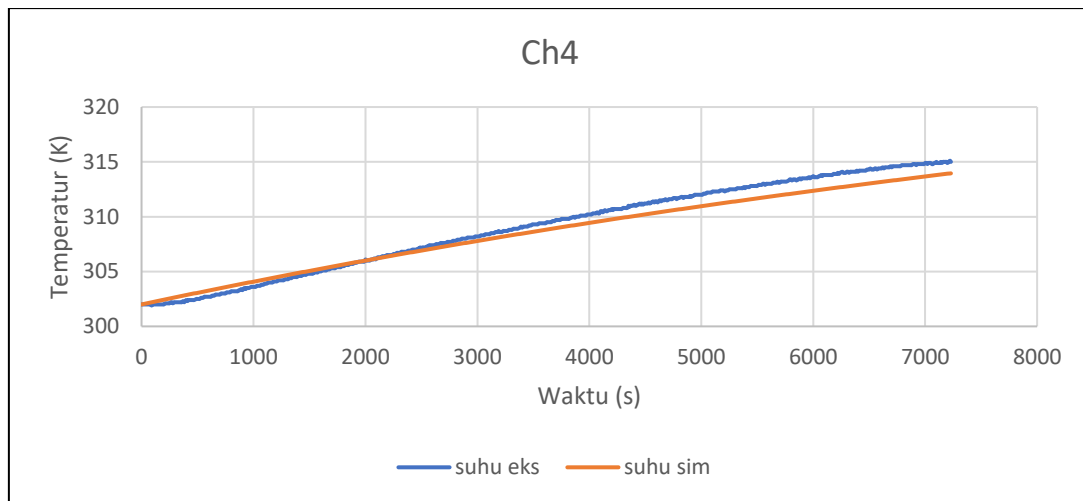
No	Variasi Eksperimen	Baterai	Persamaan
1.	Natural 2 cm	Baterai 1	$y = 1E-05x^2 - 0.0036x + 5172.8$
		Baterai 2	$y = 2E-08x^3 - 0.0002x^2 + 0.4956x + 6597.3$
		Baterai 3	$y = 1E-05x^2 + 0.0157x + 6814.8$
2.	Natural 7.6 cm	Baterai 1	$y = 2E-08x^3 - 0.0002x^2 + 0.729x + 5005$
		Baterai 2	$y = 2E-08x^3 - 0.0002x^2 + 0.5645x + 8475.5$
		Baterai 3	$y = 9E-06x^2 + 0.2722x + 6025.3$
3.	Paksa 2 cm	Baterai 1	$y = 8E-08x^3 - 0.0008x^2 + 2.8533x + 8070.7$
		Baterai 2	$y = 2E-08x^3 - 0.0002x^2 + 0.5517x + 8512.9$
		Baterai 3	$y = 7E-06x^2 + 0.2876x + 8189.3$
4.	Paksa 7.6 cm	Baterai 1	$y = 1E-05x^2 + 0.0743x + 5823$
		Baterai 2	$y = 6E-09x^3 - 3E-05x^2 + 0.098x + 4495.5$
		Baterai 3	$y = 7E-08x^3 - 0.0006x^2 + 1.9459x + 7579.1$

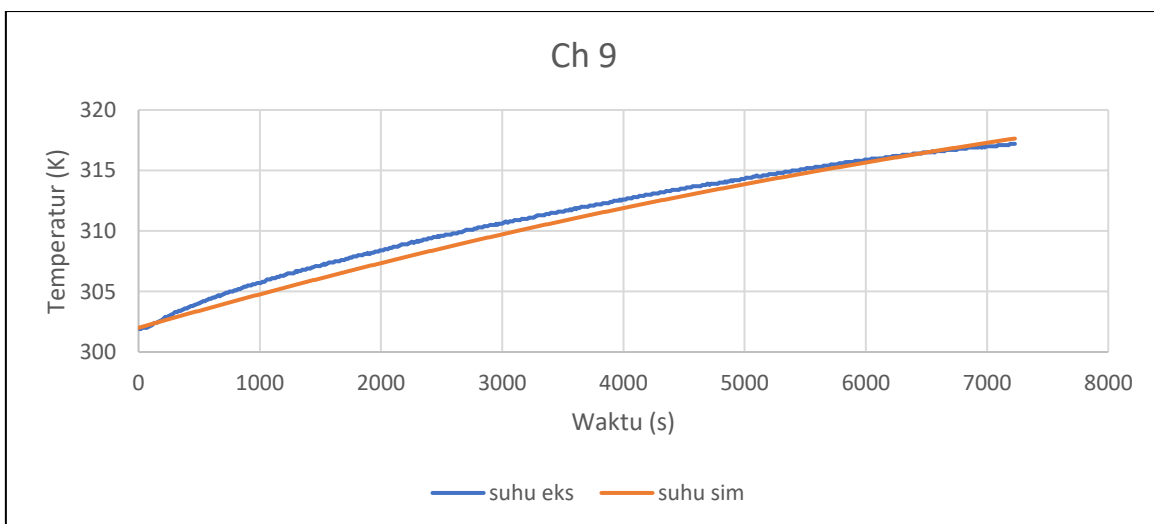
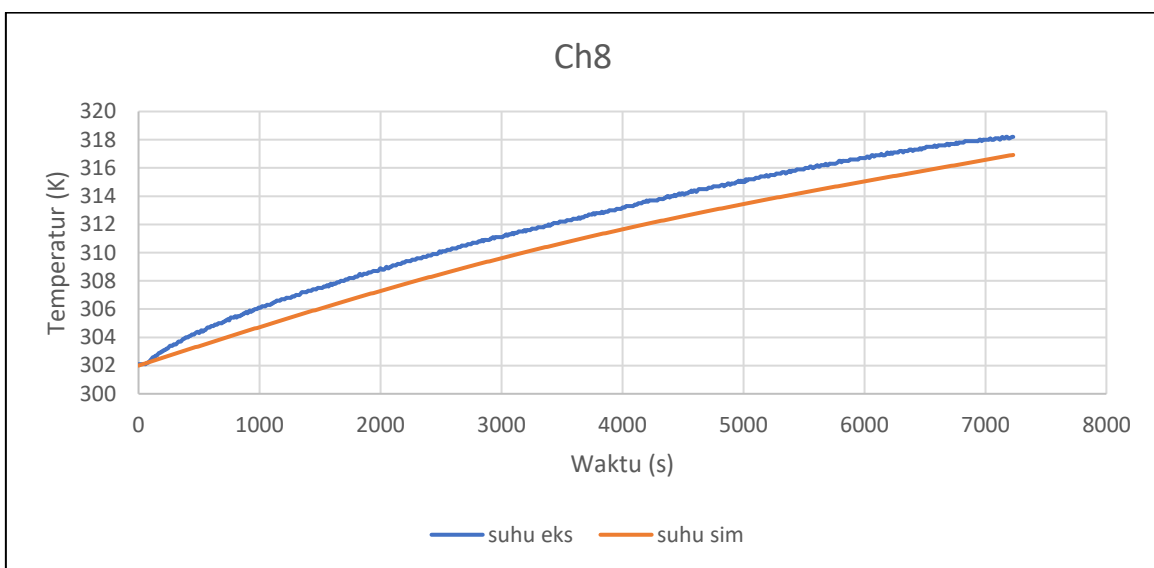
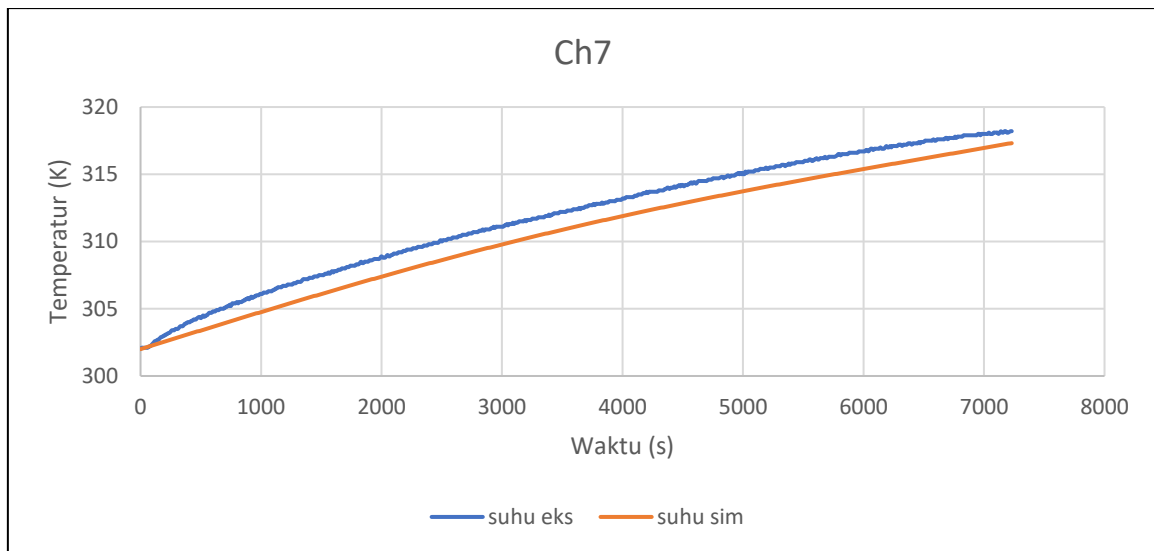
Dapat dilihat bahwa grafik generasi panas dari semua baterai memiliki tren semakin tinggi seiring bertambahnya waktu. Hal ini masuk akal karena semakin lama baterai mengeluarkan arus maka voltase baterai juga semakin menurun sehingga selisih antara V_{oc} dan V juga semakin besar seperti yang dikemukakan oleh Bernardi.

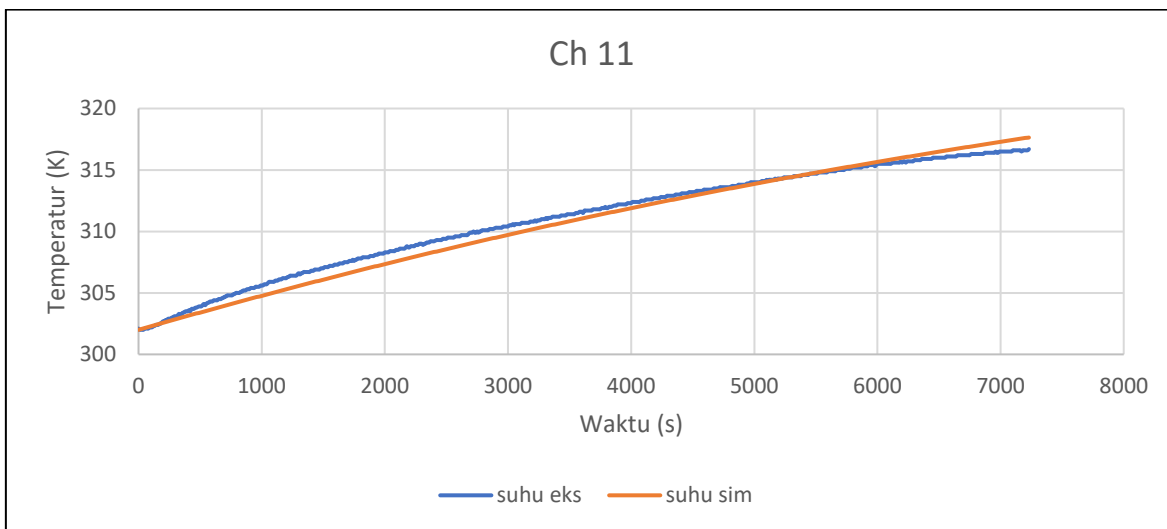
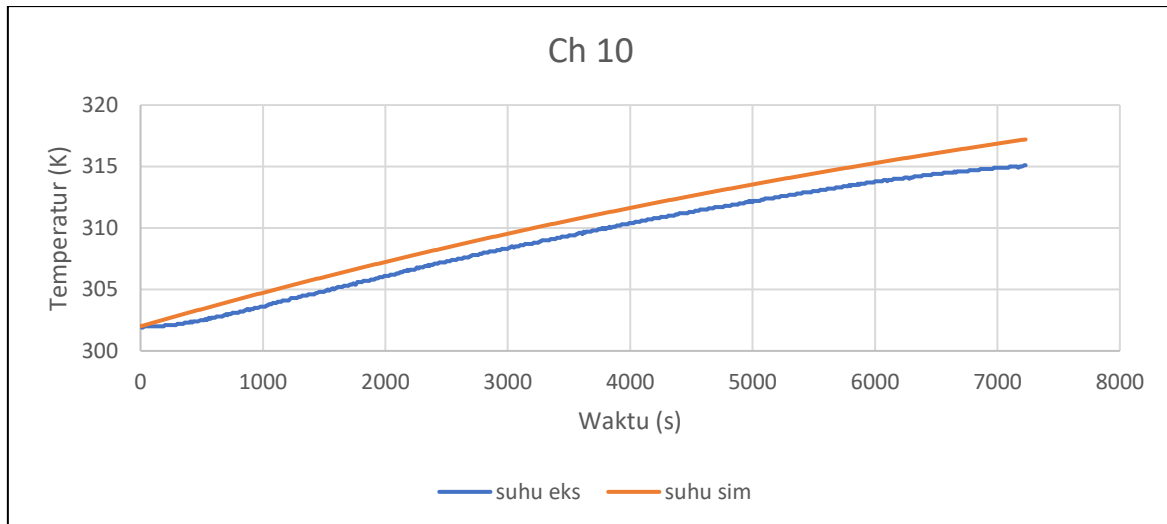
4.2.2 Konveksi Natural dengan Jarak 2cm

Berikut ini adalah perbandingan hasil suhu antara simulasi dan eksperimen pada variasi konveksi natural dengan jarak antar baterai 2 cm. Grafik dibagi berdasarkan tiap channelnya.









Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada Variasi Konveksi Natural 2 cm

Dari grafik perbandingan suhu antara hasil eksperimen dan simulasi diatas dapat dilihat bahwa tren yang dihasilkan bisa dikatakan sama walaupun nilai temperature

tidak sama persis. Pada channel 1 temperatur akhir yang dihasilkan dari simulasi sebesar 314.31 K dan untuk hasil dari eksperimen adalah 317.2 K. Pada channel 2 hasil temperature akhir dari simulasi adalah 313.92 K sementara itu dari hasil eksperimen sebesar 313.9 K. Pada channel 3 hasil simulasi sebesar 314.31 K dan hasil akhir dari eksperimen adalah 317.1 K. Pada channel 4 suhu akhir hasil simulasi sebesar 313.93 K dan dari eksperimen didapat sebesar 314.9 K. Pada Channel 5 suhu akhir yang didapat dari simulasi sebesar 317.28 K dan dari eksperimen didapat 317.5 K. Berikutnya pada channel 6 didapat dari simulasi temperaturnya sebesar 316.89 K sementara untuk hasil eksperimen didapat 315.9 K. Pada channel 7 didapat temperature pada hasil simulasi sebesar 317.28 K dan dari hasil eksperimen didapat 318.1 K. Berikutnya temperature akhir yang didapat dari simulasi dan eksperimen pada channel 8 berturut-turut adalah 316.89 K dan 318.1 K. Pada channel 9 temperatur akhir yang didapat dari simulasi dan eksperimen adalah 317.61 K dan 317.2 K. Pada channel 10 didapat temperature akhir sebesar 317.17 K dari hasil simulasi dan 315 K dari hasil eksperimen. Di channel 11 temperatur akhir yang didapat dari hasil simulasi menyentuh 317.61 K dan dari eksperimen menyentuh 316.6 K. Terakhir yaitu channel 12 didapat hasil simulasi sebesar 317.16 K dan dari eksperimen didapat 314.3 K.

Validasi dapat dilihat dengan perhitungan nilai error antara hasil eksperimen dan simulasi dengan metode RMSE. Metode RMSE dipilih karena lebih baik untuk dapat mencari nilai error pada nilai distribusi (Hwang, 2020). Target nilai RMSE yang dicapai adalah kurang dari 3°. Jika nilai RMSE sudah kurang dari 3°, maka hasil eksperimen sudah dapat dikatakan valid. Tabel dibawah adalah perbandingan nilai rata-rata temperature eksperimen dan simulasi beserta nilai errornya.

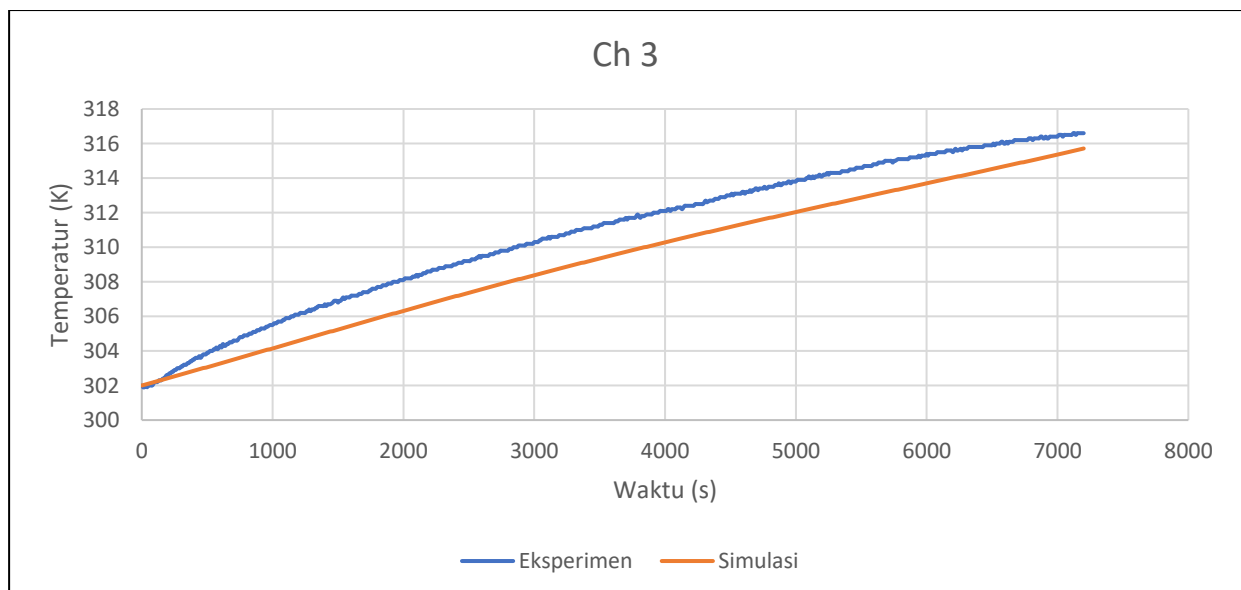
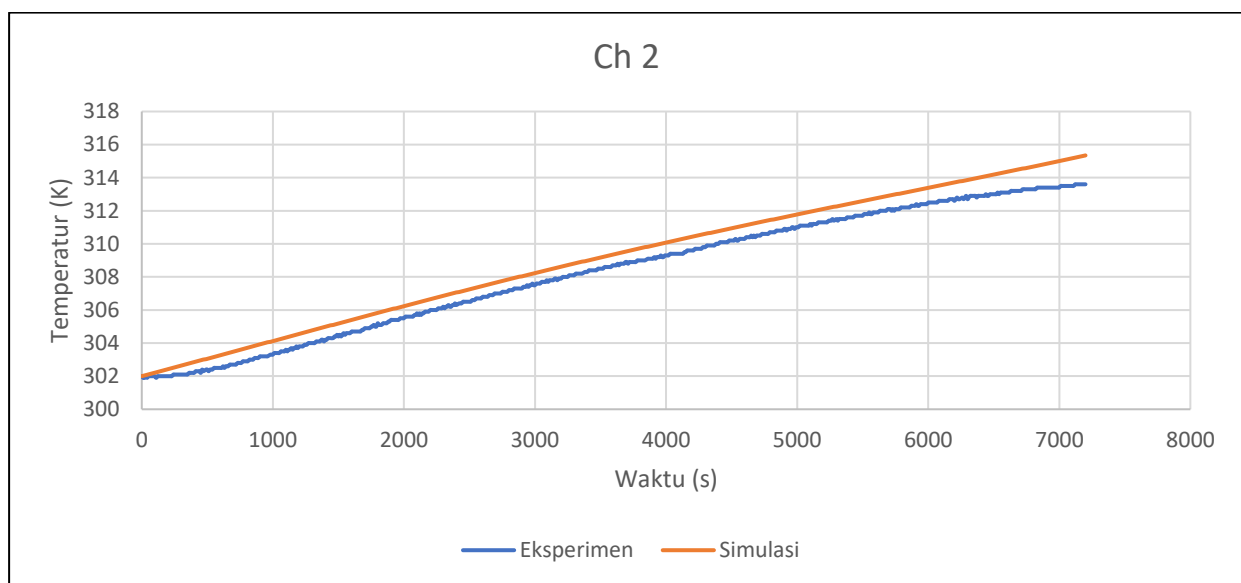
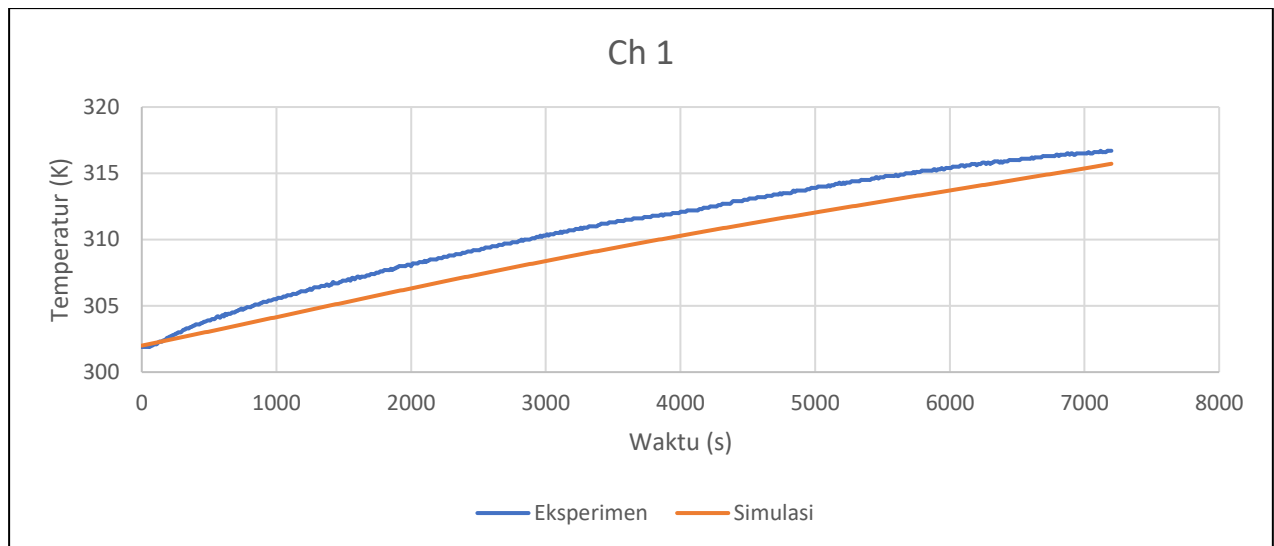
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - E_i)^2}$$

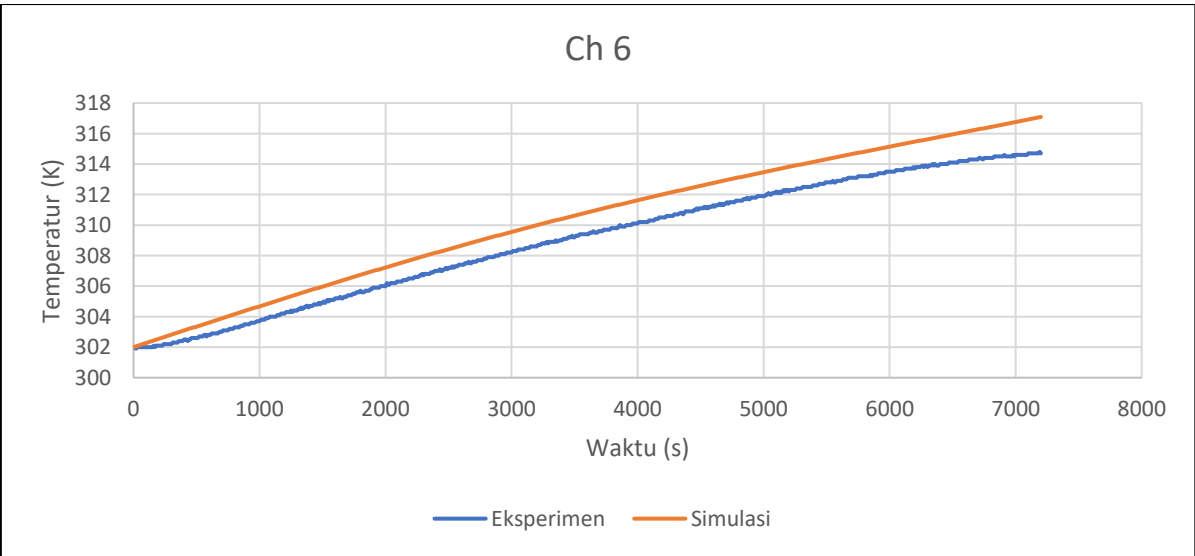
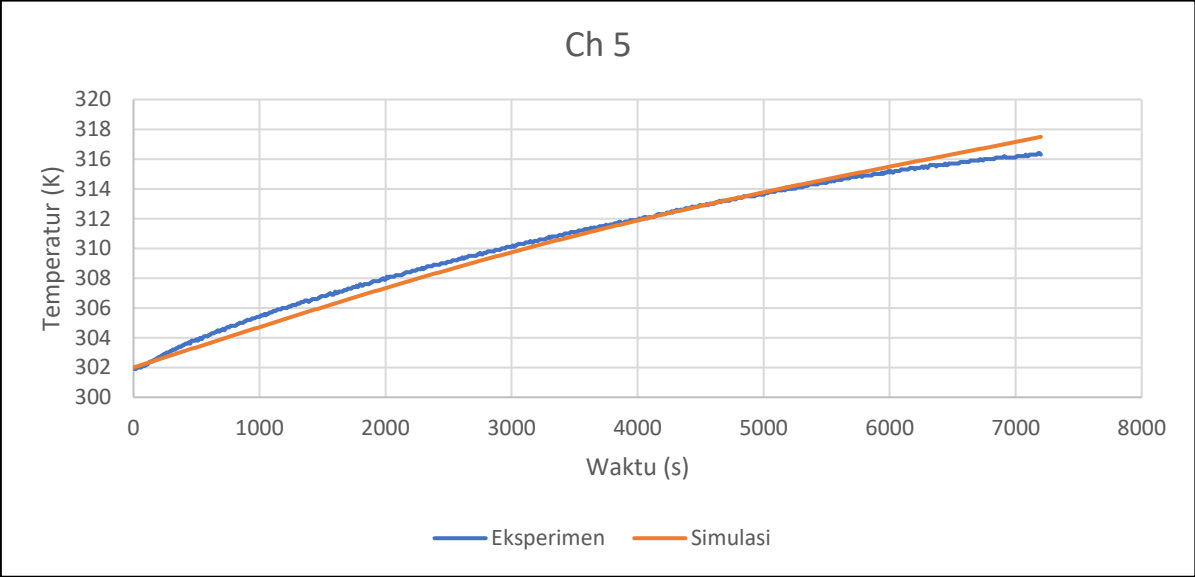
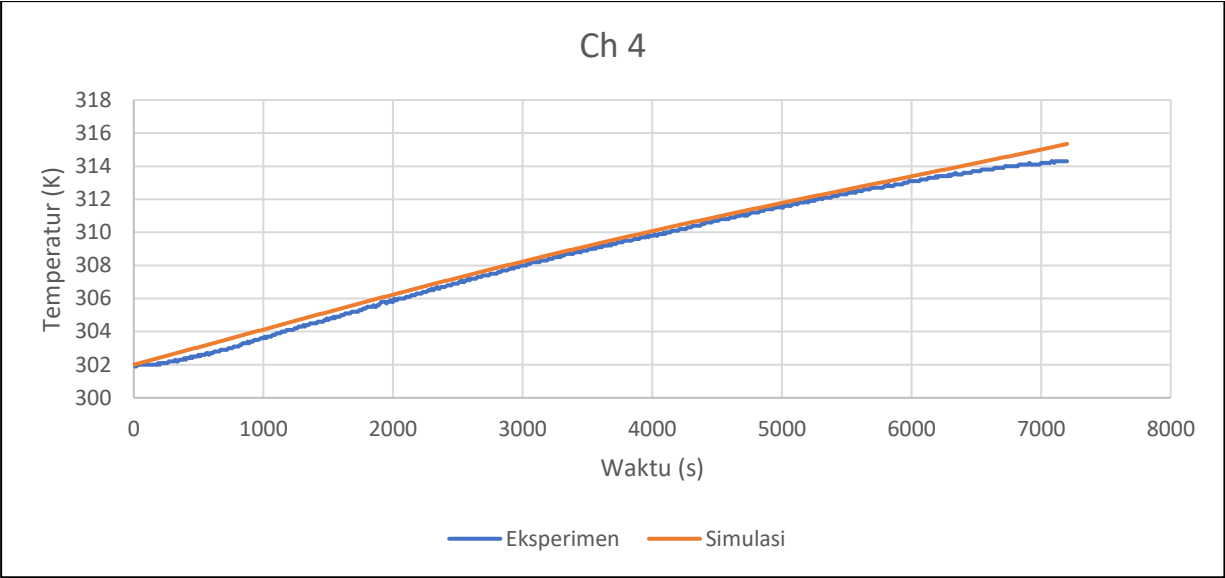
Tabel 4.2 Tabel Perhitungan RMSE Hasil Eksperimen dan Simulasi Variasi Natural 2 cm

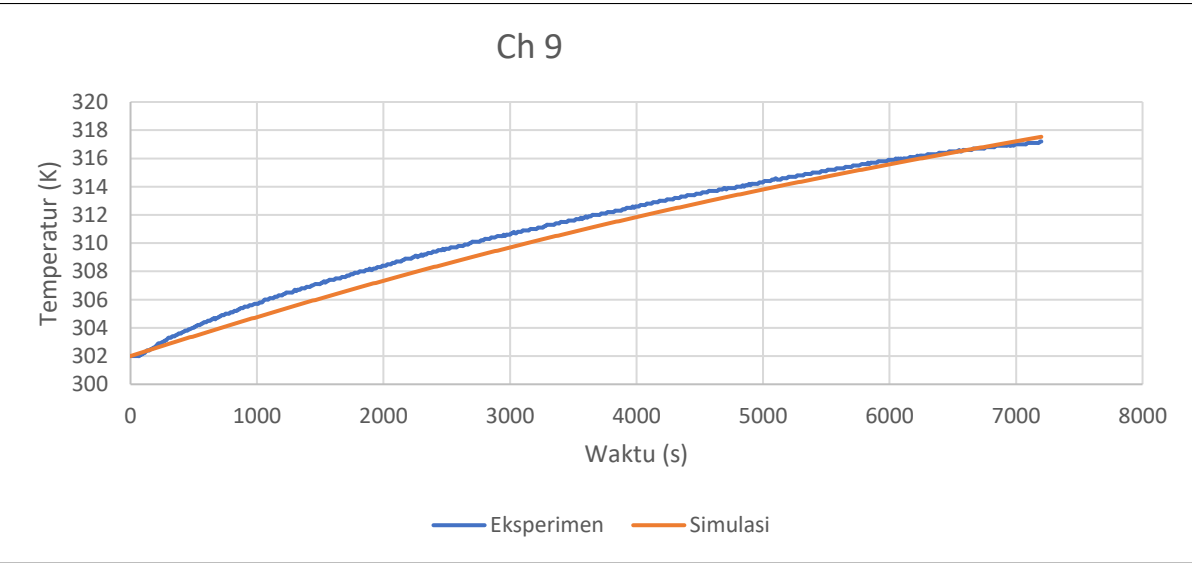
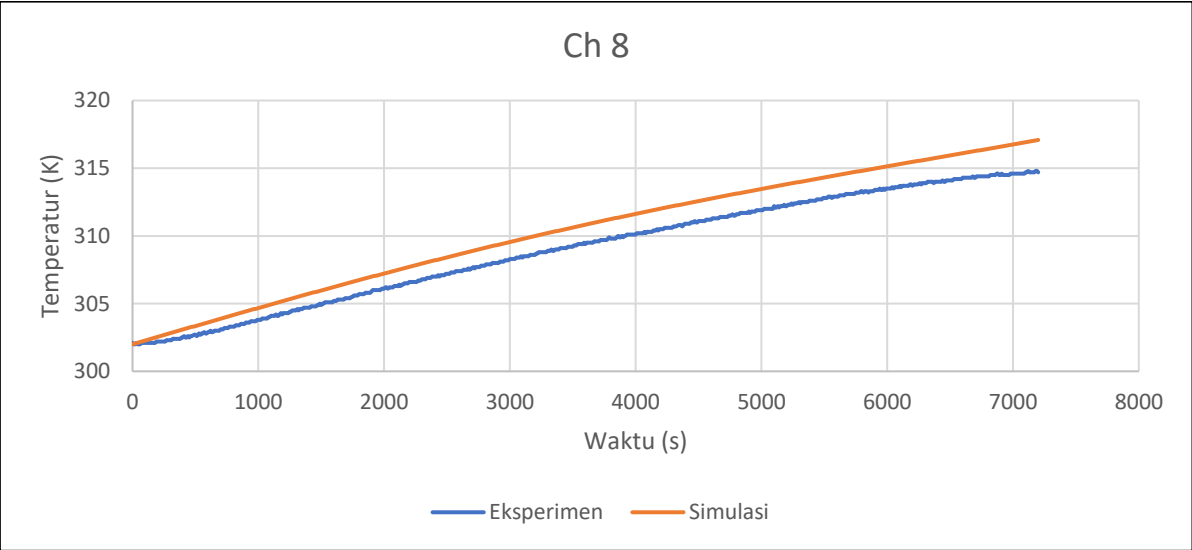
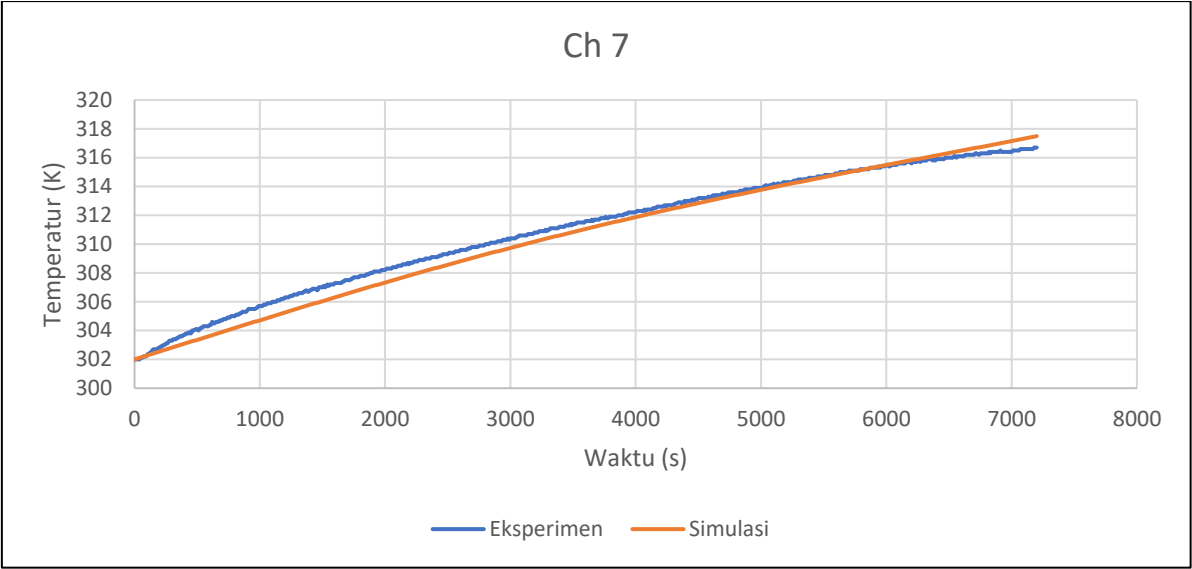
Channel	RMSE (K°)
1	2.687041732
2	0.33392008
3	2.475697968
4	0.820399461
5	0.726603702
6	0.773084534
7	1.275628082
8	1.481299167
9	0.717057127
10	1.309693107
11	0.620535093
12	1.676395295

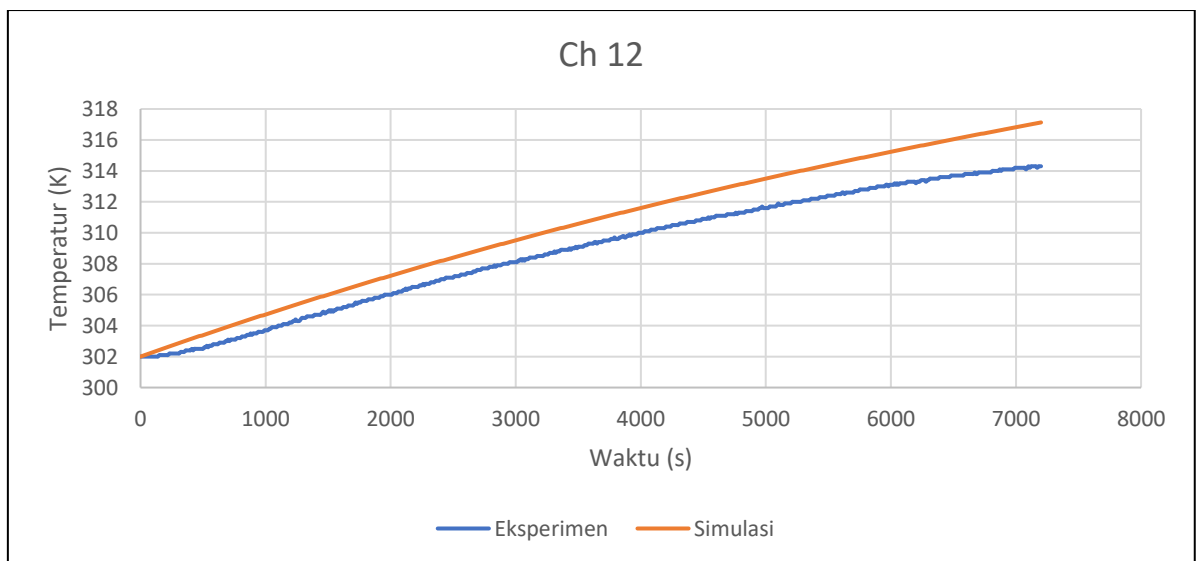
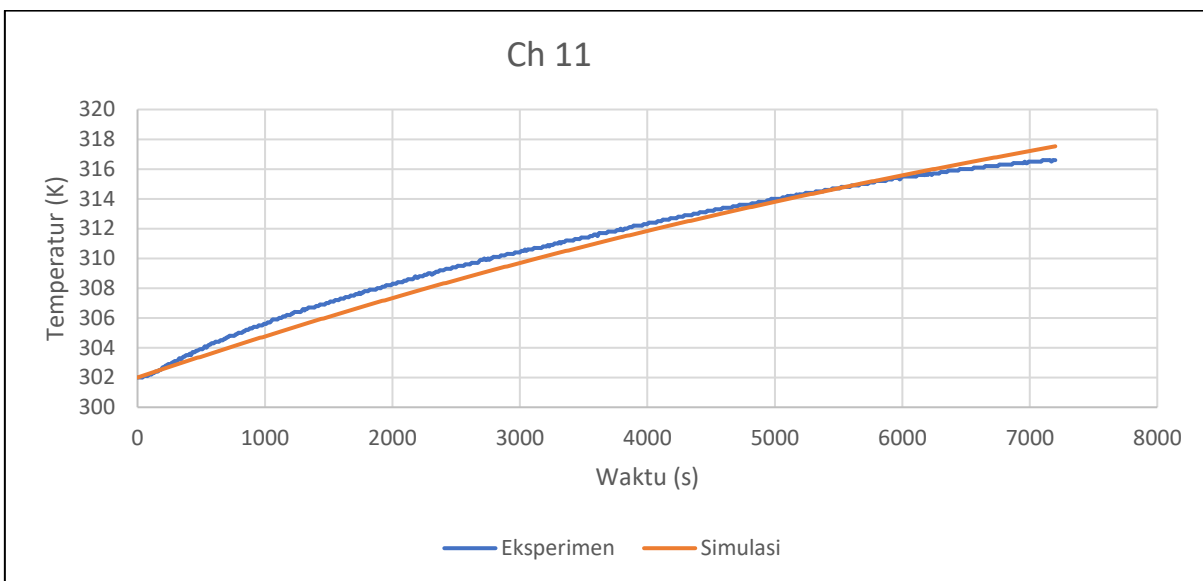
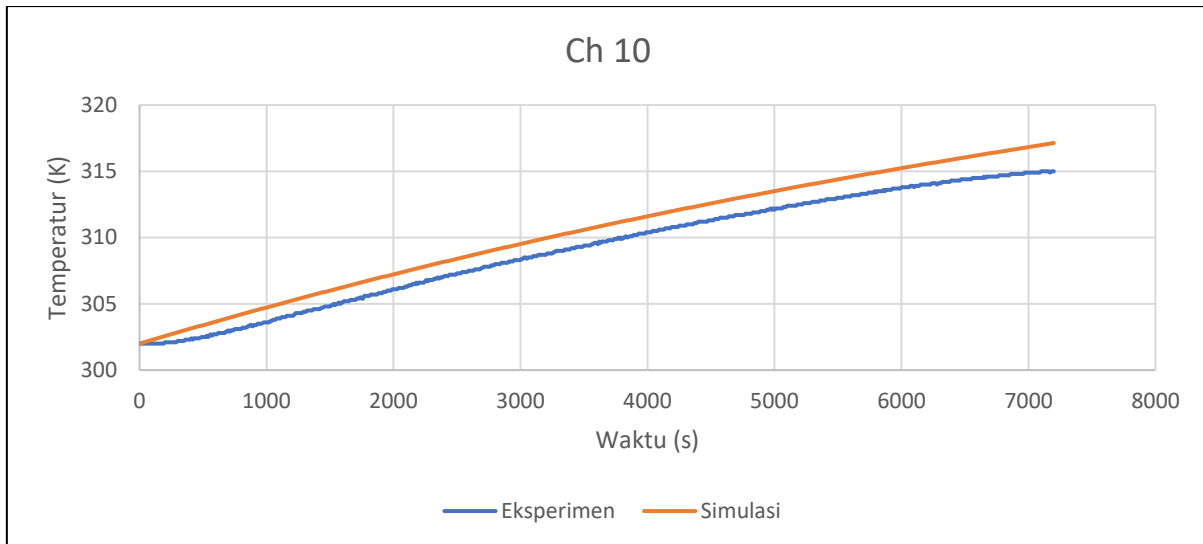
4.2.3 Konveksi Natural dengan Jarak 7.6 cm

Berikutnya adalah perbandingan temperature baterai dari hasil eksperimen dan hasil simulasi.









Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada Variasi Konveksi Natural 7.6 cm

Dapat dilihat dari grafik yang dihasilkan bahwa tren peningkatan temperature dari eksperimen dan simulasi serupa walau nilai temperaturnya tidak tepat sama. Pada channel 1 temperatur akhir yang dihasilkan dari eksperimen sebesar 316.7 K dan untuk hasil dari simulasi adalah 316.7 K. Pada channel 2 hasil temperature akhir dari eksperimen adalah 313.6 K sementara itu dari hasil simulasi sebesar 315.35 K. Pada channel 3 hasil eksperimen sebesar 316.6 K dan hasil akhir dari simulasi adalah 315.72 K. Pada channel 4 suhu akhir hasil eksperimen sebesar 316.3 K dan dari simulasi didapat sebesar 315.35 K. Pada Channel 5 suhu akhir yang didapat dari eksperimen sebesar 314.7 K dan dari simulasi didapat 317.49 K. Berikutnya pada channel 6 didapat dari eksperimen temperaturnya sebesar 316.7 K sementara untuk hasil simulasi didapat 317.09 K. Pada channel 7 didapat temperature pada hasil eksperimen sebesar 314.7 K dan dari hasil simulasi didapat 317.49 K. Berikutnya temperature akhir yang didapat dari eksperimen dan simulasi pada channel 8 berturut-turut adalah 317.2 K dan 317.09 K. Pada channel 9 temperatur akhir yang didapat dari eksperimen dan simulasi adalah 315 K dan 317.53 K. Pada channel 10 didapat temperature akhir sebesar 316.6 K dari hasil eksperimen dan 317.14 K dari hasil simulasi. Di channel 11 temperatur akhir yang didapat dari hasil eksperimen menyentuh 316.6 K dan dari simulasi menyentuh 317.53 K. Terakhir yaitu channel 12 didapat hasil eksperimen sebesar 314.3 K dan dari simulasi didapat 317.13 K.

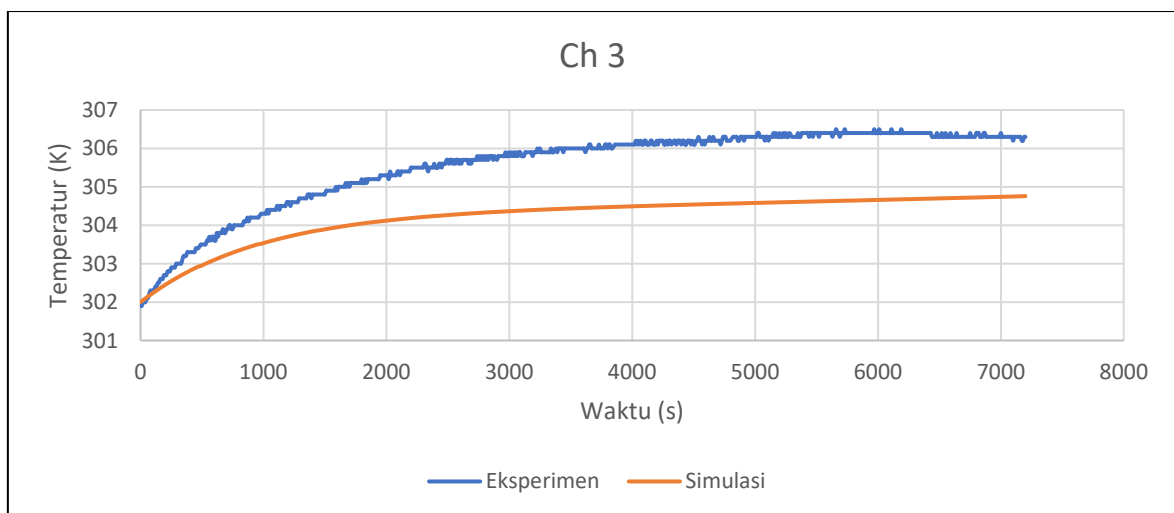
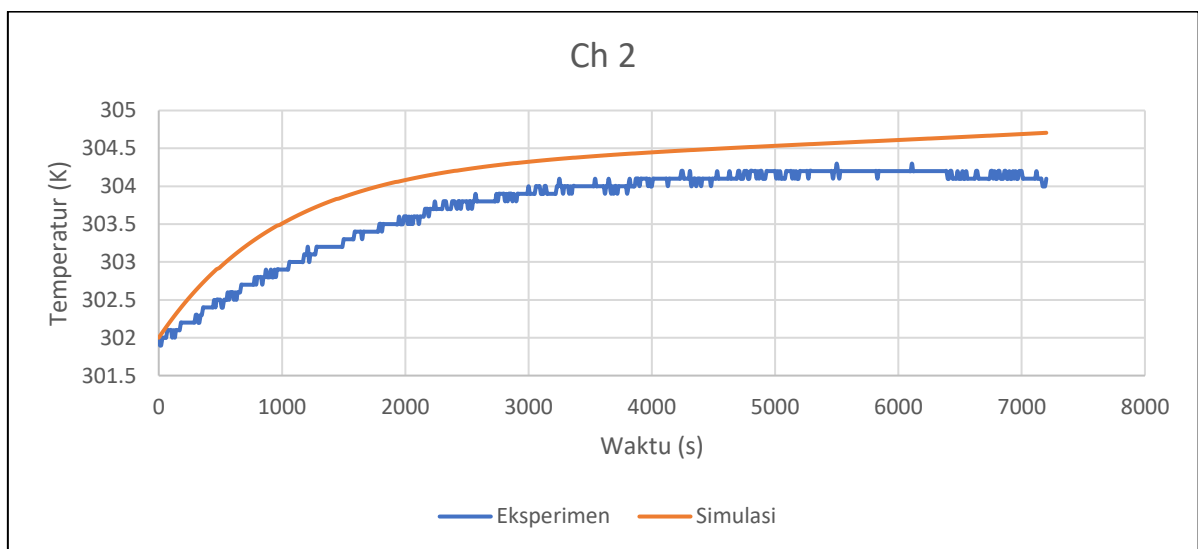
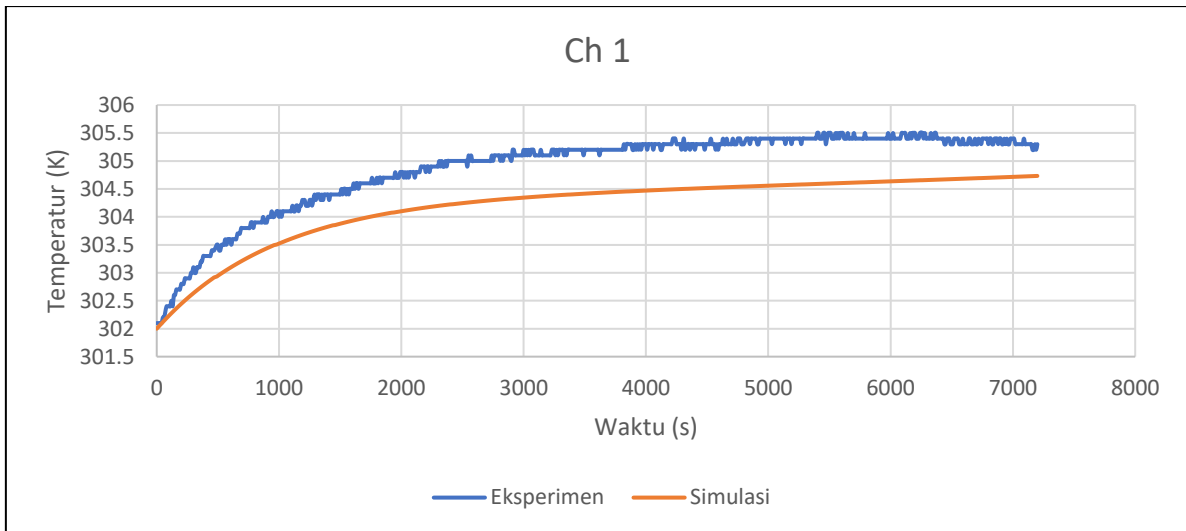
Tabel 4.3 Tabel RMSE untuk Variasi Konveksi Natural Jarak 7.6 cm

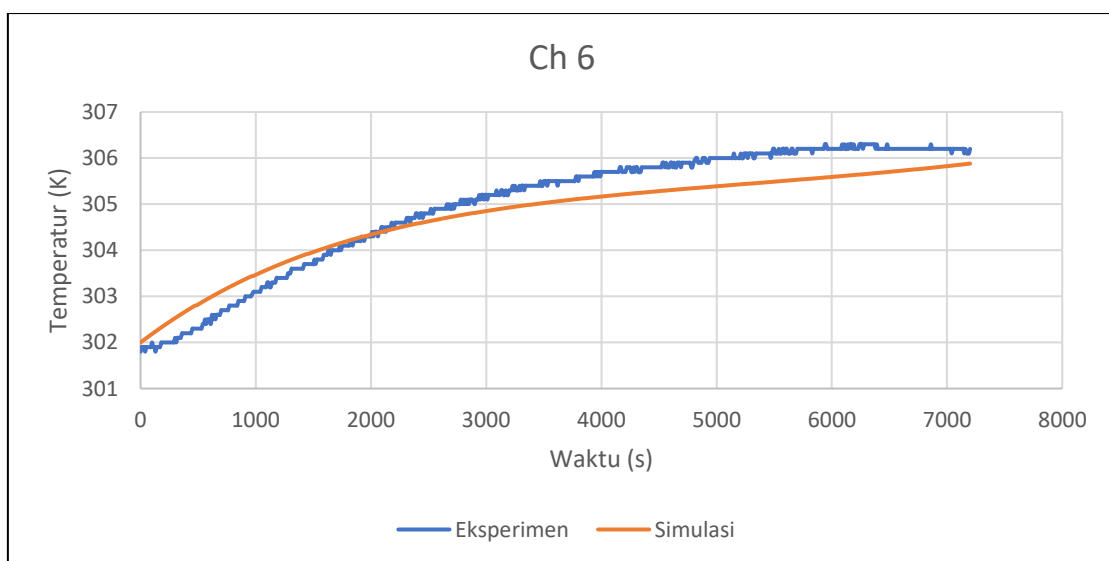
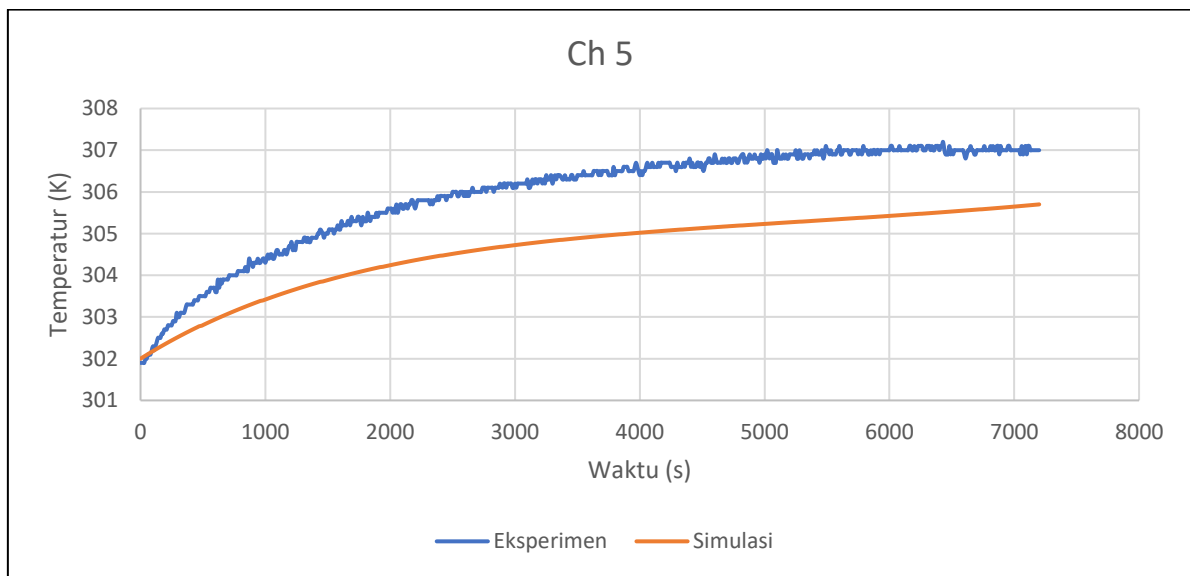
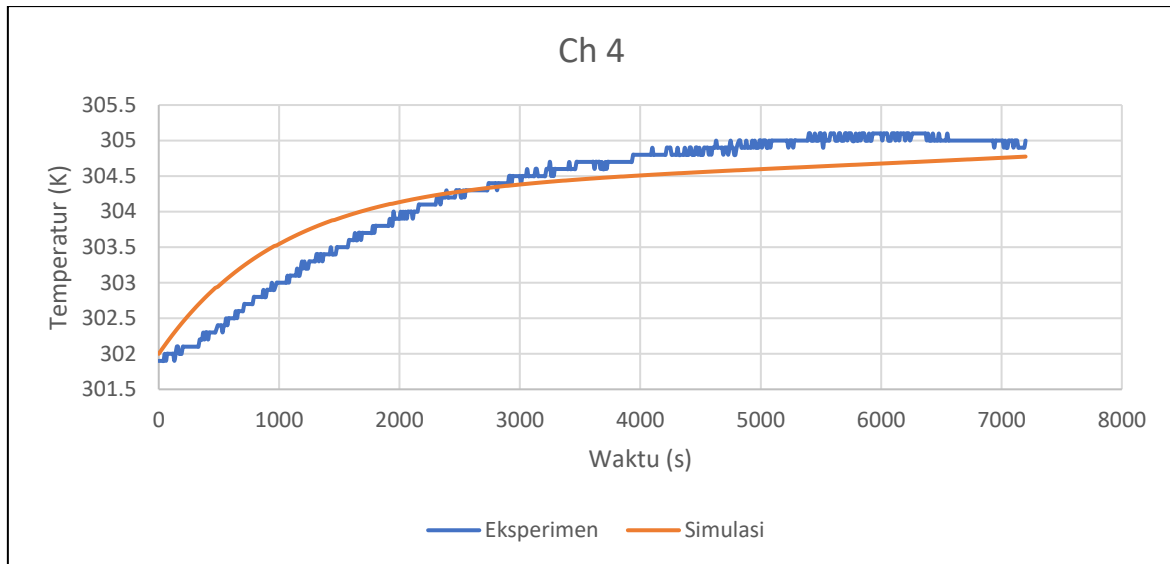
Channel	RMSE (K°)
1	1.632459964
2	0.848272413
3	1.609647737
4	0.399064533
5	0.497889777
6	1.400770423
7	0.597994764
8	1.386053479
9	0.737543739
10	1.28259762
11	0.619397765
12	1.647924887

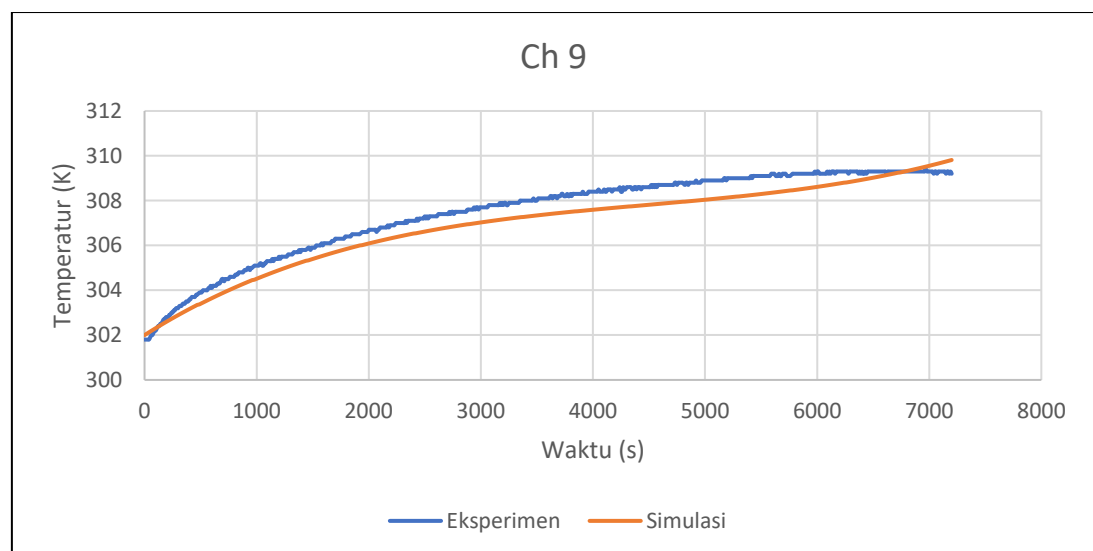
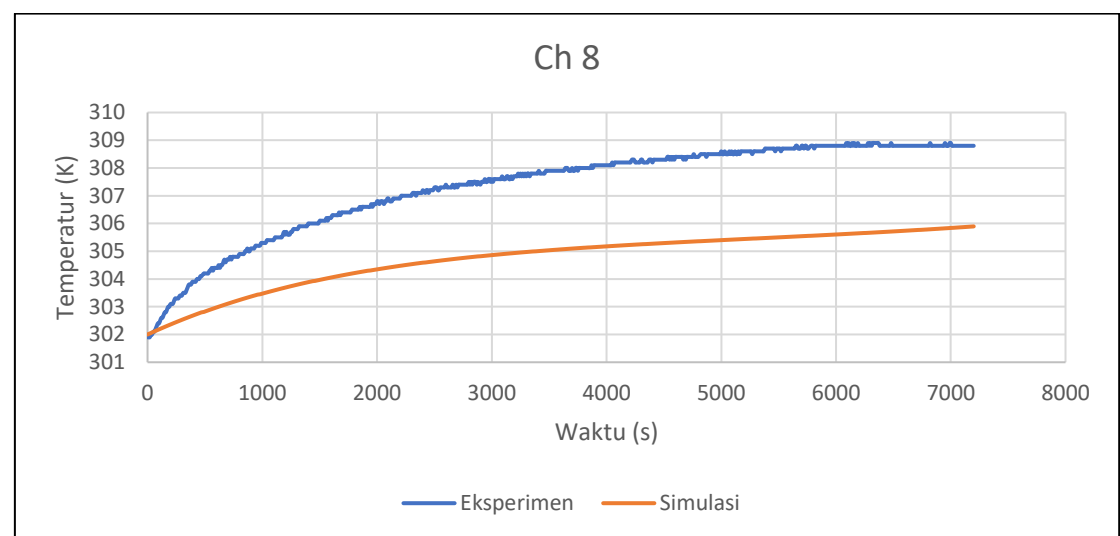
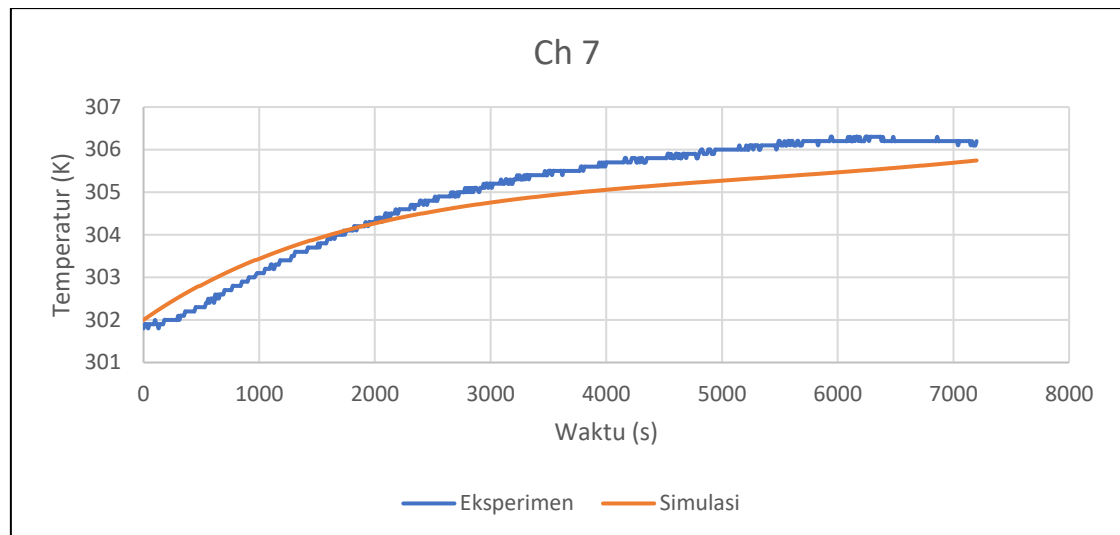
Tabel RMSE dari variasi konveksi natural dengan jarak antar baterai 7.6 cm menunjukkan bahwa tidak ada nilai RMSE yang melebihi 3° seperti yang disarankan Hwang yang dapat diinterpretasikan bahwa hasil eksperimen valid.

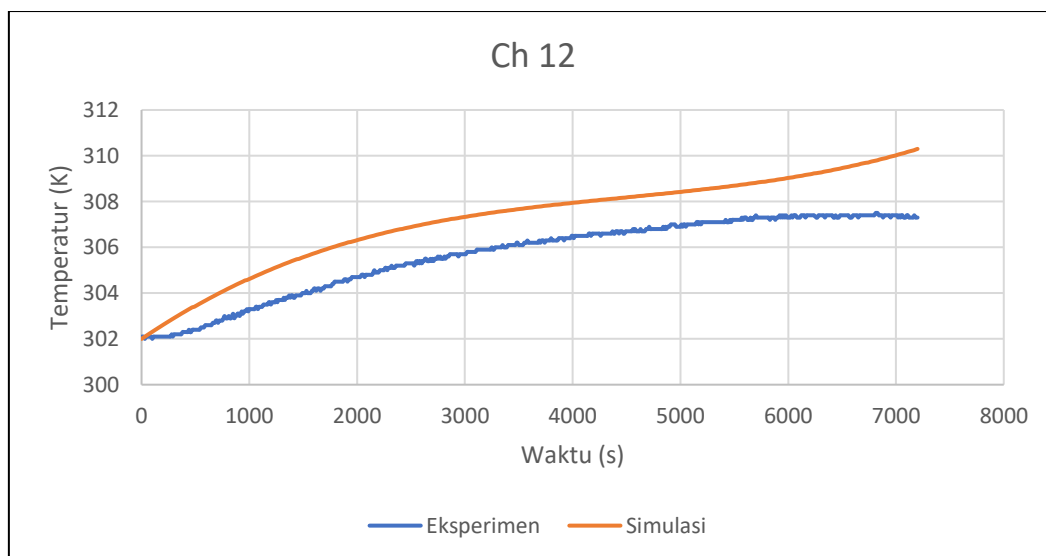
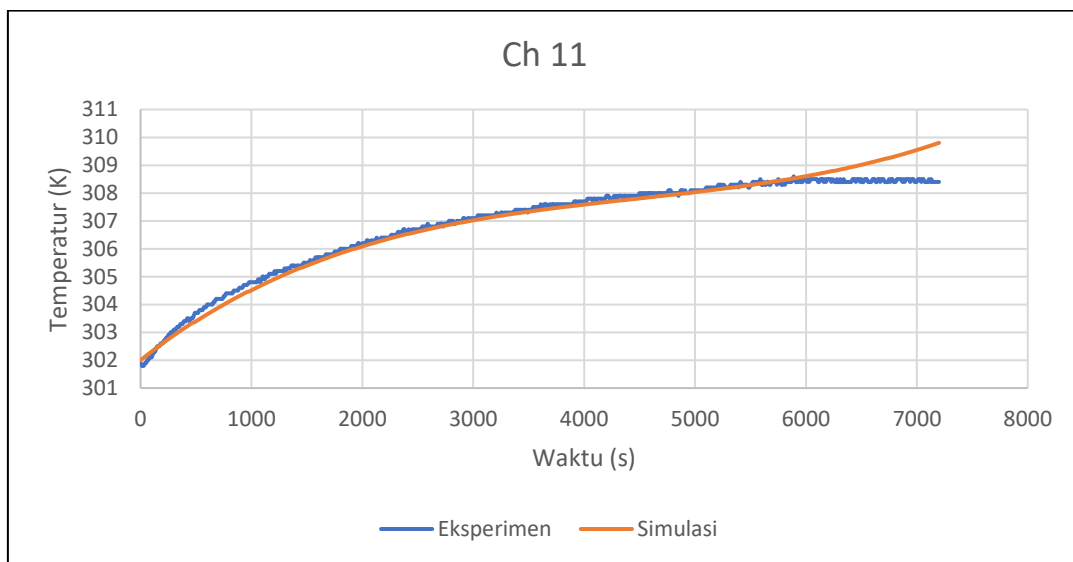
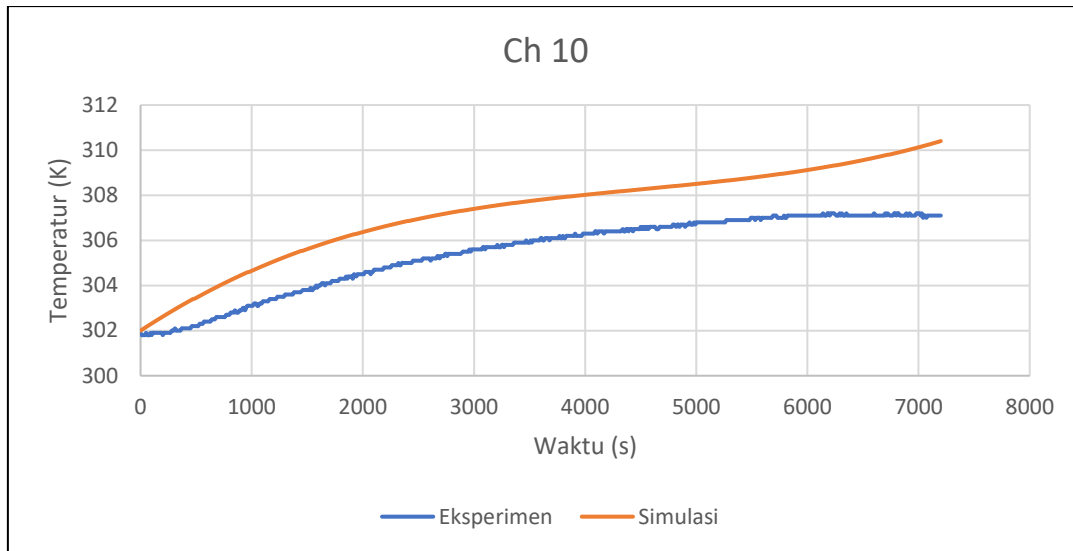
4.2.4 Konveksi Paksa dengan Jarak 2 cm

Berikut adalah grafik perbandingan antara temperature tiap channel pada variasi konveksi paksa dengan jarak antar baterai 2 cm selama 7200 detik.









Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada Variasi Konveksi Paksa 2 cm

Grafik diatas menunjukkan bahwa tren yang dihasilkan dari simulasi maupun eksperimen memiliki kesamaan. Validasi lebih lanjut dapat dilihat dari table RMSE dibawah ini.

Tabel 4.4 Tabel RMSE Variasi Konveksi Paksa dengan Jarak 2 cm

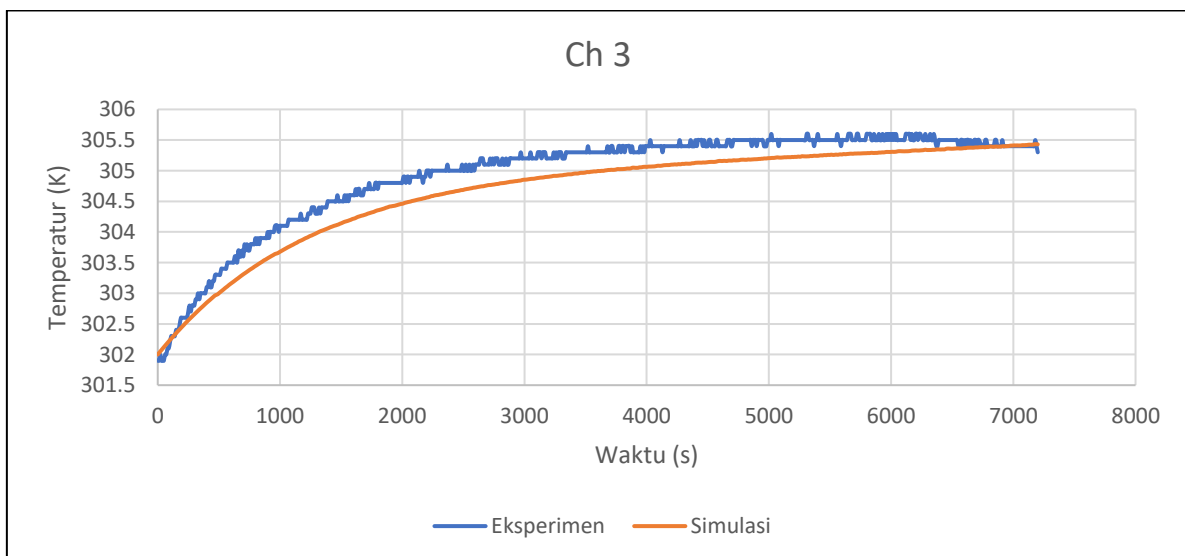
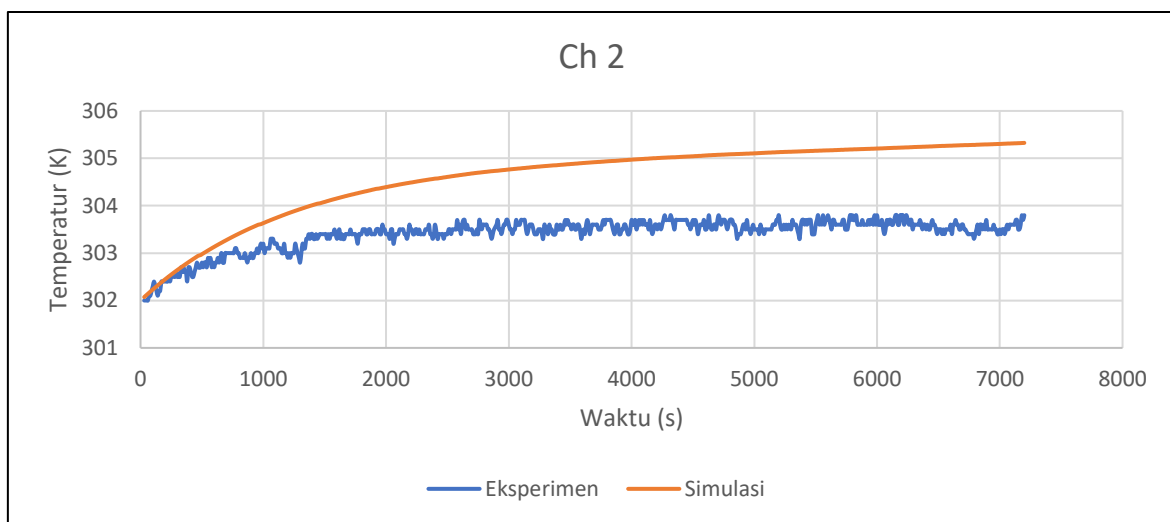
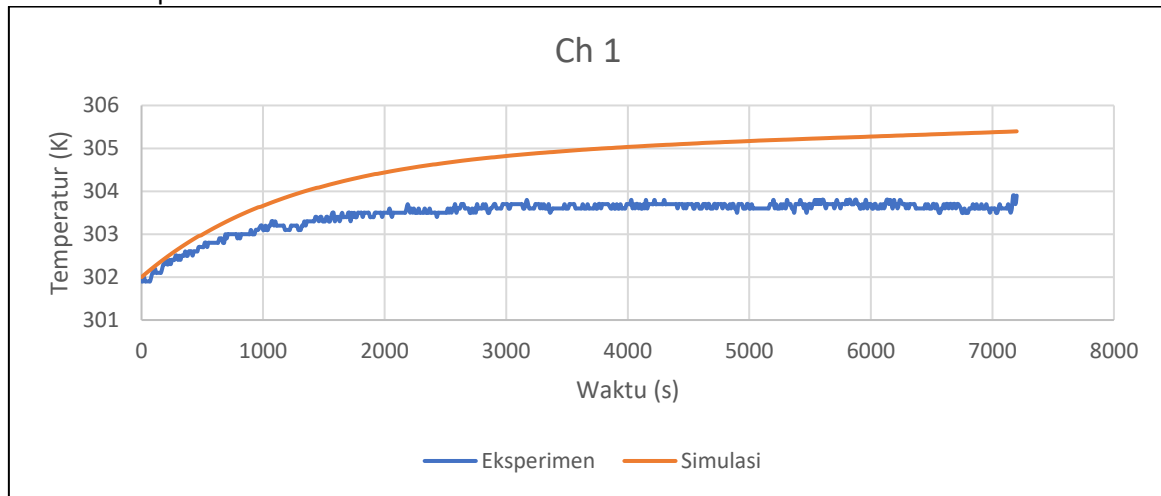
Channel	RMSE (K°)
1	0.697406993
2	0.454818025
3	1.40291259
4	0.34164997
5	1.360972536
6	0.442984769
7	0.524591257
8	2.643351612
9	0.615662507
10	1.872018976
11	0.343449709
12	1.610849917

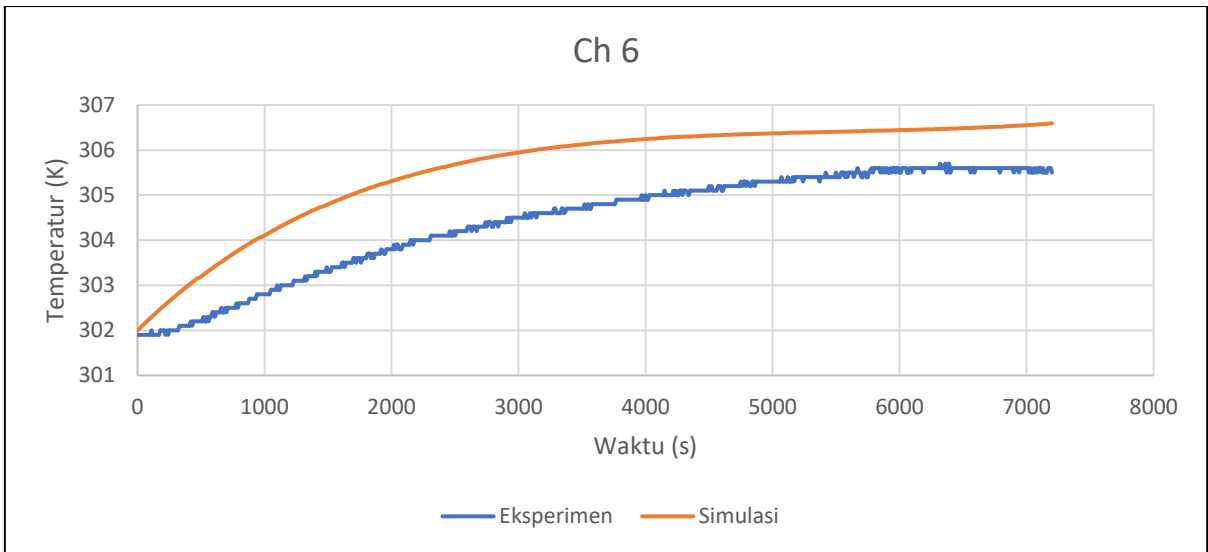
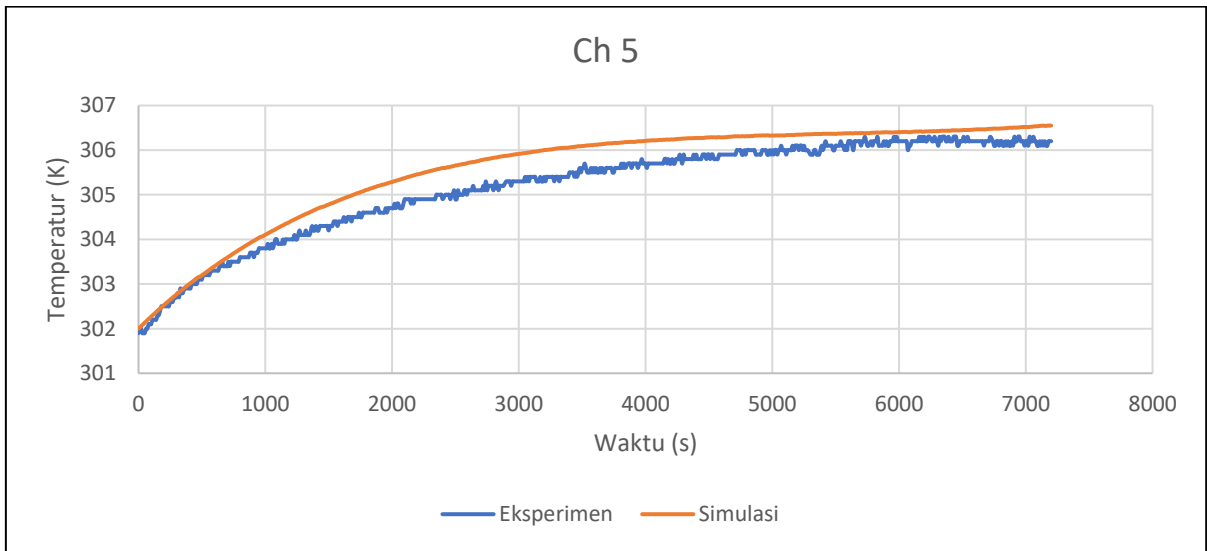
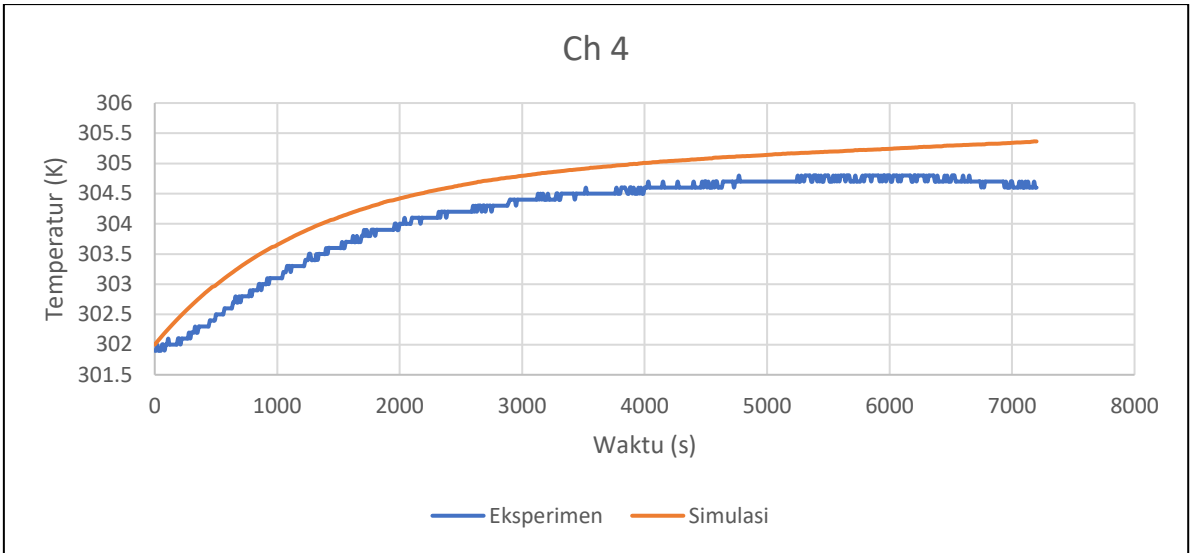
Tabel diatas menunjukkan bahwa hamper semua pengukuran baterai dari tiap channel adalah baik karena nilainya dibawah 3°. Akan tetapi terdapat dua channel yang memiliki nilai RMSE lebih dari tiga yaitu pada channel 8 dan 10. Hal tersebut mungkin terjadi karena kondisi baterai yang sudah tidak dalam kondisi prima. Baterai mengalami penurunan voltase secara drastic saat mengeluarkan arus konstan. Akan tetapi dapat dilihat dari channel 9 hingga 12 yang diambil dari baterai tiga, suhu tiap channel menunjukkan kenaikan pada bagian akhir simulasi hingga mendekati 311 K. Hal ini terjadi karena nilai heat generation yang didapatkan dari baterai tersebut memiliki kenaikan pada bagian akhir seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3c.

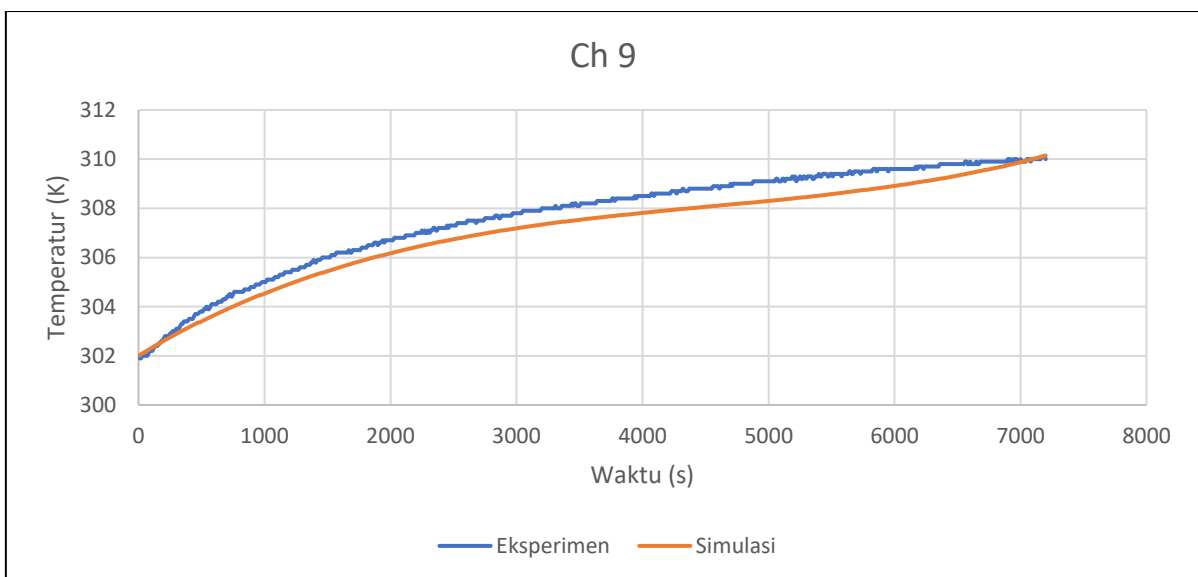
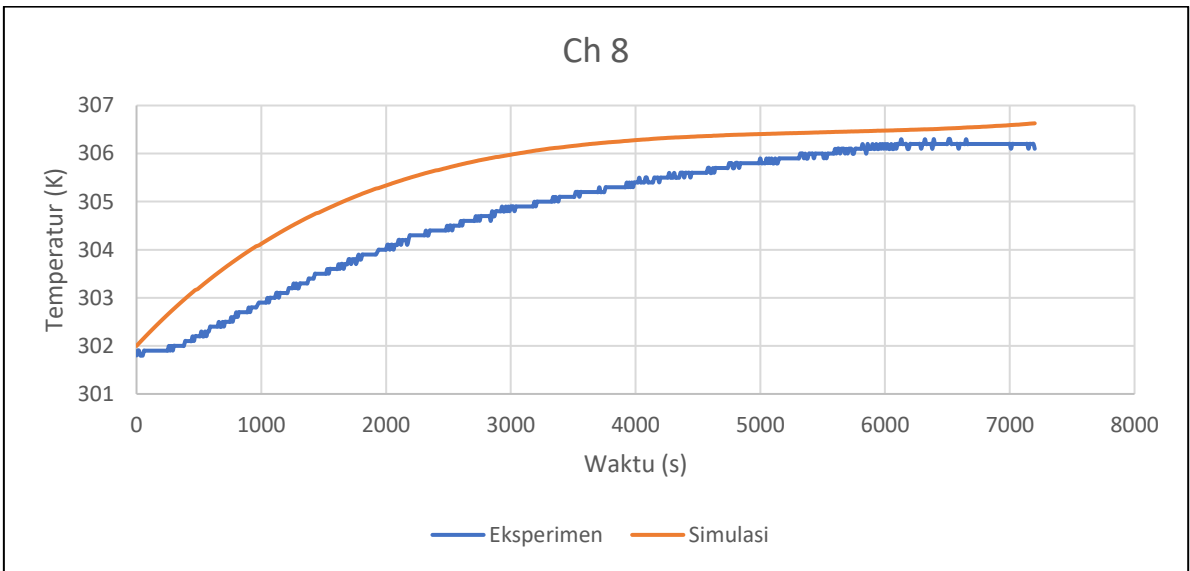
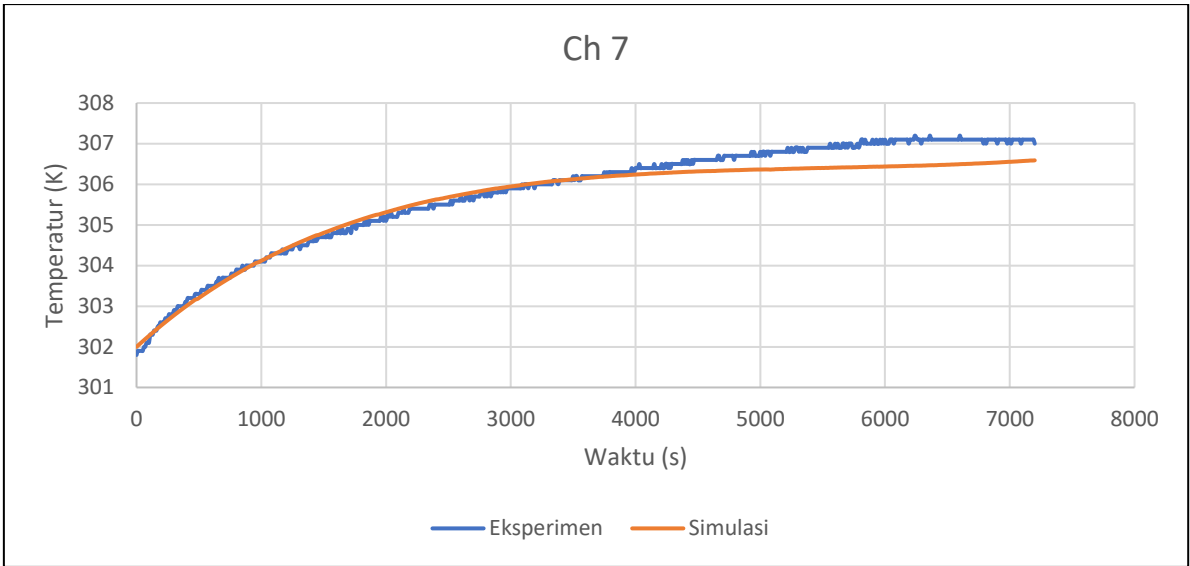
Pada channel 1 temperatur akhir yang dihasilkan dari simulasi sebesar 304.73 K dan untuk hasil dari eksperimen adalah 305.3 K. Pada channel 2 hasil temperature akhir dari simulasi adalah 304.71 K sementara itu dari hasil eksperimen sebesar 304.1 K. Pada channel 3 hasil simulasi sebesar 304.76 K dan hasil akhir dari eksperimen adalah 306.3 K. Pada channel 4 suhu akhir hasil simulasi sebesar 304.77 K dan dari eksperimen didapat sebesar 305 K. Pada Channel 5 suhu akhir yang didapat dari simulasi sebesar 305.7 K dan dari eksperimen didapat 307 K. Berikutnya pada channel 6 didapat dari simulasi temperaturnya sebesar 305.88 K sementara untuk hasil eksperimen didapat 306.2 K. Pada channel 7 didapat temperature pada hasil simulasi sebesar 305.75 K dan dari hasil eksperimen didapat 306.2 K. Berikutnya temperature akhir yang didapat dari simulasi dan eksprimen pada channel 8 berturut-turut adalah 305.9 K dan 308.8 K. Pada channel 9 temperatur akhir yang didapat dari simulasi dan eksperimen adalah 309.81 K dan 309.2 K. Pada channel 10 didapat temperature akhir sebesar 310.4 K dari hasil simulasi dan 307.1 K dari hasil eksperimen. Di channel 11 temperatur akhir yang didapat dari hasil simulasi menyentuh 309.8 K dan dari eksperimen menyentuh 308.4 K. Terakhir yaitu channel 12 didapat hasil simulasi sebesar 310.3 K dan dari eksperimen didapat 307.3 K.

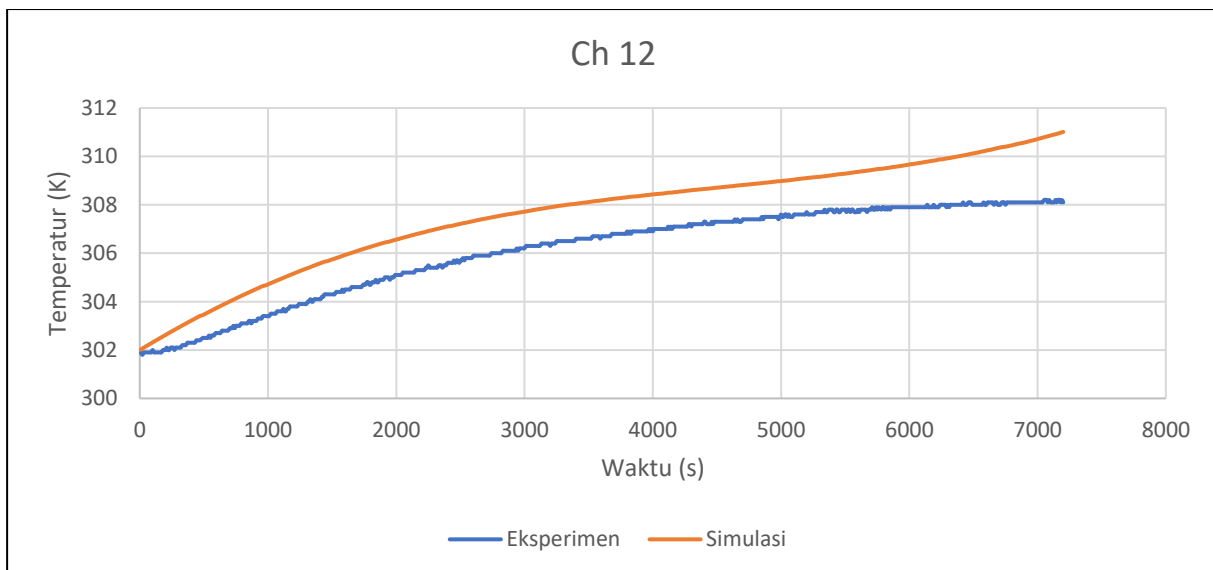
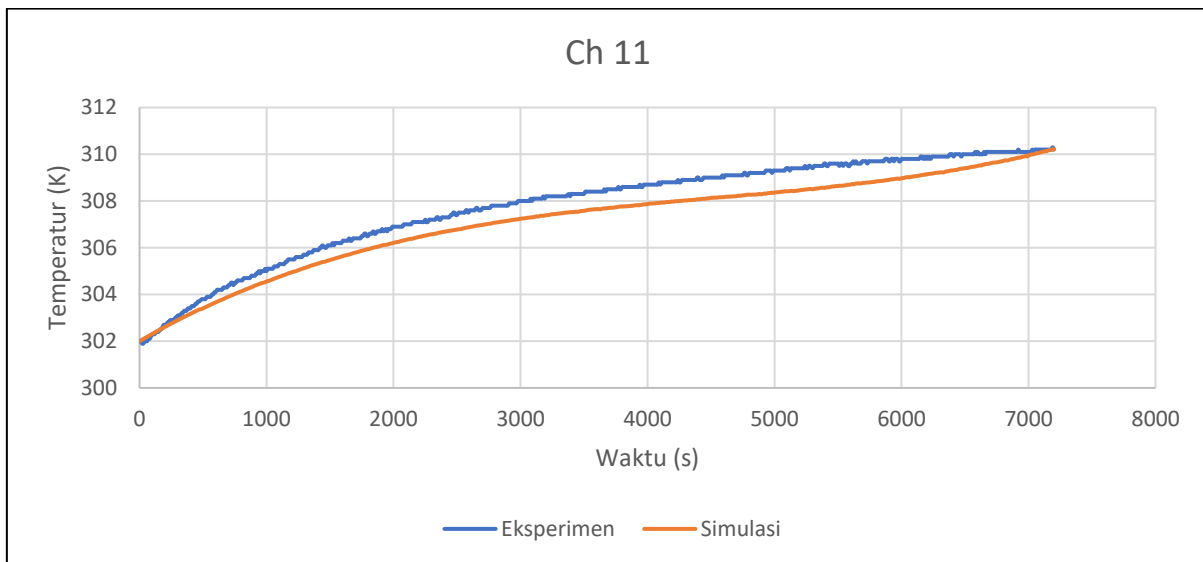
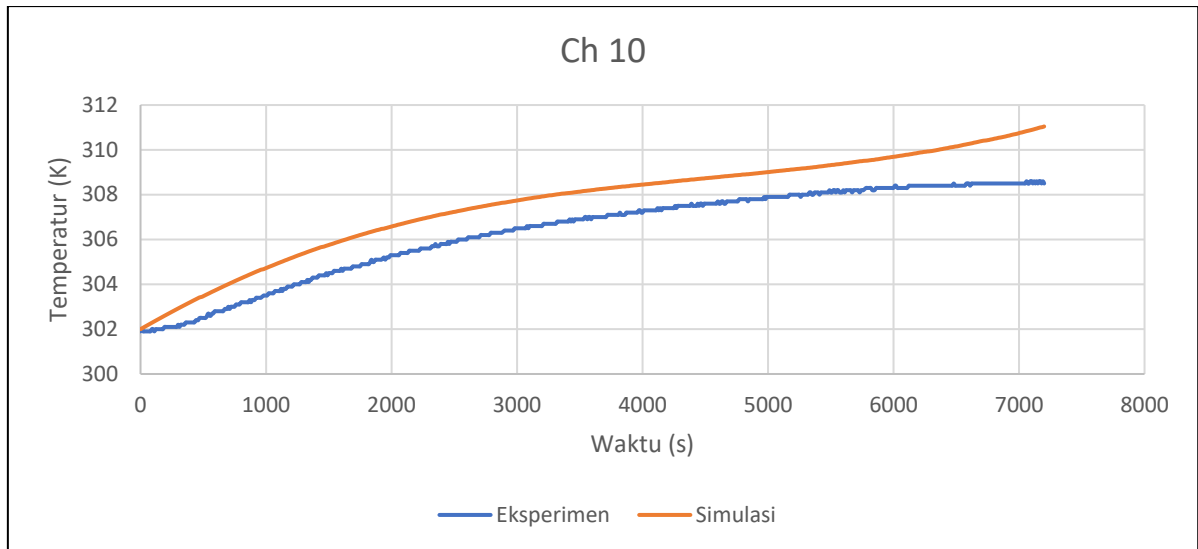
4.2.5 Konveksi Paksa dengan Jarak 7.6 cm

Berikut ini adalah grafik perbandingan antara peningkatan suhu pada hasil simulasi dan hasil eksperimen.









Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Temperatur Eksperimen dan Simulasi pada Variasi Konveksi Paksa 7.6 cm

Grafik-grafik diatas menunjukkan tren yang dialami baterai dari eksperimen maupun simulasi memiliki kemiripan yang menjadi salah satu bukti validasi. Dapat dilihat dari grafik yang dihasilkan bahwa tren peningkatan temperature dari eksperimen dan simulasi serupa walau nilai temperaturnya tidak tepat sama. Pada channel 1 temperatur akhir yang dihasilkan dari eksperimen sebesar 303.9 K dan untuk hasil dari simulasi adalah 305.4 K. Pada channel 2 hasil temperature akhir dari eksperimen adalah 303.8 K sementara itu dari hasil simulasi sebesar 305.33 K. Pada channel 3 hasil eksperimen sebesar 305.3 K dan hasil akhir dari simulasi adalah 305.3 K. Pada channel 4 suhu akhir hasil eksperimen sebesar 304.6 K dan dari simulasi didapat sebesar 305.36 K. Pada Channel 5 suhu akhir yang didapat dari eksperimen sebesar 306.2 K dan dari simulasi didapat 306.55 K. Berikutnya pada channel 6 didapat dari eksperimen temperaturnya sebesar 305.5 K sementara untuk hasil simulasi didapat 306.59 K. Pada channel 7 didapat temperature pada hasil eksperimen sebesar 307 K dan dari hasil simulasi didapat 306.59 K. Berikutnya temperature akhir yang didapat dari eksperimen dan simulasi pada channel 8 berturut-turut adalah 306.1 K dan 306.63 K. Pada channel 9 temperatur akhir yang didapat dari eksperimen dan simulasi adalah 310 K dan 310.15 K. Pada channel 10 didapat temperature akhir sebesar 308.5 K dari hasil eksperimen dan 311.04 K dari hasil simulasi. Di channel 11 temperatur akhir yang didapat dari hasil eksperimen menyentuh 310.2 K dan dari simulasi menyentuh 310.22 K. Terakhir yaitu channel 12 didapat hasil eksperimen sebesar 308.1 K dan dari simulasi didapat 311.01 K

Berikutnya untuk memvalidasi lebih jauh dilakukan perhitungan RMSE seperti yang dilakukan sebelumnya. Berikut dibawah ini adalah table RMSE pada tiap channel.

Tabel 4.5 Tabel RMSE Konveksi Paksa Variasi Jarak 7.6 cm

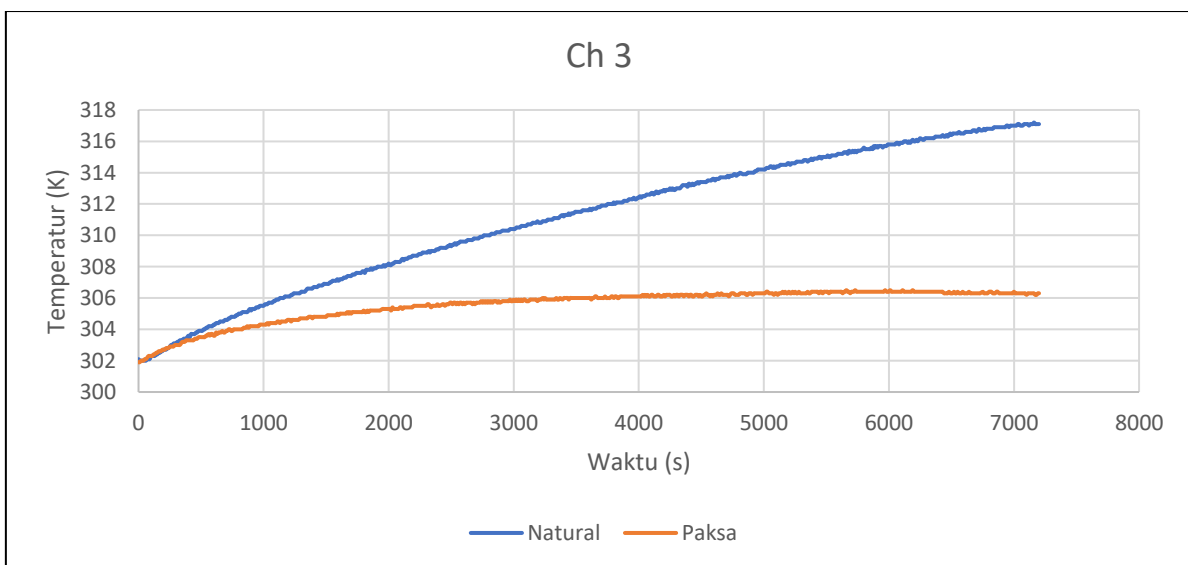
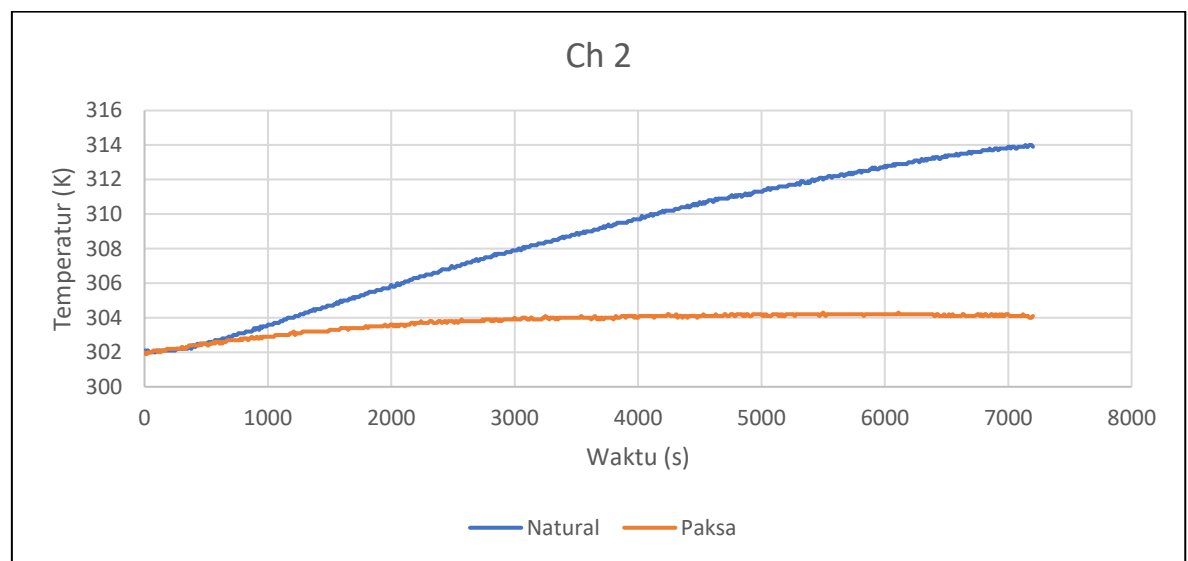
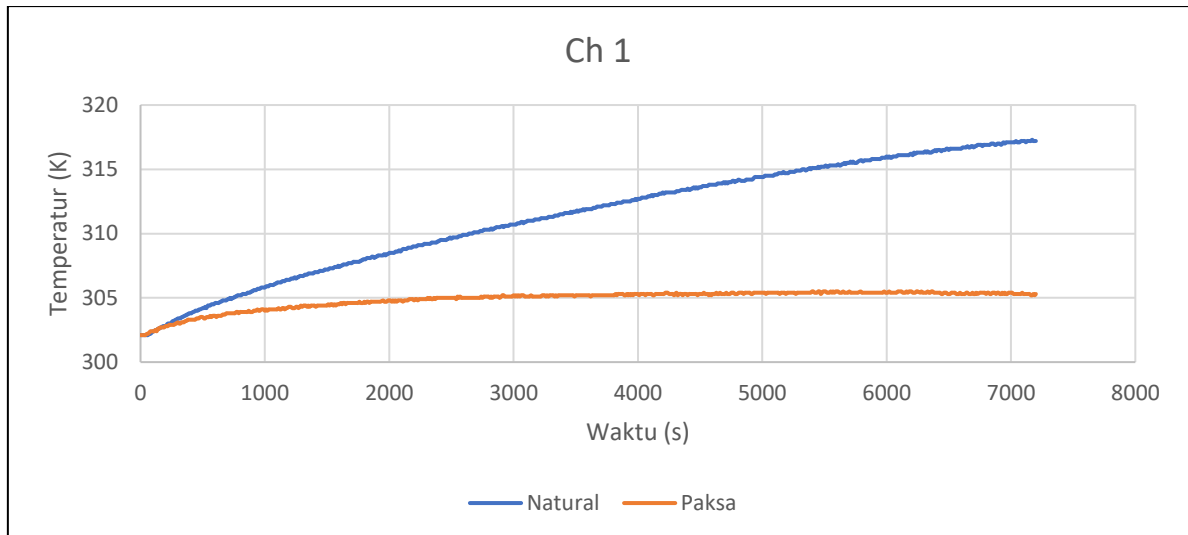
Channel	RMSE (K°)
1	1.253646539
2	1.267741114
3	0.302566602
4	0.475230123
5	0.427245332
6	1.197238152
7	0.329891512
8	0.912069276
9	0.58867378
10	1.323995623
11	0.68678781
12	1.5718534

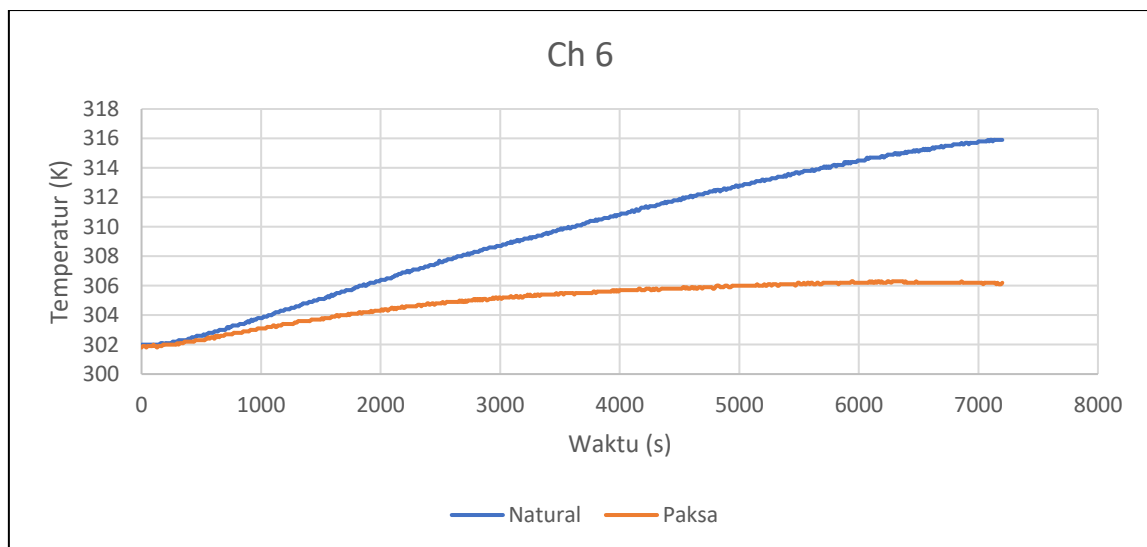
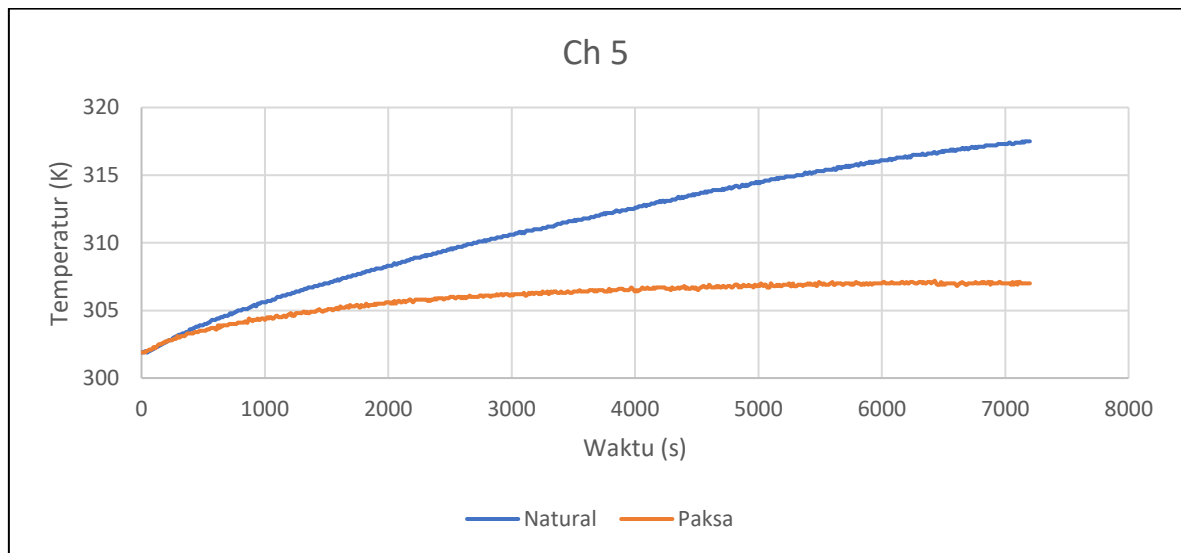
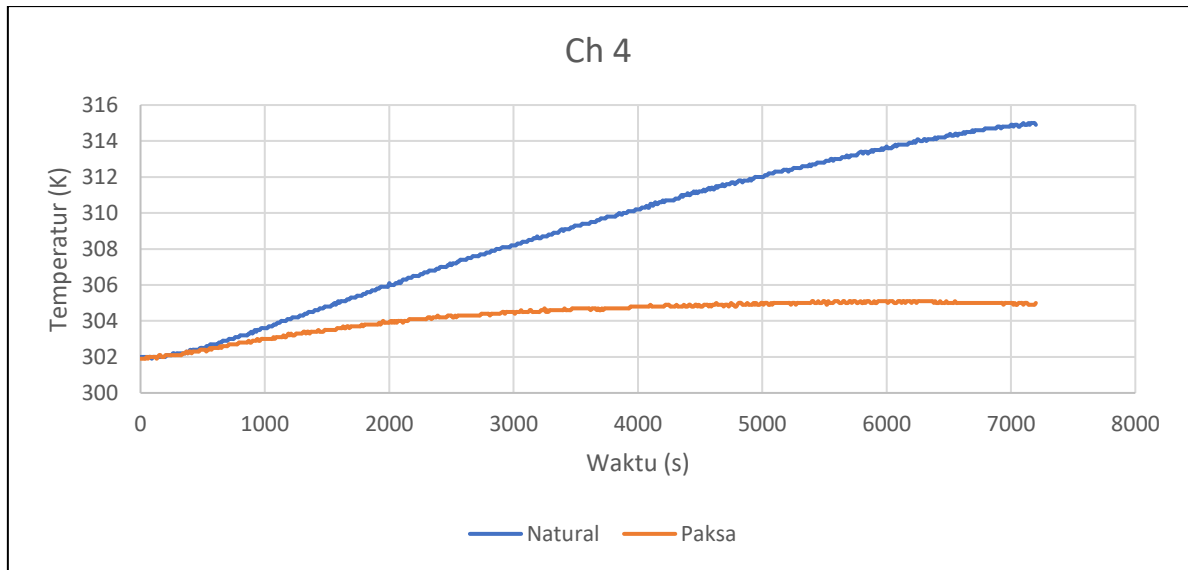
Setelah melakukan perhitungan RMSE pada setiap channelnya didapat nilai seperti table diatas dan di table tersebut tidak menunjukkan adanya nilai 3° perbedaan antara hasil simulasi dan eksperimen yang dapat menyimpulkan simulasi dari eksperimen adalah valid.

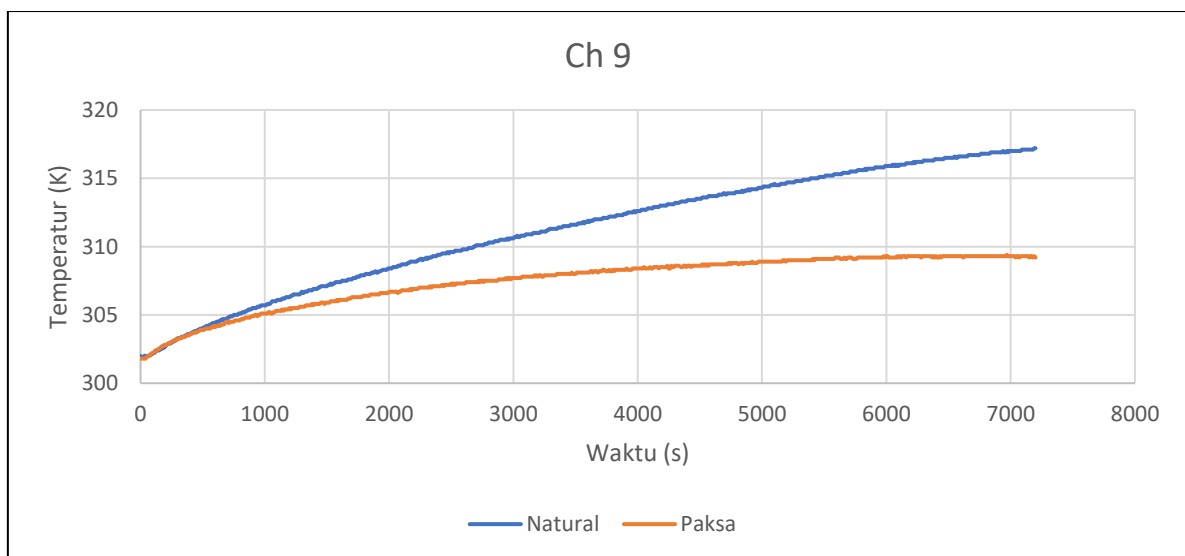
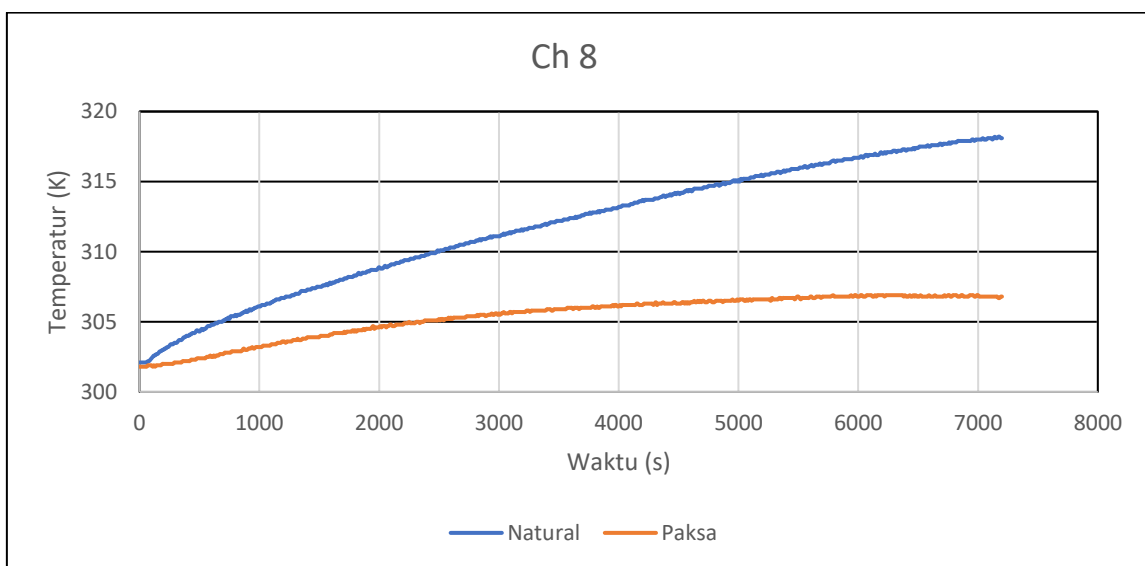
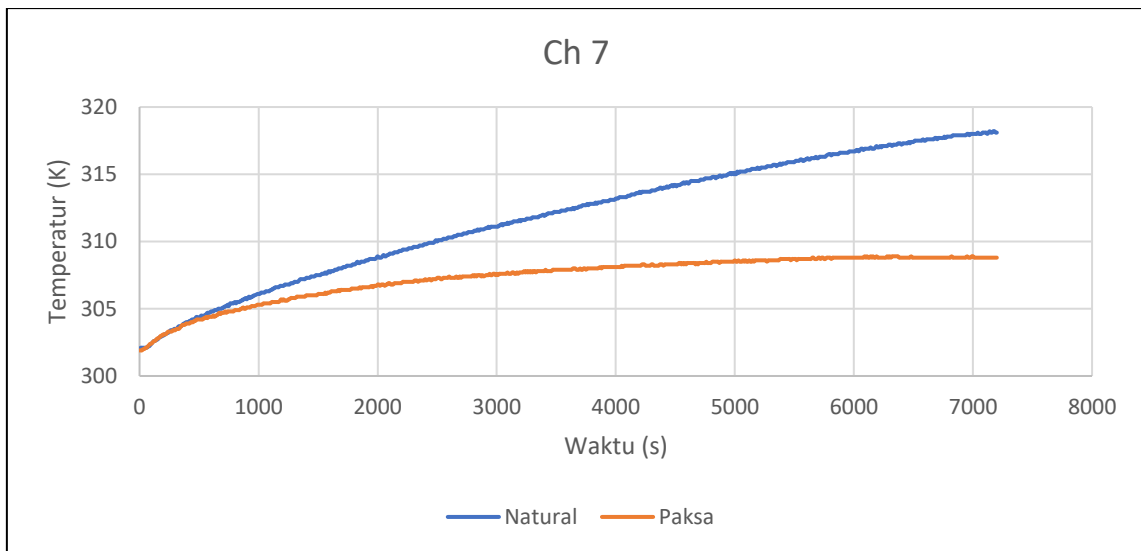
4.3 Analisis Perbandingan Permukaan Temperatur Baterai Berdasarkan Jenis Konveksi

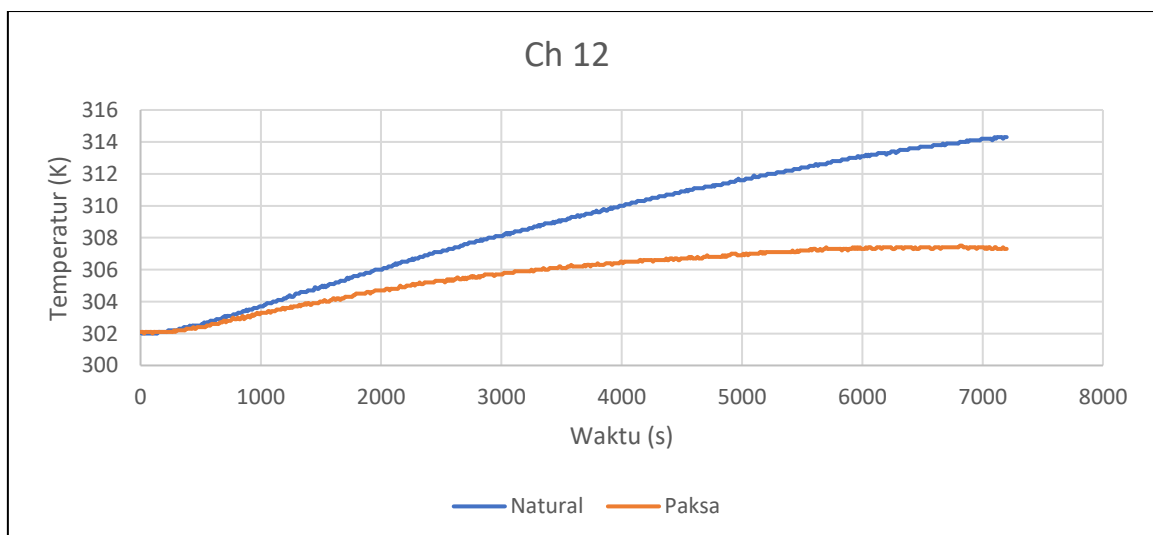
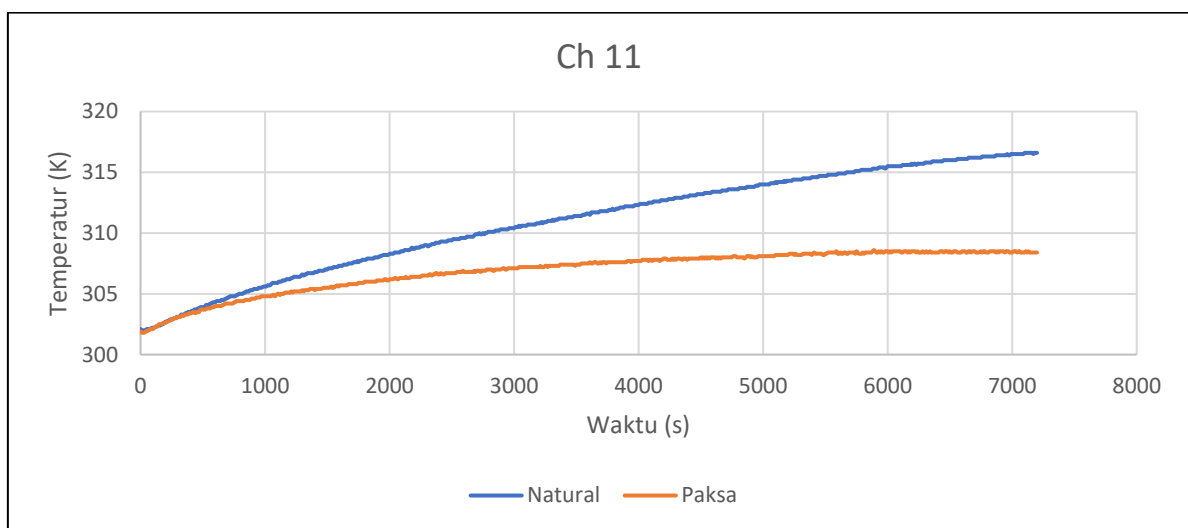
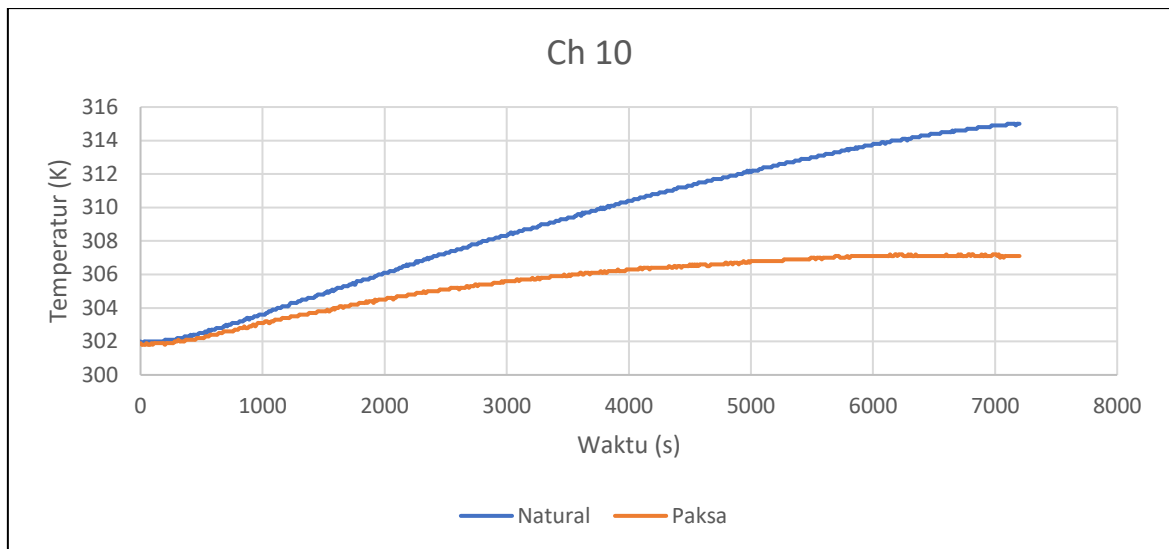
4.3.1 Jarak 2 cm

Berikut adalah grafik suhu terhadap waktu pada tiap channelnya yang membandingkan antara konveksi natural dan paksa dengan jarak antar baterai 2 cm.









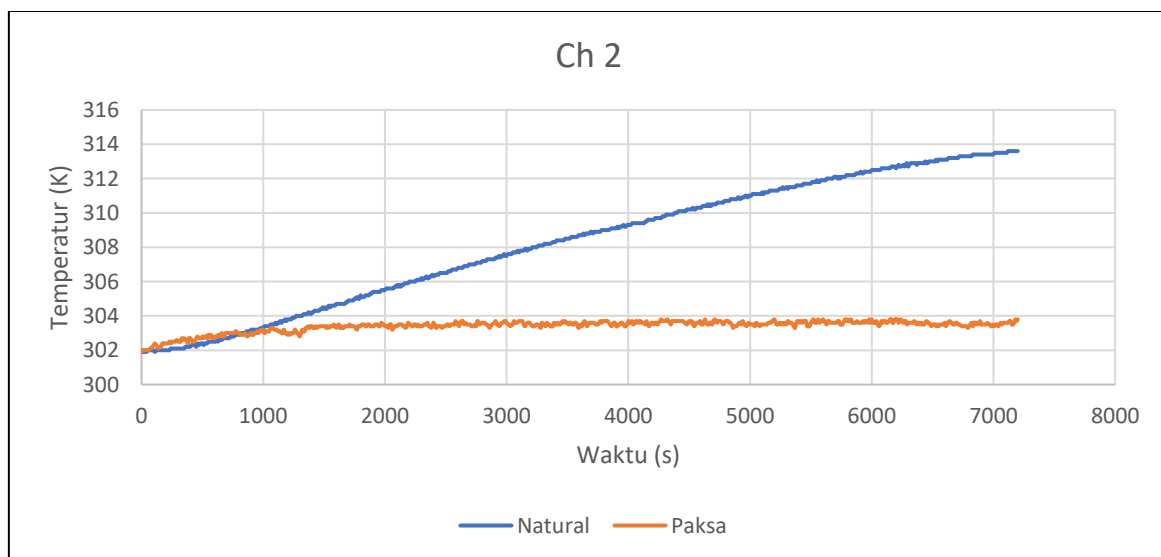
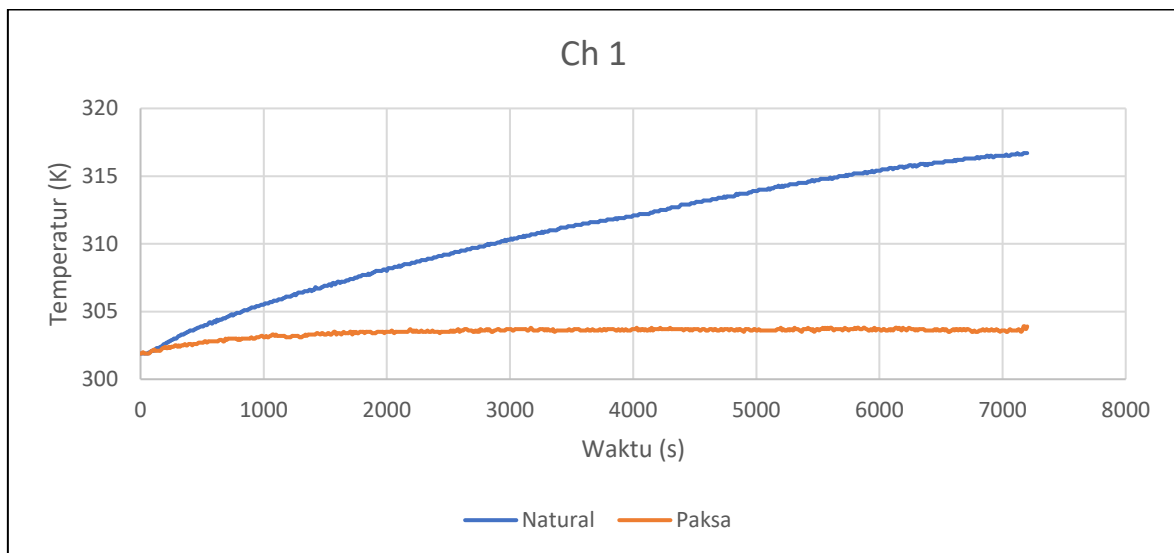
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Temperatur pada Variasi Jarak 2 cm

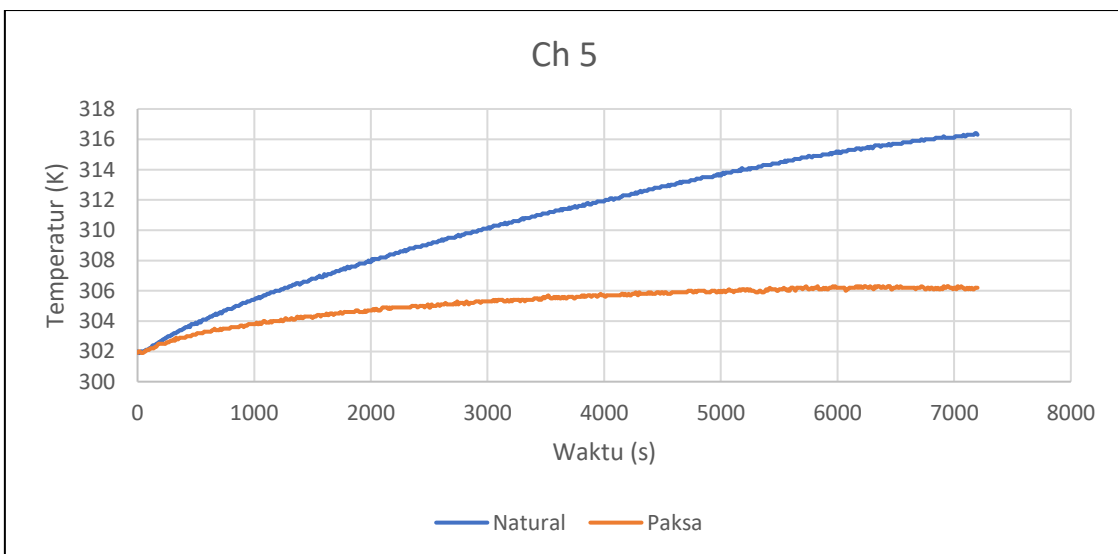
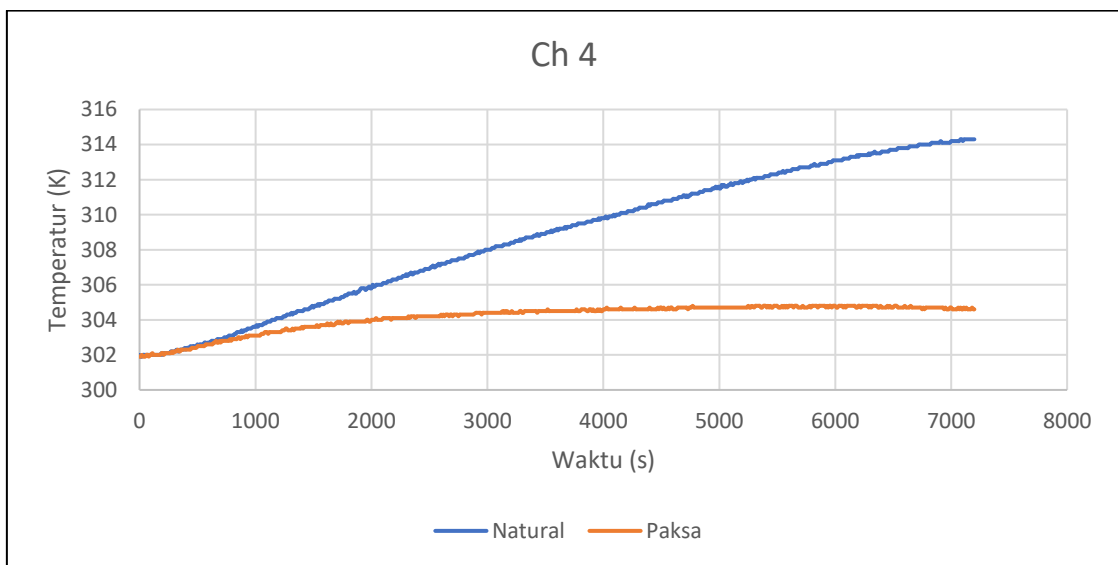
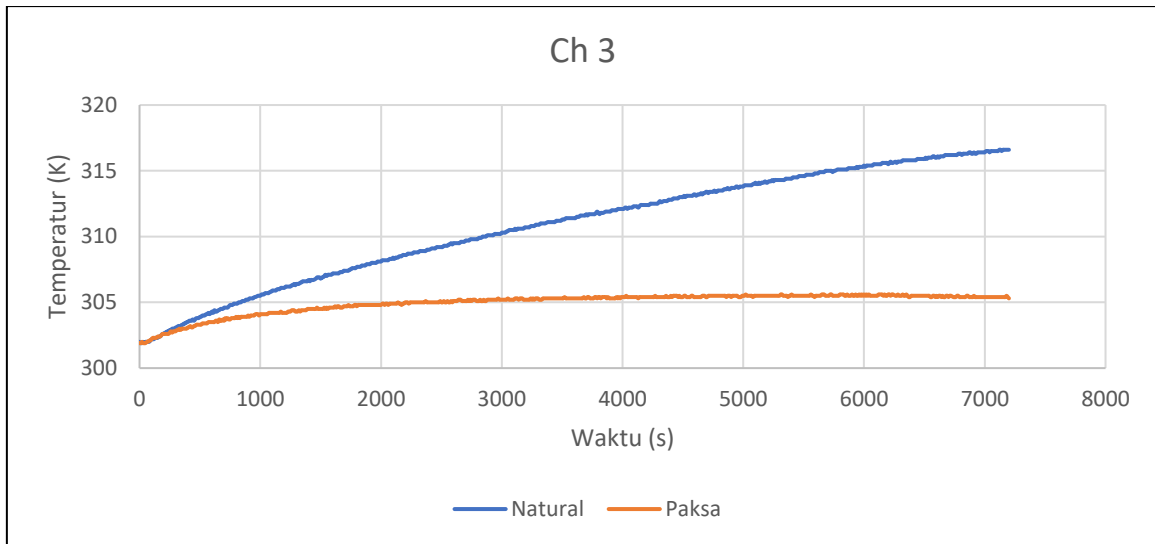
Dilihat dari tiap grafik yang dihasilkan bahwa temperature akhir yang dicapai dan didapat dari eksperimen dengan variasi konveksi natural semuanya lebih tinggi dibandingkan dengan temperature yang didapat dari variasi konveksi paksa. Hal ini tentu

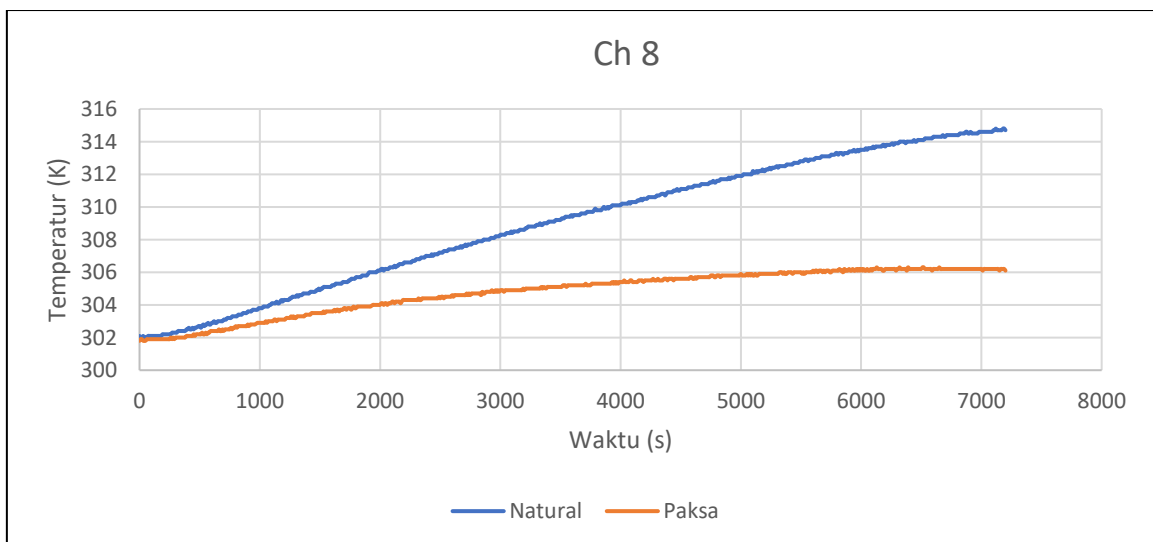
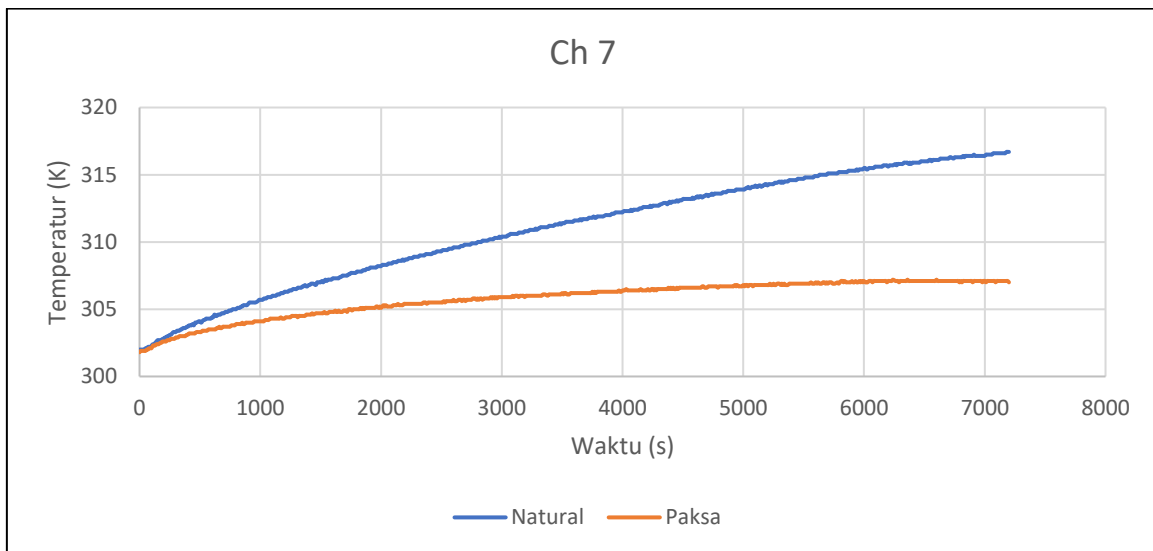
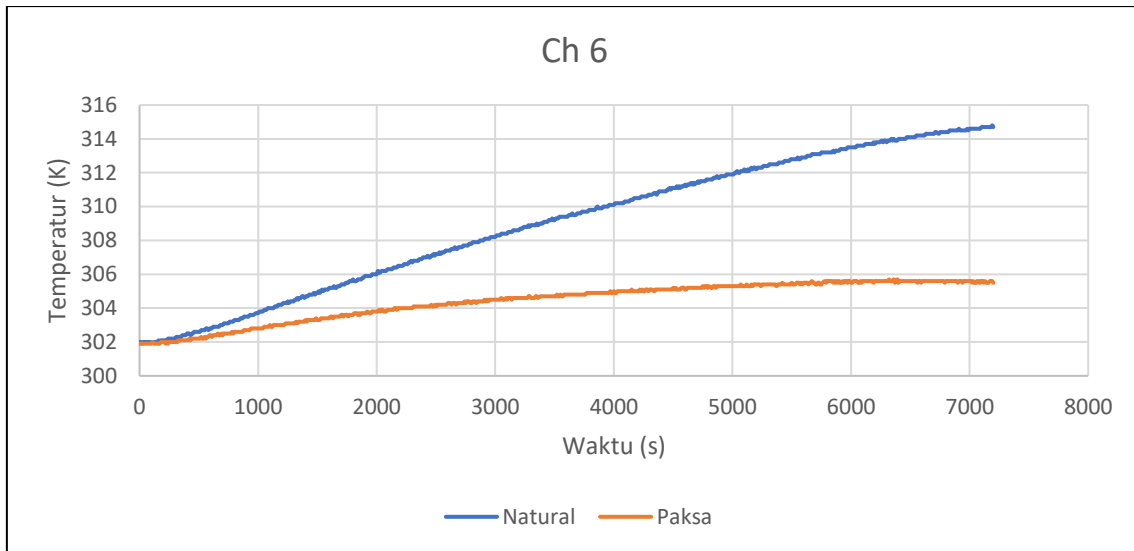
masuk akal karena berlaku hukum konveksi yang dipengaruhi nilai koefisien konveksinya. Eksperimen konveksi paksa tentu memiliki nilai koefisien konveksi yang jauh lebih tinggi daripada konveksi paksa. Selain itu juga karena udara disekitar baterai pada variasi konveksi natural akan terus naik karena domain udaranya tertutup sehingga perbedaan temperature antara domain udara dan baterai semakin kecil yang menyebabkan disipasi panas dari baterai ke udara semakin kecil. Sehingga generasi panas yang dihasilkan baterai tidak terbuang dan menyebabkan suhu baterai semakin tinggi. Temperatur tertinggi baterai pada variasi natural mencapai 318 K, sementara untuk variasi konveksi paksa hanya mencapai sekitar 310 K. Lalu dari grafik diatas juga dapat dilihat bahwa bagian bawah baterai selalu memiliki temperature lebih rendah dari bagian atas. Hal ini terjadi karena udara yang memiliki suhu lebih tinggi akan memiliki densitas yang lebih kecil, sehingga udara yang lebih panas tersebut akan terangkat keatas dan udara yang lebih dingin akan berada dibagian bawah. Maka dari itu bagian bawah baterai akan selalu memiliki suhu lebih rendah daripada bagian atasnya.

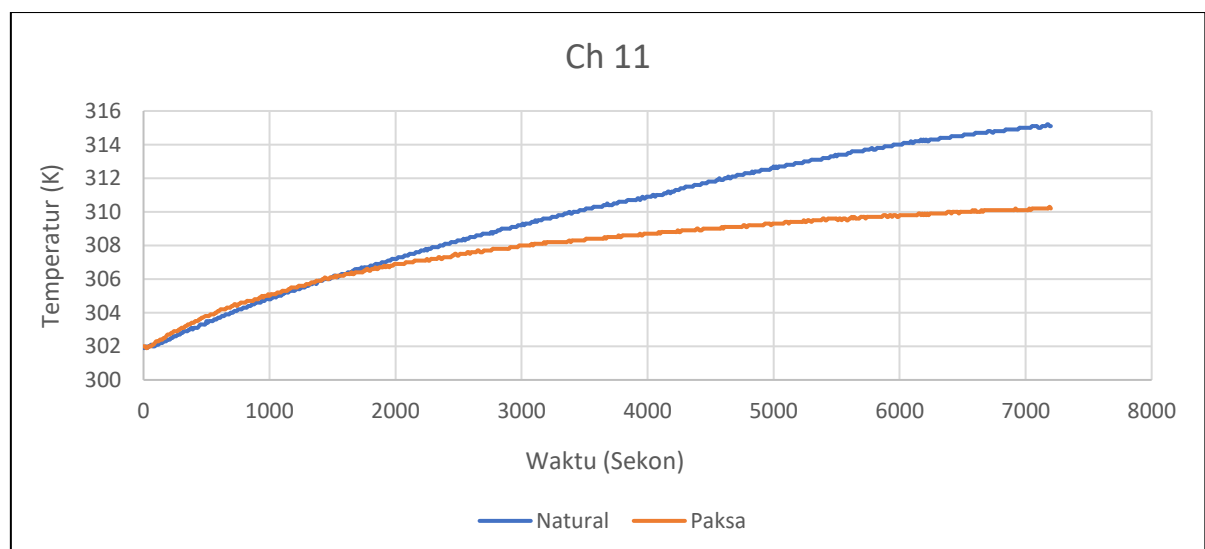
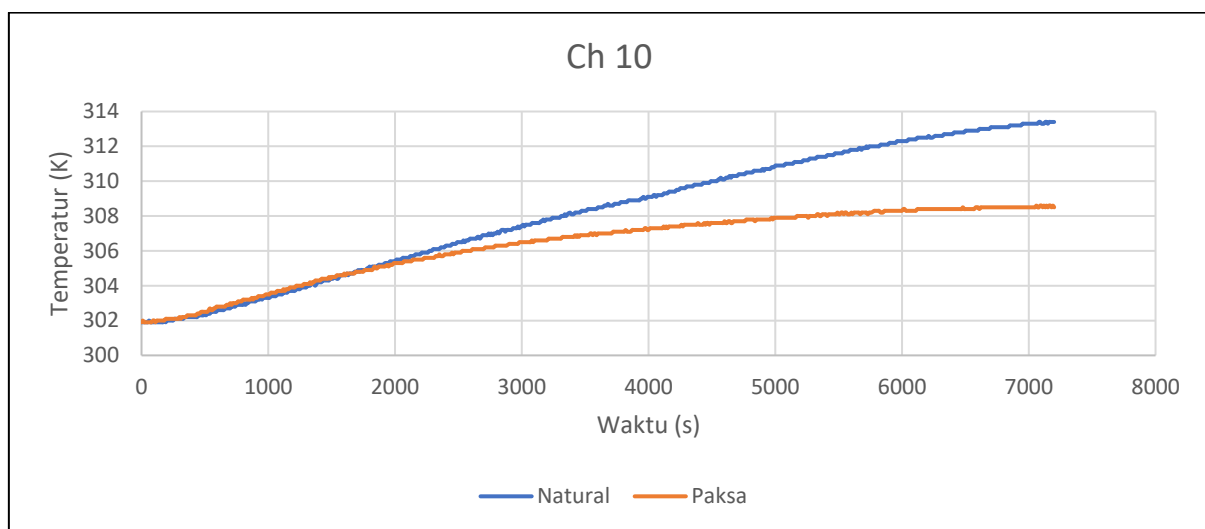
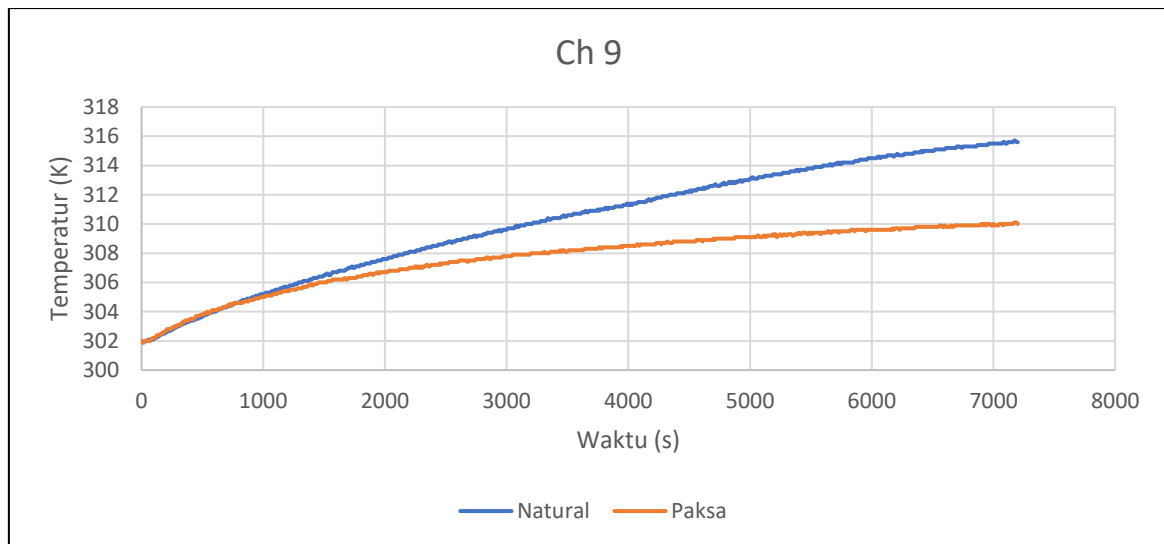
4.3.2 Jarak 7.6 cm

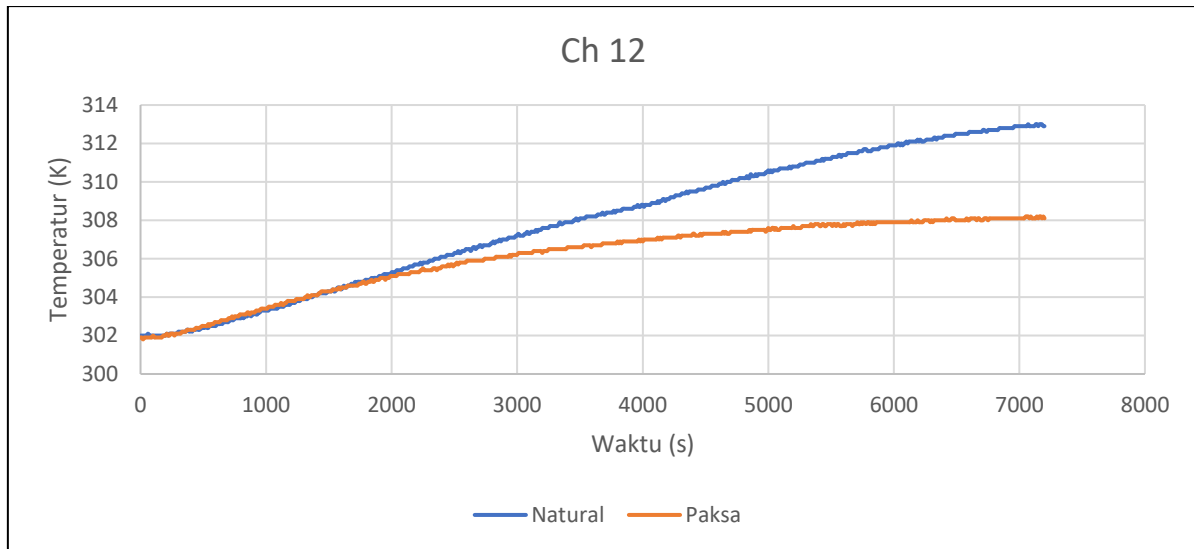
Berikut adalah grafik suhu terhadap waktu pada tiap channelnya yang membandingkan antara konveksi natural dan paksa dengan jarak antar baterai 2 cm.











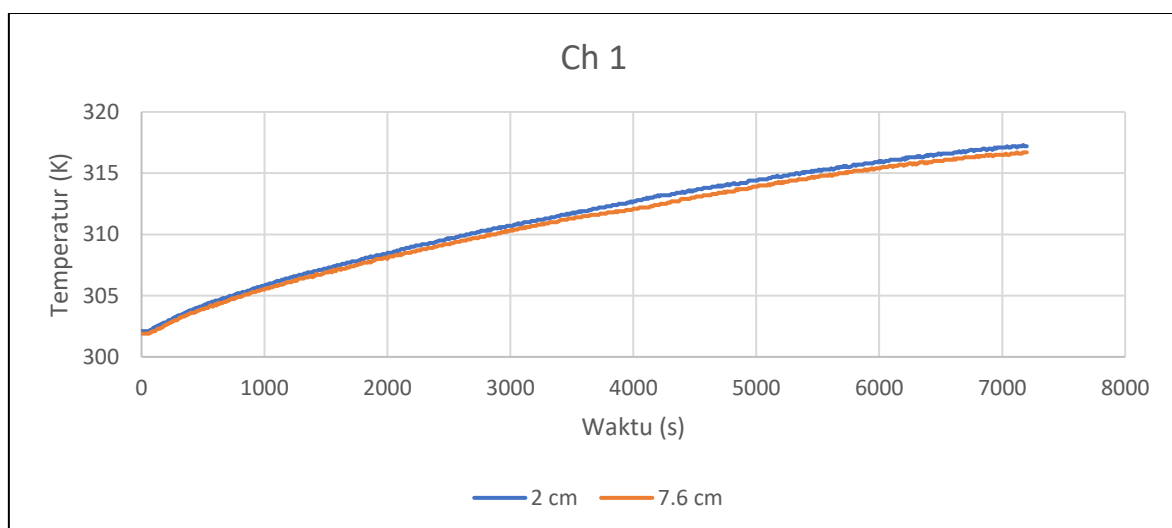
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Temperatur pada Variasi Jarak 7.6 cm

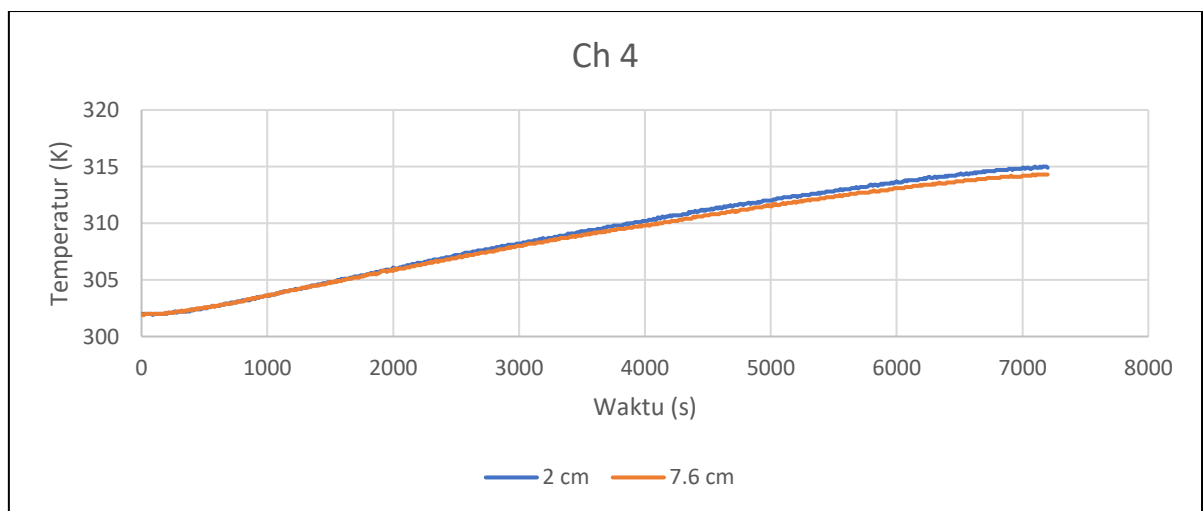
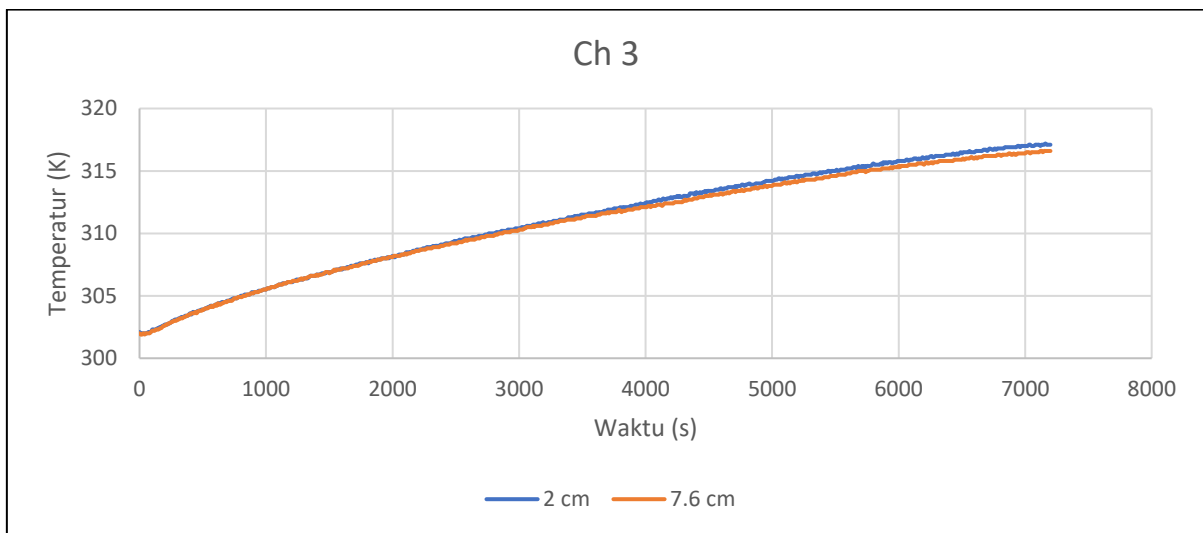
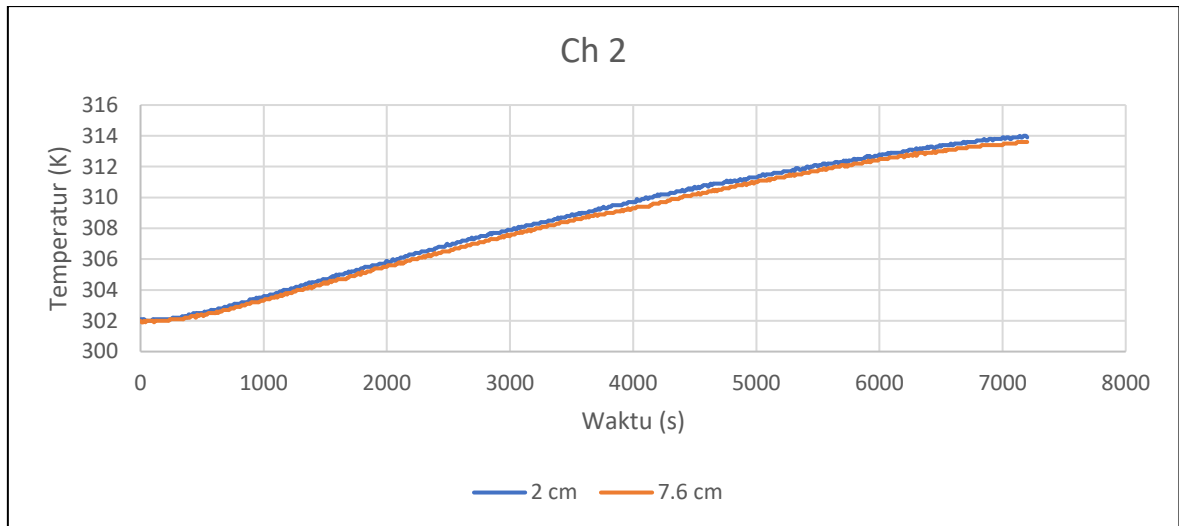
Grafik diatas kembali menunjukkan bahwa temperature yang dihasilkan konveksi natural tetap lebih tinggi dibandingkan dengan konveksi paksa. Temperature akhir tertinggi yang dihasilkan dari konveksi natural adalah 316.7 K di channel 7. Sementara itu temperature tertinggi pada variasi konveksi paksa adalah 310 K di channel 11. Hasil ini kembali membuktikan bahwa konveksi paksa menghasilkan koefisien konveksi yang lebih baik daripada konveksi natural. Sementara untuk suhu terendah pada konveksi natural adalah 313.4 K di channel 10, sementara itu untuk konveksi paksa adalah 303.8 K di channel 2.

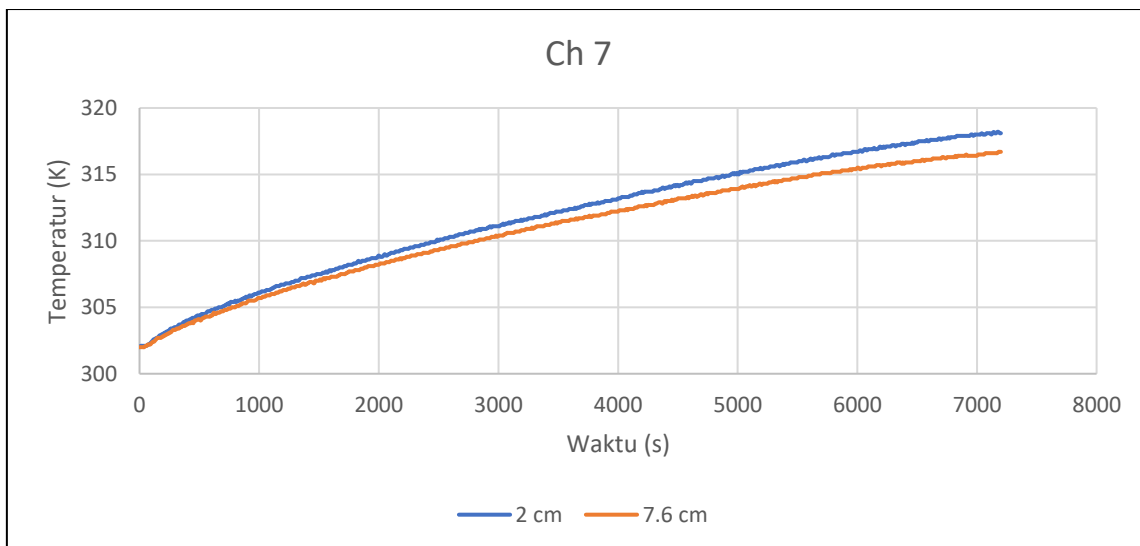
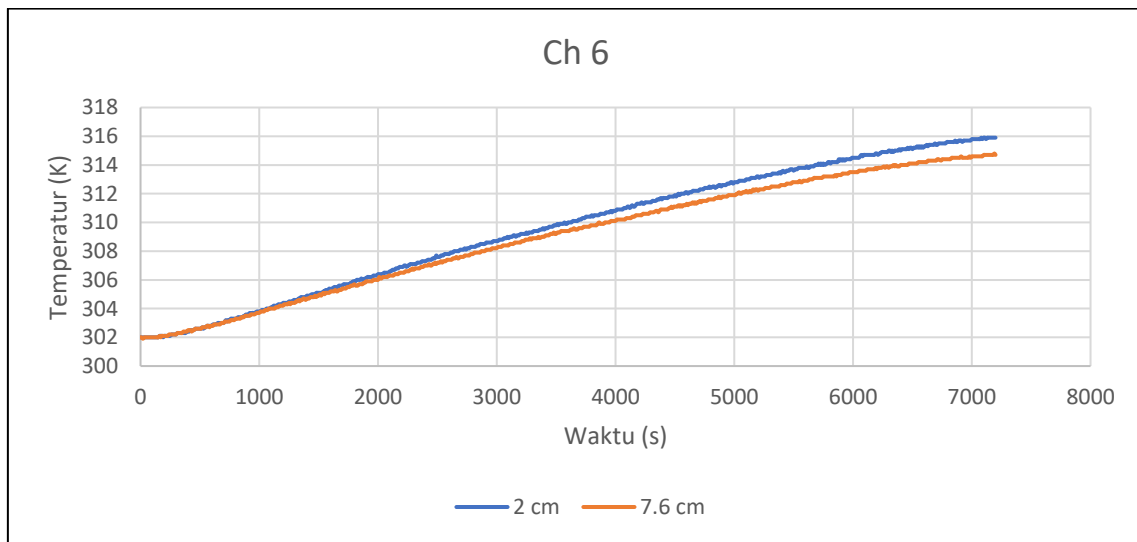
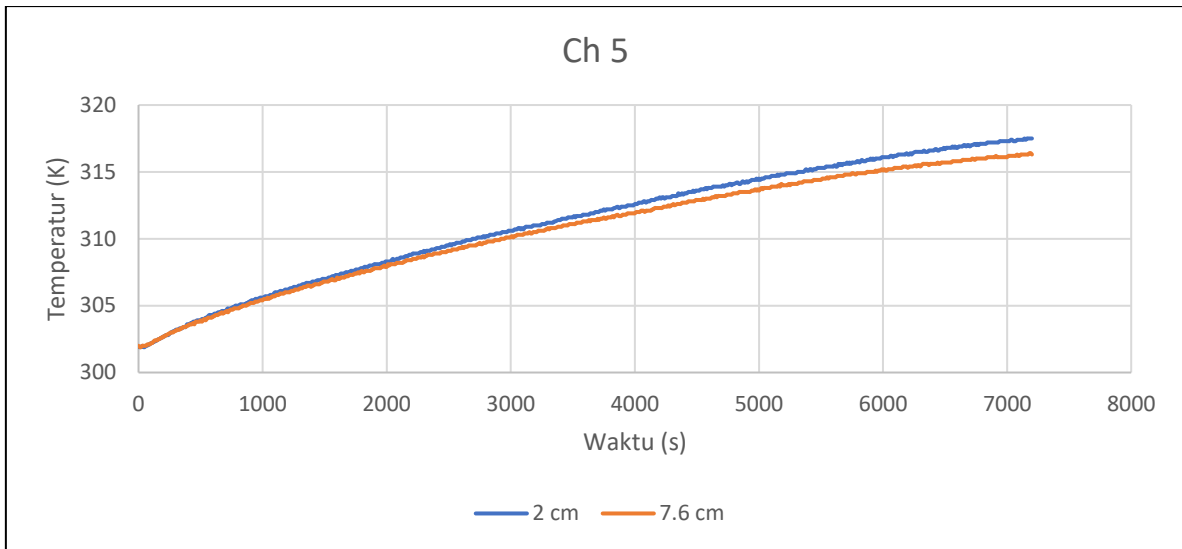
4.4 Analisis Perbandingan Temperatur Permukaan Baterai Berdasarkan Jarak Antar Sel Baterai

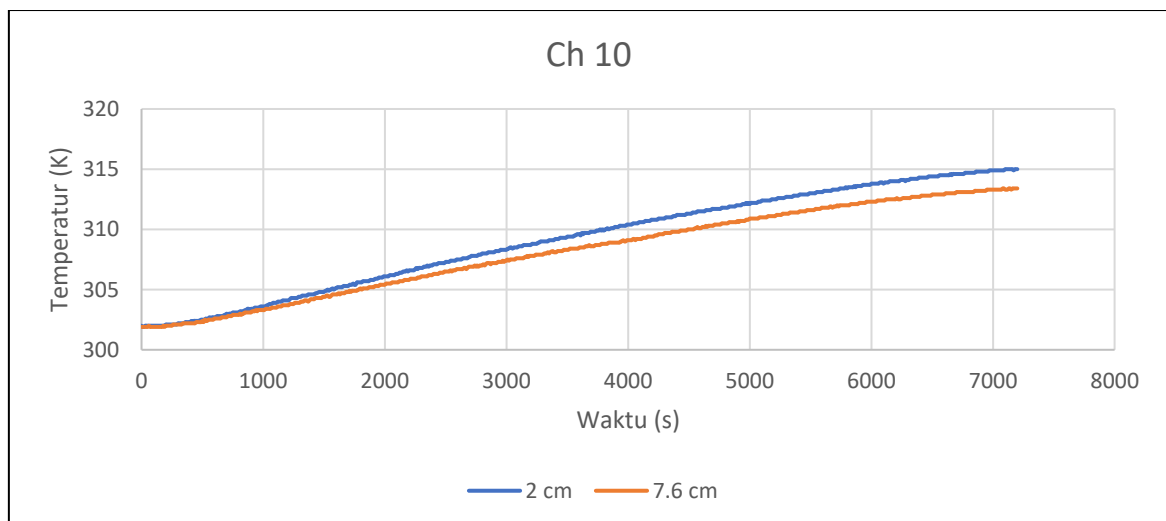
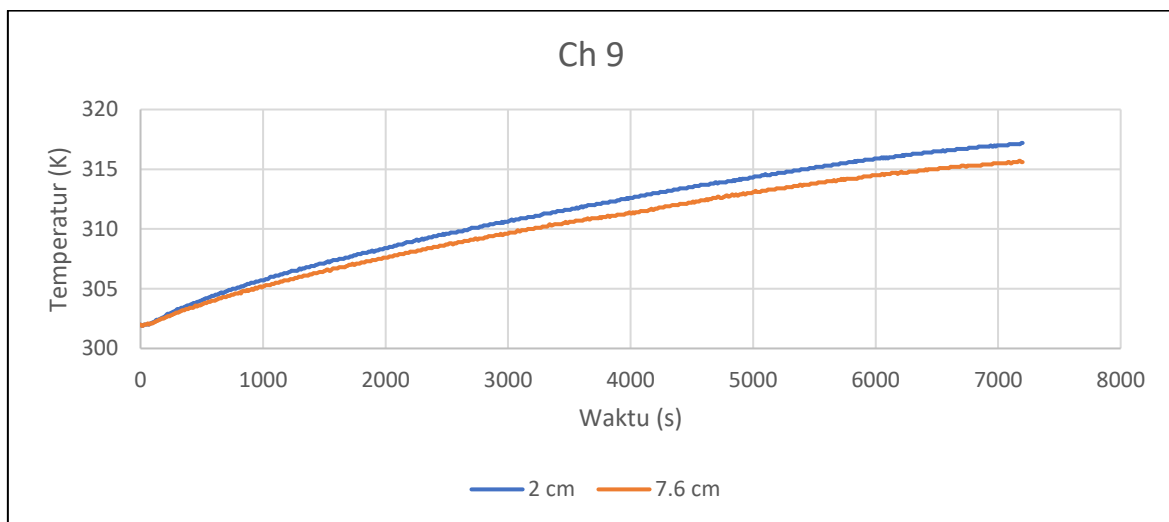
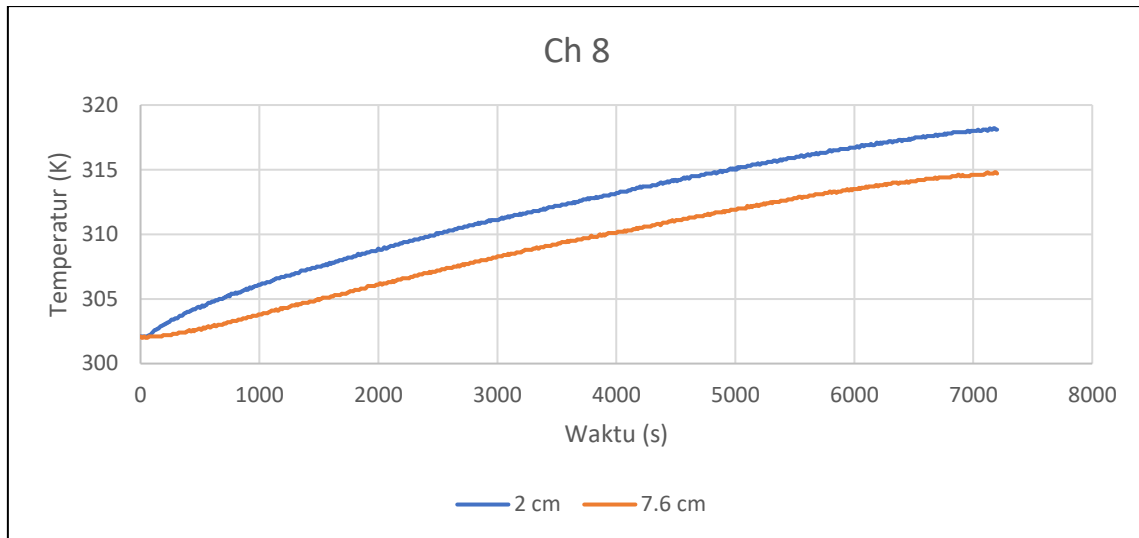
4.4.1 Konveksi Natural

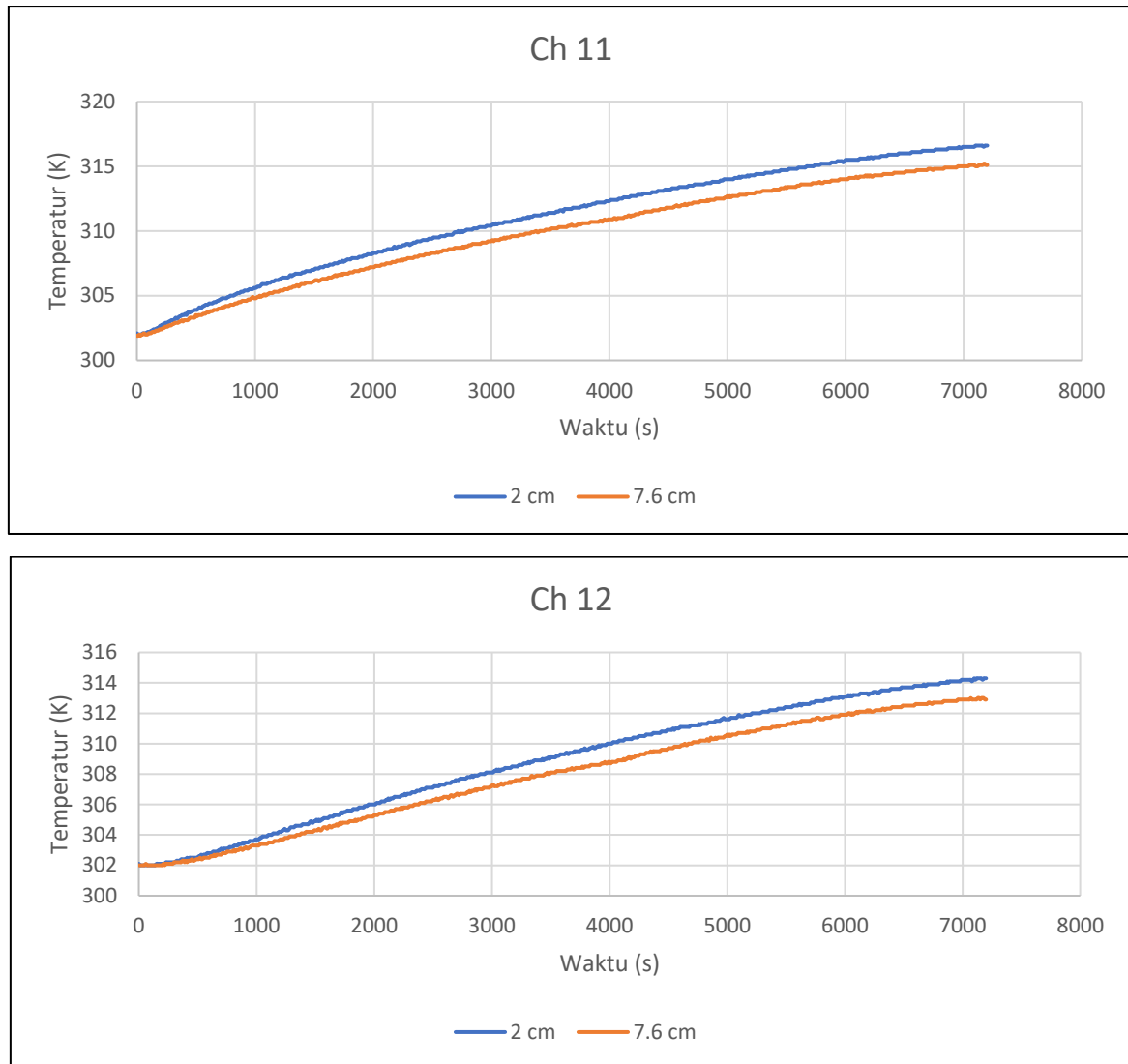
Berikut ini adalah grafik perbandingan antara variasi jarak 2 cm dan 7.6 cm dengan konveksi natural selama 7200 detik.









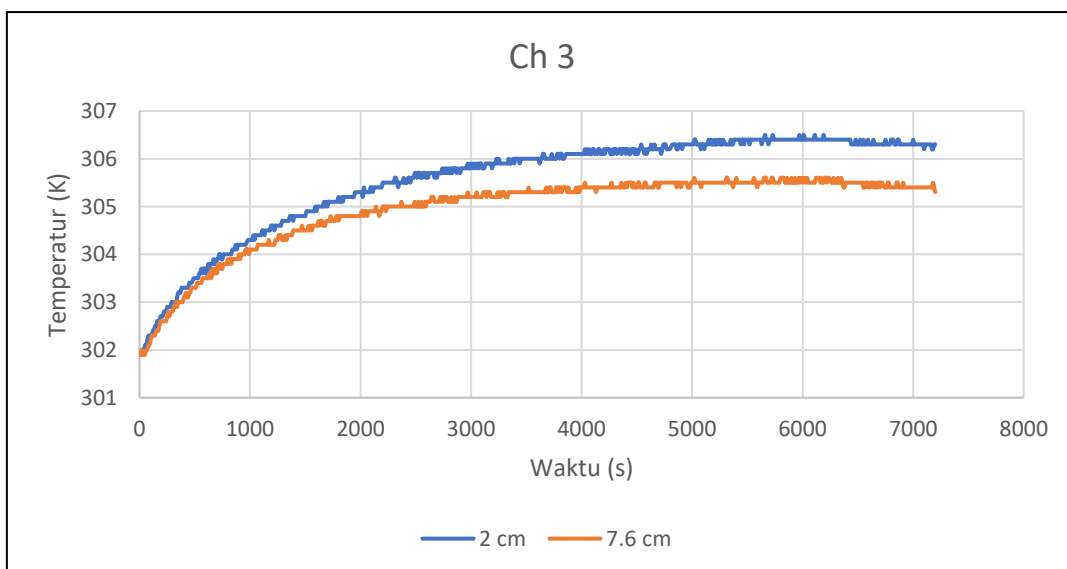
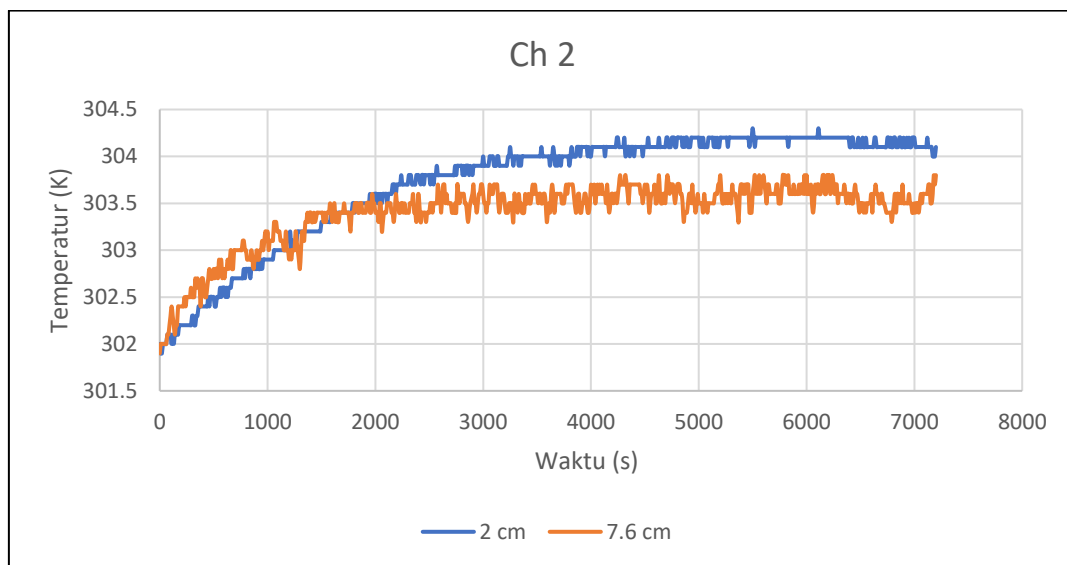
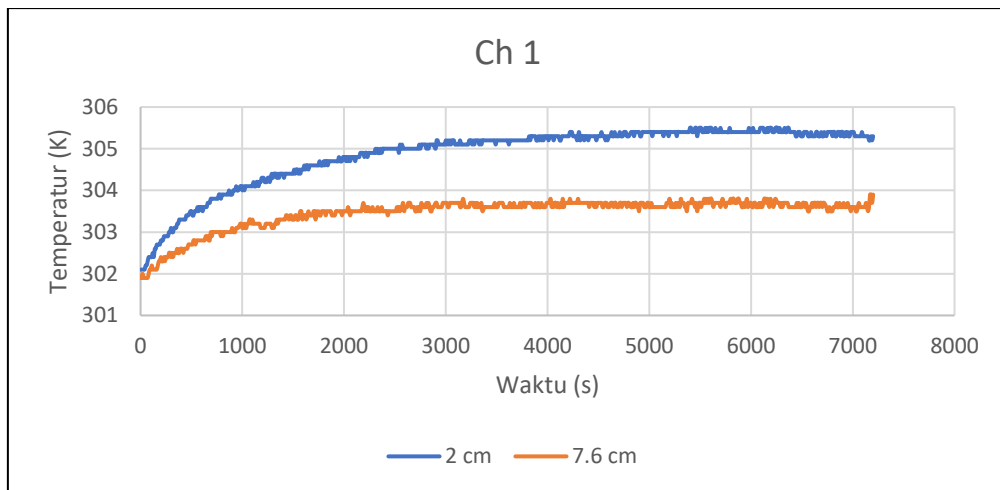


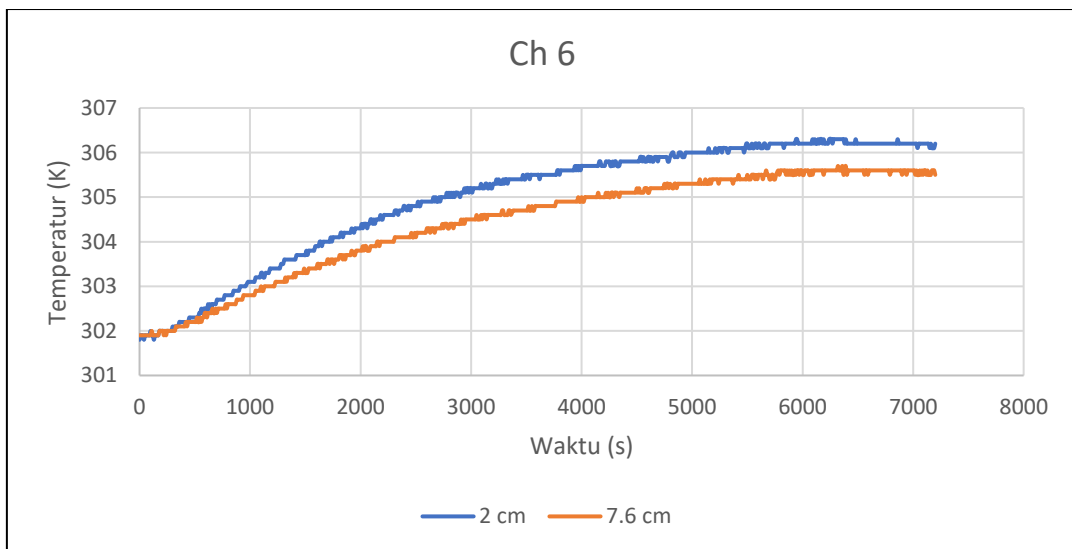
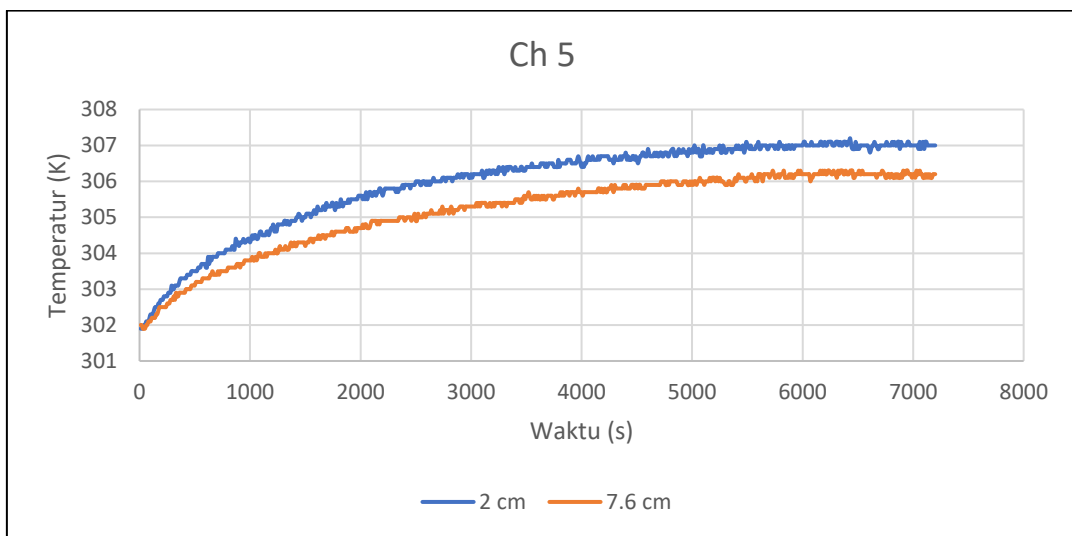
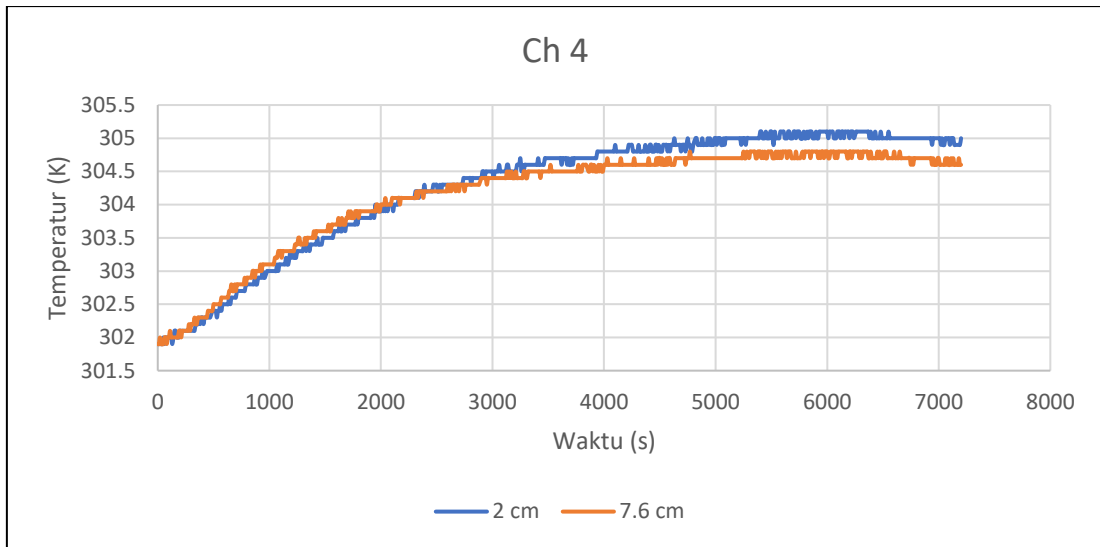
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Temperatur pada Variasi Konveksi Natural

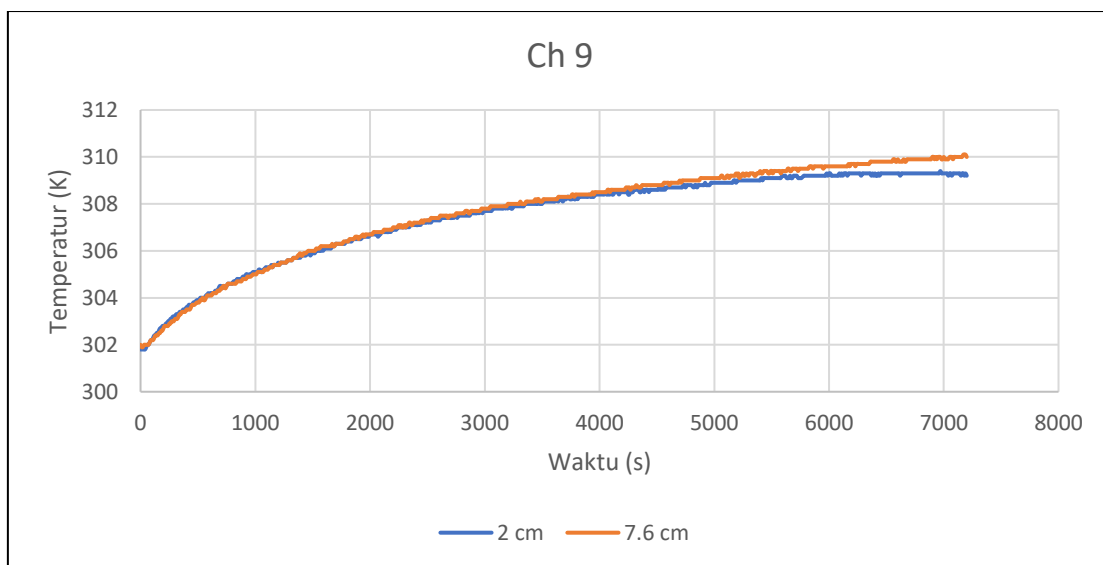
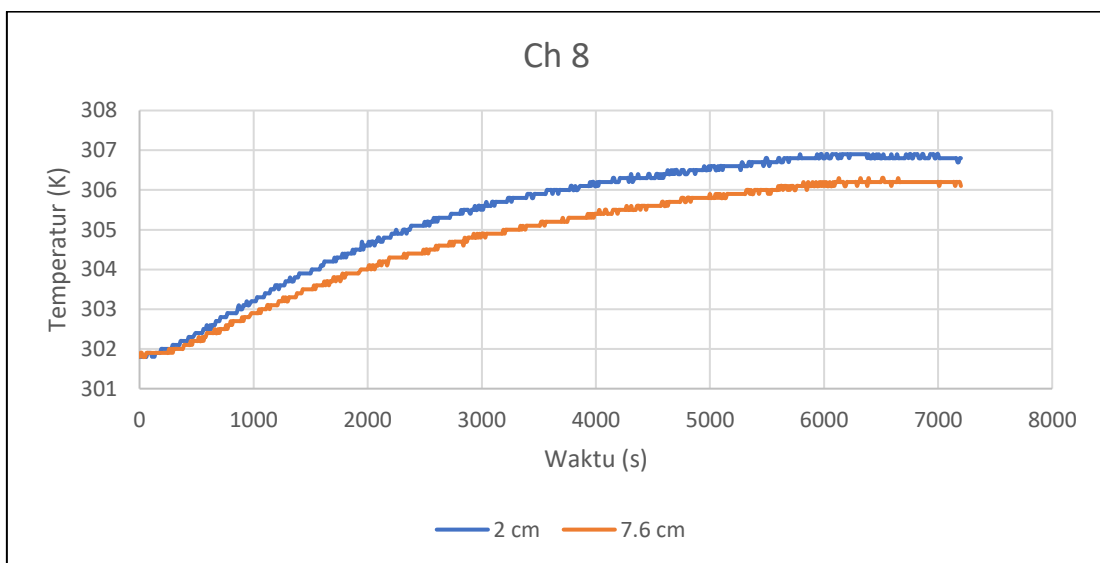
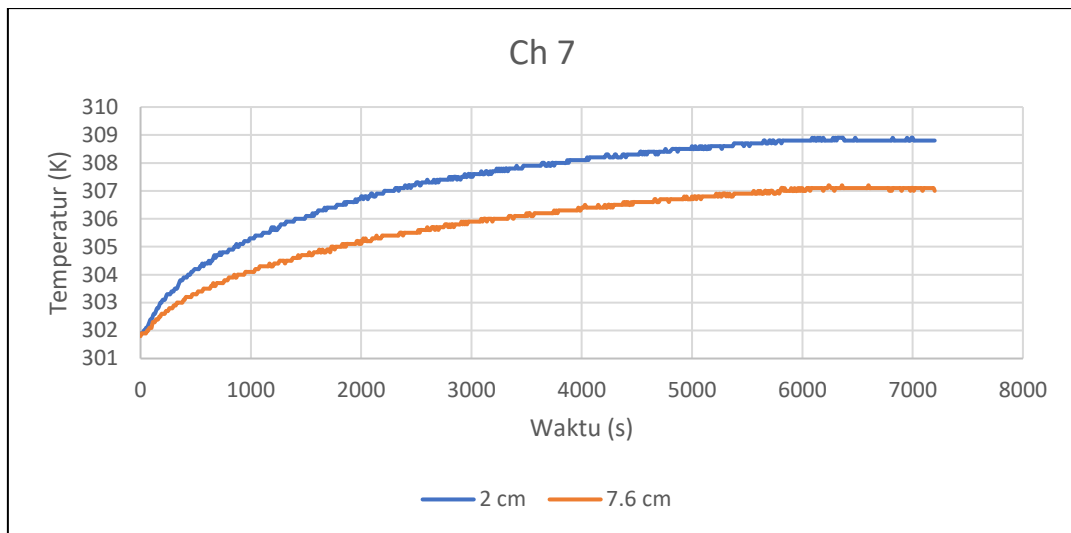
Grafik perbandingan diatas memnunjukkan bahwa temperature dari variasi jarak 2 cm memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang berjarak 7.6 cm. Hal ini membuktikan bahwa adanya *boundary layer* termal pada baterai. Baterai yang memiliki jarak lebih dekat akan memiliki boundary layer yang akan bersinggungan dengan baterai lainnya karena jaraknya yang dekat hingga menyebabkan temperature udara pada sela antar baterai akan semakin mendekati temperature permukaan baterai. Karena temperature udara tadi sudah mendekati temperature baterai, maka perbedaan temperature antara baterai dan udara akan menjadi sangat kecil. Perpindahan panas yang terjadi pun akan sangat kecil sehingga menyebabkan panas yang dihasilkan baterai tidak terbuang dengan baik dan membuat suhu baterai semakin tinggi.

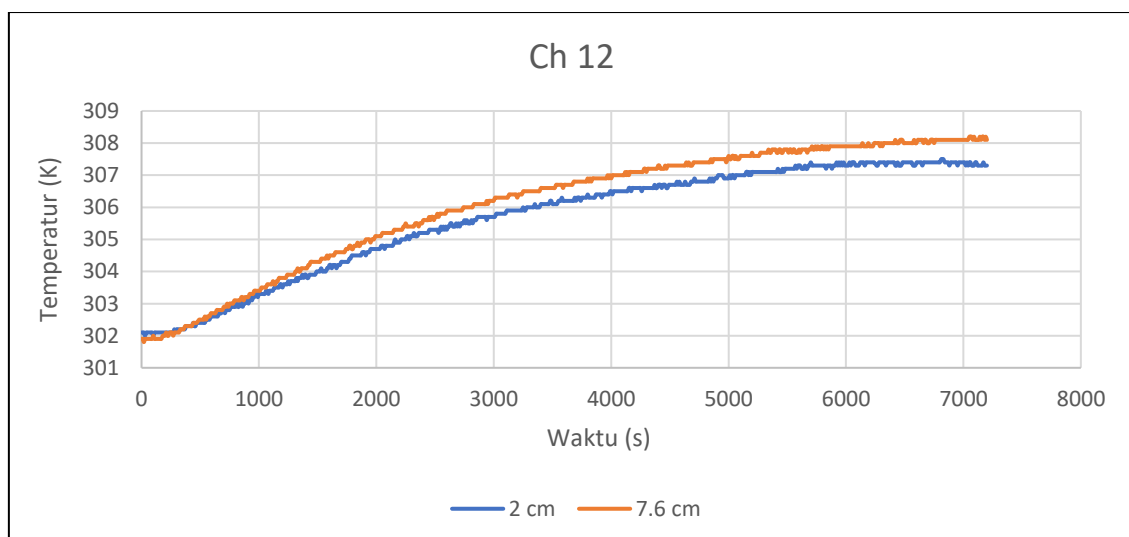
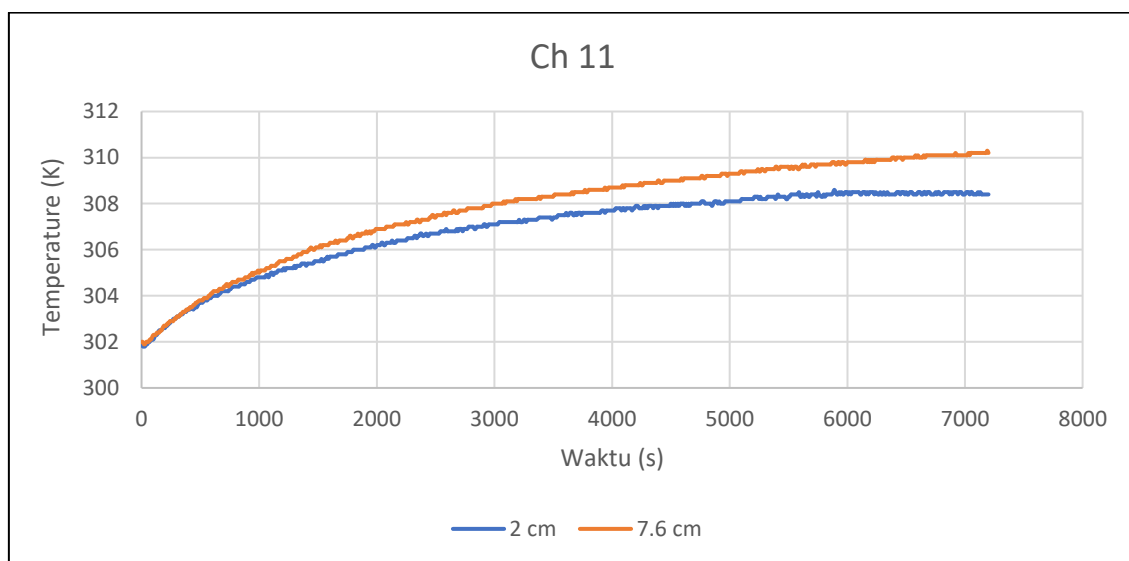
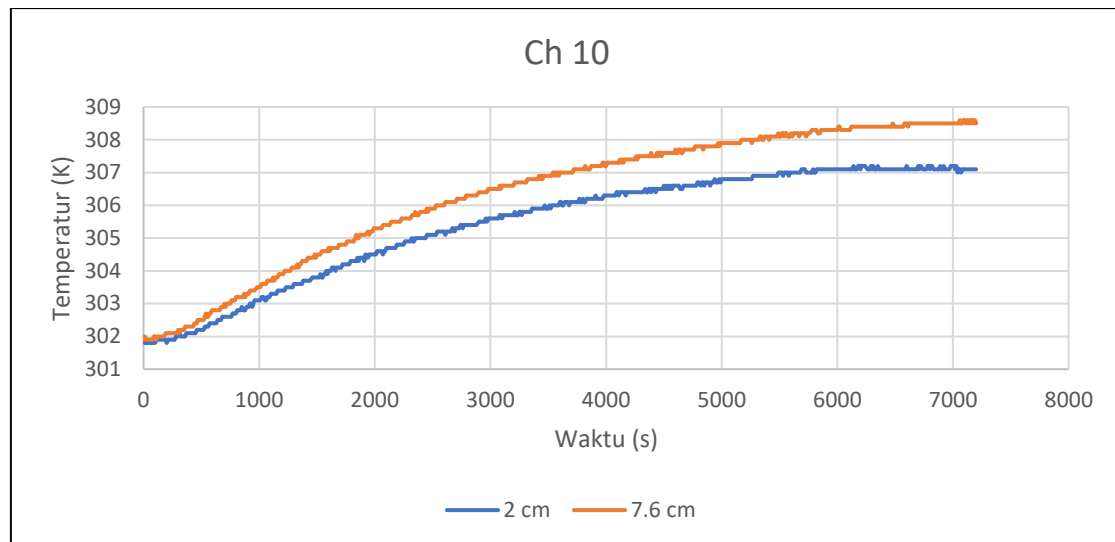
4.4.2 Konveksi Paksa

Berikut ini adalah grafik perbandingan antara jarak 2 cm dan 7.6 cm dengan konveksi paksa dengan aliran inlet udara sebesar 6 m/s.









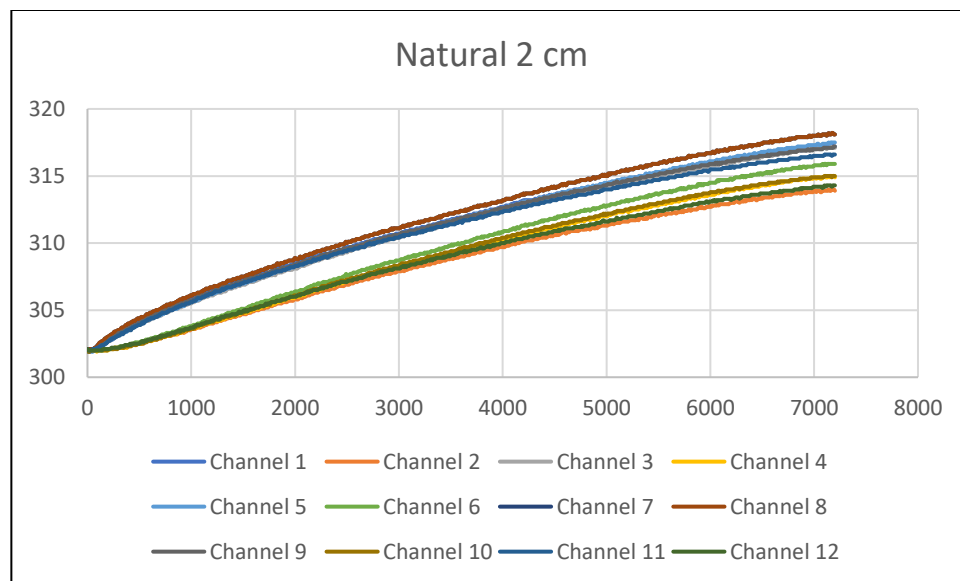
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Temperatur pada Variasi Konveksi Paksa

Semua grafik diatas kembali memperlihatkan bahwa bertambahnya jarak antar sumber panas satu dengan lainnya maka perpindahan panas yang terjadi semakin baik seperti yang

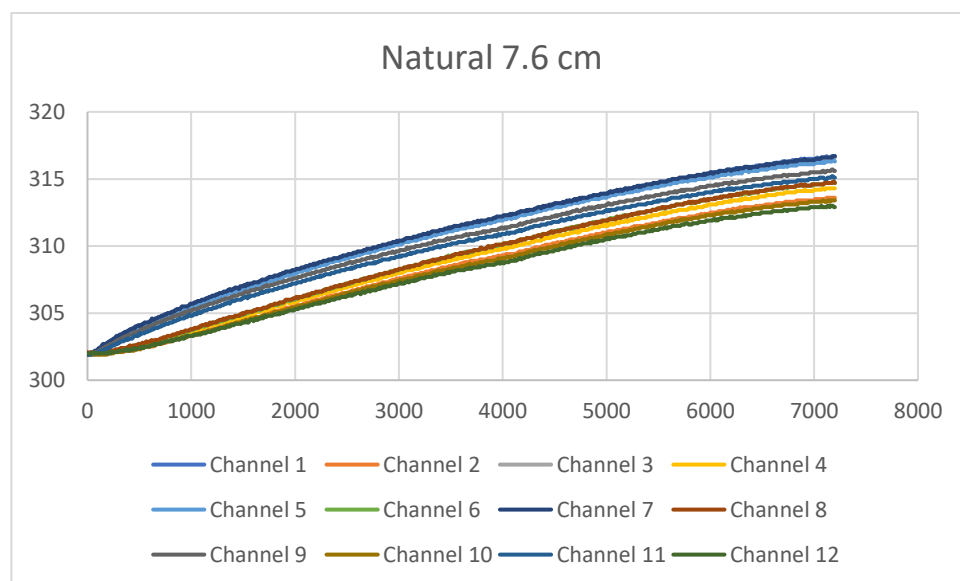
dijelaskan di sub bab sebelumnya. Pengaruh boundary layer terhadap temperature baterai juga dapat dibuktikan pada perbedaan suhu baterai yang terletak di dekat lubang outlet dan di dekat lubang inlet. Temperature baterai yang terletak di dekat inlet memiliki suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan dekat outlet karena baterai outlet mendapati boundary layer aliran yang membawa udara lebih panas karena disipasi panas oleh baterai inlet.suhu. Akan tetapi pada baterai tiga di percobaan variasi jarak 7.6 cm, terlihat bahwa suhu baterai lebih tinggi. Hal ini terjadi karena terdapat penurunan voltase secara drastis pada baterai tersebut saat mengeluarkan arus. Penurunan ini terjadi karena kondisi baterai yang sudah tidak baik sehingga terjadi penurunan voltase yang drastis tadi. Selanjutnya eksperimen menunjukkan hal yang bersesuaian dengan teori.

4.5 Perbandingan Temperatur dari Satu Variasi

Berikut ini adalah grafik yang membandingkan temperature dari masing-masing channel pada satu variasi.

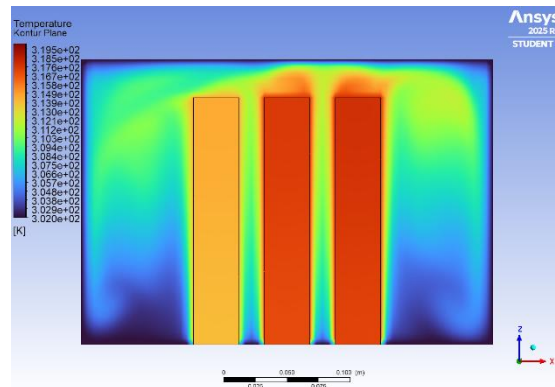


Gambar 4.13 Grafik Temperatur Tiap Channel Variasi Konveksi Natural 2 cm

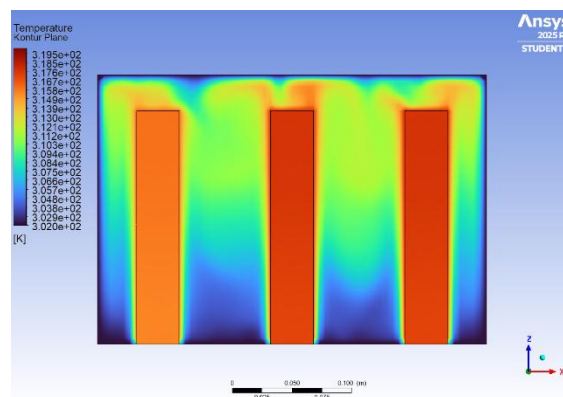


Gambar 4.14 Grafik Temperatur Tiap Channel Variasi Konveksi Natural 7.6 cm

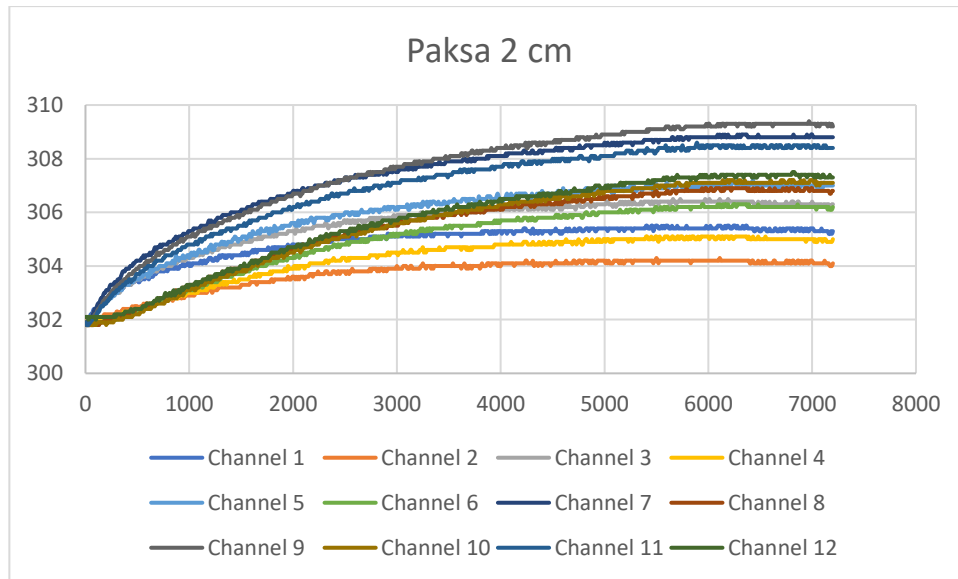
Grafik diatas menunjukkan bahwa kenaikan temperature dari tiap channel menyerupai karena menghasilkan tren yang sama. Akan tetapi pada channel 2, 4, 6, 8, 10, dan 12 cenderung lebih rendah daripada channel lainnya. Hal ini terjadi karena channel-channel yang disebutkan tadi terletak pada bagian bawah baterai. Suhu bagian bawah baterai pasti lebih dingin karena pada konveksi natural boundary layer termalnya menuju ke atas yang menyebabkan perbedaan suhu pada bagian atas baterai lebih sedikit. Dengan perbedaan suhu yang lebih sedikit, mengakibatkan perpindahan yang terjadi juga lebih kecil. Pada akhirnya panas pada bagian atas baterai terlepas lebih sedikit pada bagian bawah. *Boundary layer* dapat dilihat pada gambar di bawah, diilustrasikan menggunakan simulasi Ansys.



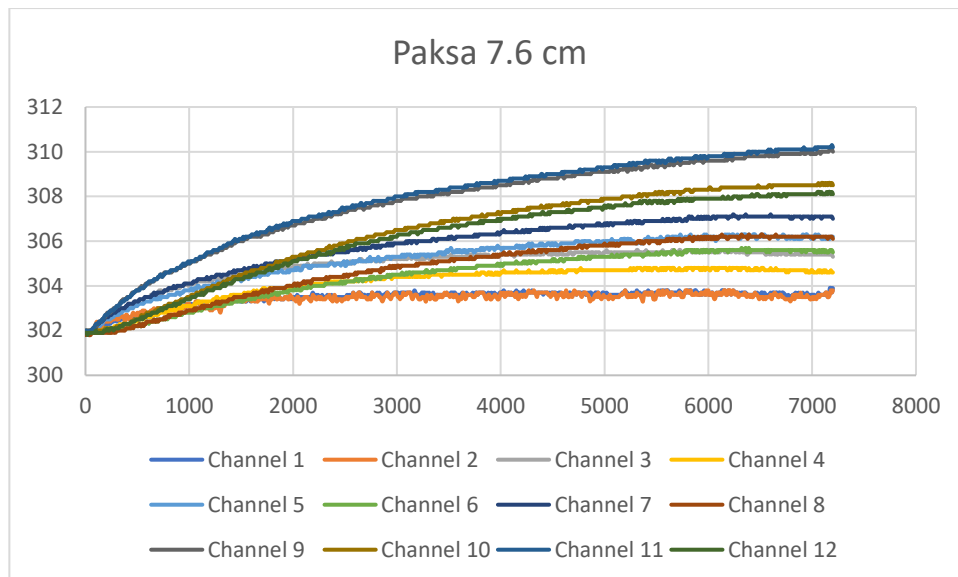
Gambar 4.15 *Boundary Layer* Konveksi Natural 2 cm



Gambar 4.16 *Boundary Layer* Konveksi Natural 7.6 cm

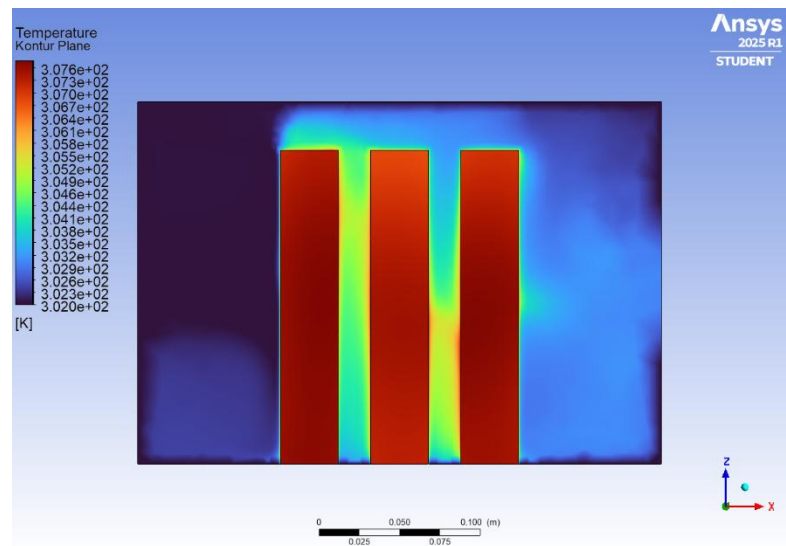


Gambar 4.17 Grafik Temperatur Tiap Channel Variasi Konveksi Paksa 2 cm

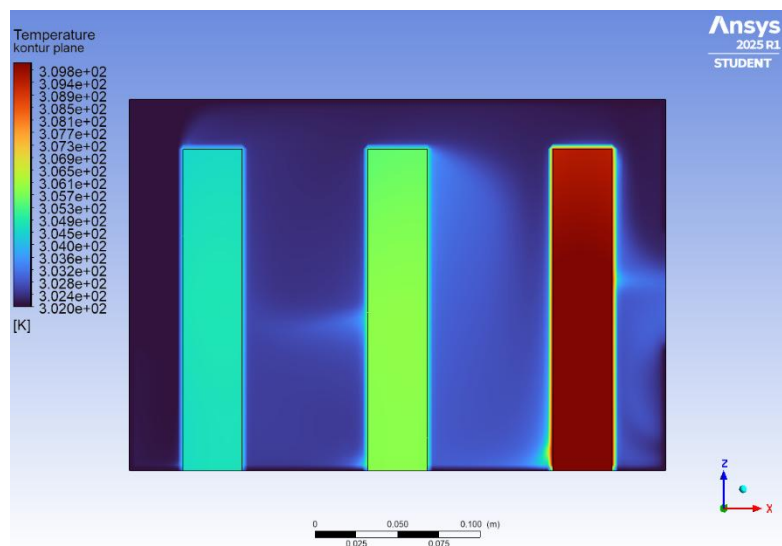


Gambar 4.18 Grafik Temperatur Tiap Channel Variasi Konveksi Paksa 7.6 cm

Pada konveksi paksa terlihat bahwa adanya variasi suhu walaupun dari tiap channel memiliki trend nya serupa. Pada channel 9, 10, 11, dan 12 suhu yang didapat lebih tinggi daripada channel lainnya. Hal ini terjadi karena channel-channel tersebut berada ppada baterai yang terletak di dekat *exhaust*. Ini berarti bahwa udara yang melewati baterai tersebut suhunya sudah tidak seperti suhu ruangan atau domain karena sudah menerima panas dari baterai-baterai yang ada di depannya. Hal ini juga dibuktikan dengan suhu terendah didapat dari channel 1 dan 2 karena kedua channel ini terpampang langsung oleh udara segar dari luar. Dibawah ini adalah ilustrasi *boundary layer* dari aliran konveksi paksa.



Gambar 4.19 *Boundary Layer* Konveksi Paksa 2 cm

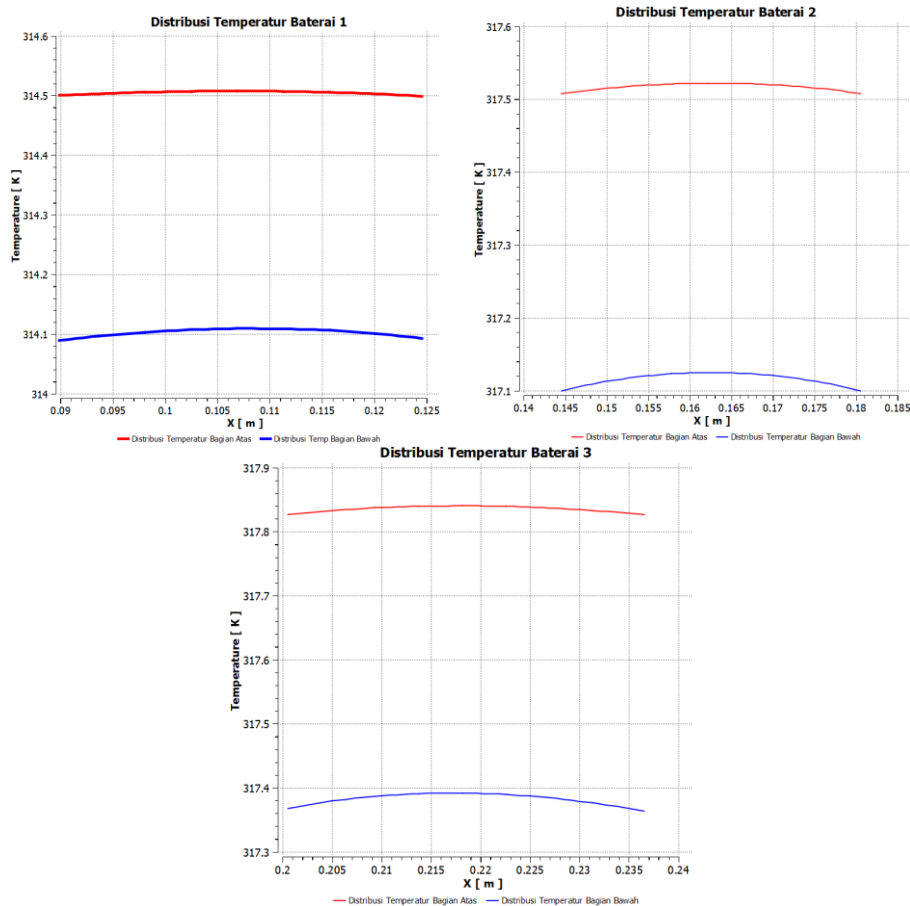


Gambar 4.20 *Boundary Layer* Konveksi Paksa 7.6 cm

4.6 Distribusi Temperatur pada Baterai

Berikut ini adalah pembahasan mengenai distribusi temperature pada baterai yang dilihat dari sisi tebal baterai.

4.6.1 Variasi Konveksi Natural 2 cm



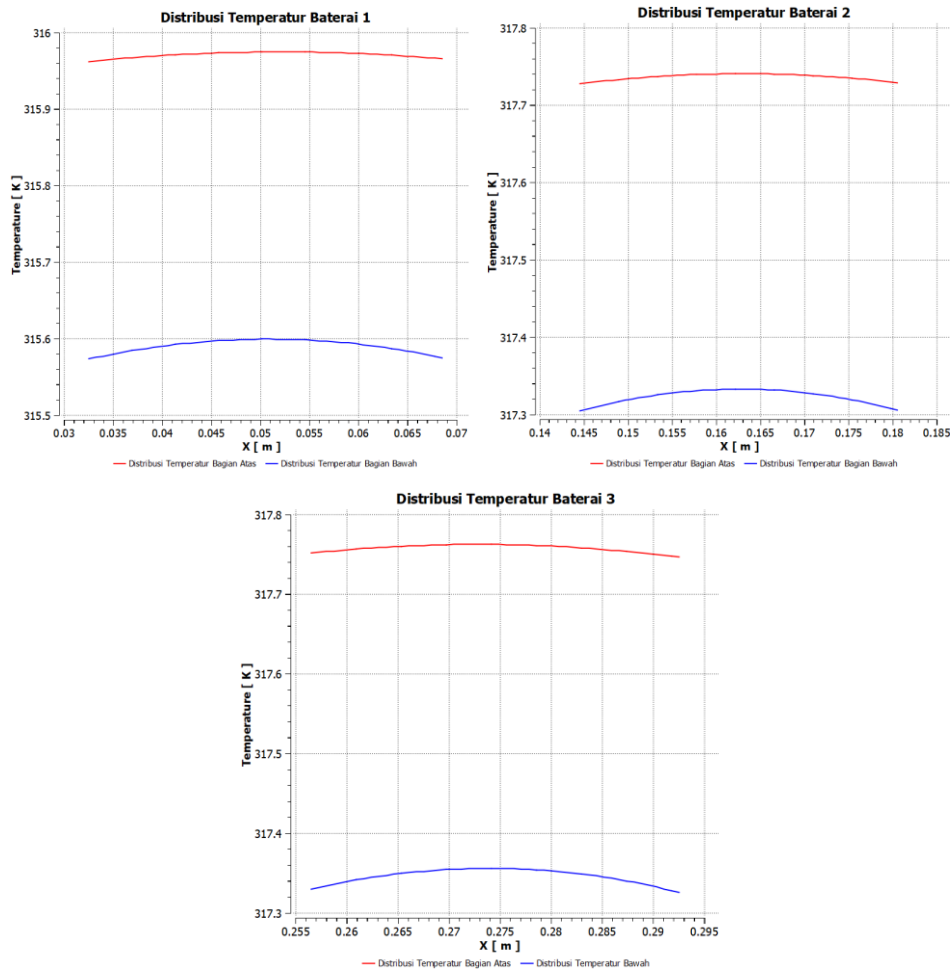
Gambar 4.21 Distribusi Temperatur Baterai Variasi Konveksi Natural 2 cm

Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan temperature dari baterai sepanjang tebalnya. Hal ini dikarenakan adanya konveksi pada bagian permukaan baterai depan dan belakangnya. Pada baterai satu grafik yang dihasilkan bai katas maupun bawah memiliki suhu yang lebih rendah pada bagian kirinya. Hal ini terjadi karena pada bagian kanan baterai satu, baterai tersebut berdekatan langsung dengan sumber panas lainnya, yaitu baterai dua. Akan tetapi pada baterai dua grafik yang dihasilkan simetris. Hal ini terjadi karena baterai dua pada bagian kanan maupun kiri berpapasan langsung dengan sumber panas lainnya, sehingga menghasilkan distribusi yang serupa pada tiap permukaan. Pada baterai tiga terjadi hal yang serupa pada baterai satu, tetapi dengan kondisi yang terbalik, bagian kanan baterai tiga memiliki suhu yang lebih rendah daripada bagian kiri. Suhu maksimum yang dicapai pada baterai satu adalah 314.5 K pada bagian atas dan 314.12 K pada bagian bawah. Pada baterai dua suhu maksimum bagian atas adalah 317.56 K dan bagian bawah 317.13 K. Sementara pada baterai tiga suhu maksimum bagian atas dan bawah berturut-turut adalah 317. 84 K dan 317.39 K. Berikut ini adalah table perbandingan temperature T_s dan $T(0)$

Tabel 4.6 Tabel Distribusi Temperatur Konveksi Natural 2 cm

	Ts1 (K)	Ts2 (K)	Ts3 (K)	Ts4 (K)	T (0) Atas (K)	T (0) Bawah (K)
Bat 1	314.340038	313.945408	314.340354	313.951784	314.5	314.12
Bat 2	317.311967	316.921846	317.312697	316.922191	317.56	317.13
Bat 3	317.638478	317.200146	317.637891	317.194718	317.84	317.39

4.6.2 Variasi Konveksi Natural 7.6 cm



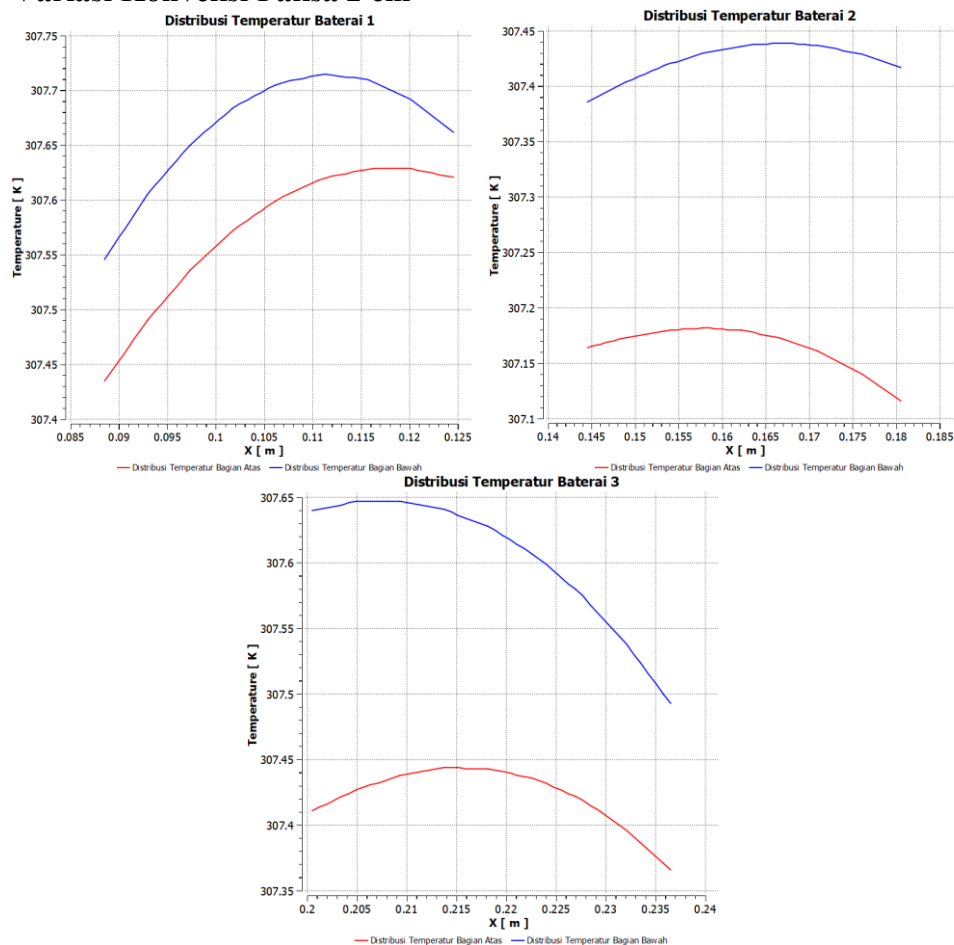
Gambar 4.22 Distribusi Temperatur Baterai Variasi Konveksi Natural 7.6 cm

Setelah dilakukan simulasi didapatkan plot grafik dari distribusi temperature pada baterai di variasi konveksi natural dengan jarak antar baterai 7.6 cm. Grafik-grafik ini menyerupai grafik yang dihasilkan oleh variasi konveksi natural dengan jarak antar baterai 2 cm karena cara perpindahan konveksinya sama, sehingga distribusi temperature yang didapat juga serupa. Perbedaannya hanya pada suhu maksimum dari tiap baterai, yaitu pada baterai satu bagian atas memiliki suhu tertinggi 315.98 K dan bagian bawah 315.6 K. Pada baterai dua bagian atas mencapai 317.75 K dan bagian bawah 317.34 K. Sementara pada baterai tiga bagian atasnya mencapai 317.765 K dan 317.36 K pada bagian bawah. Berikut ini adalah table perbandingan Ts dan T (0).

Tabel 4.7 Tabel Distrribusi Temperatur Konveksi Natural 7.6 cm

	Ts1 (K)	Ts2 (K)	Ts3 (K)	Ts4 (K)	T (0) Atas (K)	T (0) Bawah (K)
Bat 1	315.720032	315.346397	315.715042	315.348281	315.96	315.6
Bat 2	317.493292	317.0859	317.494435	317.087551	317.75	317.34
Bat 3	317.534234	317.135558	317.529601	317.131297	317.765	317.36

4.6.3 Variasi Konveksi Paksa 2 cm

**Gambar 4.23** Distribusi Temperatur Baterai Variasi Konveksi Paksa 2 cm

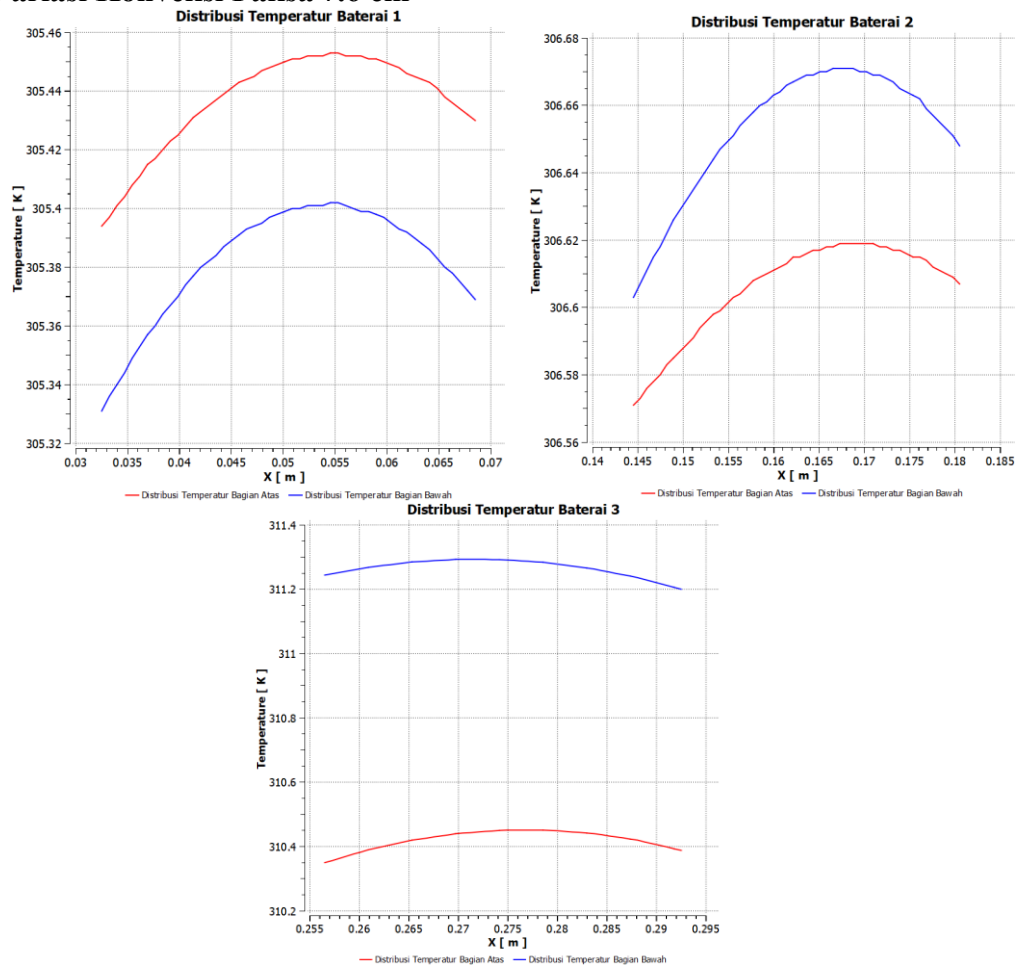
Pada variasi konveksi paksa didapat banyak perbedaan dari distribusi temperature baterai yang dihasilkan oleh konveksi natural. Pada bagian yang terkena aliran bersih dari lingkungan memiliki suhu paling rendah, sehingga distribusi temperature pada baterai satu sangat cenderung pada bagian kiri. Puncak temperaturnya juga terdapat pada lebih sebelah kanan dan mencapai 307.72 K pada bagian atas dan bagian bawahnya 307.63 K. Begitu pula dengan baterai tiga. Suhu nya jauh lebih rendah pada bagian wake aliran sehingga puncak distribusi temperature lebih condong ke kiri. Temperatur tertinggi pada baterai tiga adalah 307.649 K pada bagian atas dan 307.44 K pada bagian bawah. Hal menarik terjadi pada baterai dua, karena memiliki arah distribusi temperature yang berbeda antara bagian atas dan bawahnya. Hal ini terjadi karena pada bagian atas masih terkena aliran udara yang melewati kepala dari baterai, sementara untuk bagian bawah tidak terlewati sebaik bagian atasnya, sehingga perpindahan panas yang terjadi pada bagian bawah tidak sebaik yang

terjadi pada bagian atas. Temperatur maksimal baterai dua pada bagian atas adalah 307.44 K dan 307.18 K pada bagian bawah. Berikut ini adalah table perbandingan T_s dan $T(0)$.

Tabel 4.8 Tabel Distribusi Temperatur Konveksi Paksa 2 cm

	T_{s1} (K)	T_{s2} (K)	T_{s3} (K)	T_{s4} (K)	$T(0)$ Atas (K)	$T(0)$ Bawah (K)
Bat 1	304.732185	304.705704	304.757087	304.774529	307.72	307.63
Bat 2	305.700709	305.88077	305.745019	305.895406	307.649	307.18
Bat 3	307.64	307.41	307.49	307.38	307.65	307.44

4.6.4 Variasi Konveksi Paksa 7.6 cm



Gambar 4.24 Distribusi Temperatur Baterai Variasi Konveksi Paksa 7.6 cm

Pada variasi konveksi paksa dengan jarak antar baterai 7.6 cm juga memiliki hasil serupa dengan konveksi paksa dengan jarak antar baterai 2 cm. Akan tetapi memiliki perbedaan temperature maksimal atau $T(0)$ nya berbeda. Pada baterai satu, temperature maksimum pada bagian atas mencapai 305.455 K dan bagian bawah mencapai 305.4 K. Baterai dua memiliki temperatu maksimum pada bagian atas dan bawah berturut-turut adalah 306.67 K dan 306.2 K. Sementara unyuk baterai tiga temperature $T(0)$ pada bgaian atas adalah 310.45 K dan 311.3 K. Berikut ini adalah table perbandingan T_s dan $T(0)$.

Tabel 4. 9 Tabel Distribusi Temperatur Konveksi Paksa 2 cm

	Ts1 (K)	Ts2 (K)	Ts3 (K)	Ts4 (K)	T (0) Atas (K)	T (0) Bawah (K)
Bat 1	305.3975	305.3259	305.4298	305.3644	305.455	305.4
Bat 2	306.5502	306.5924	306.589	306.6299	3306.67	306.2
Bat 3	310.1457	311.0443	310.219	311.0112	310.45	311.3

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan eksperimen ini dapat diambil beberapa Kesimpulan, diantaranya:

1. Validasi pada simulasi konveksi natural dengan variasi jarak antar sel baterai 2 cm berhasil karena nilai RMSE pada tiap channel yang diambil data temperaturnya memiliki nilai dibawah 3° seperti yang dianjurkan oleh literatur dengan nilai RMSE terbesar terletak pada channel 1 sebesar 2.68° .
2. Validasi pada simulasi konveksi natural dengan variasi jarak antar sel baterai 7,6 cm berhasil karena nilai RMSE pada tiap channel yang diambil data temperaturnya memiliki nilai dibawah 3° seperti yang dianjurkan oleh literatur dengan nilai RMSE terbesar diambil pada channel 12 dengan nilai 1.64° .
3. Validasi pada simulasi konveksi paksa dengan variasi jarak antar sel baterai 2 cm berhasil dengan catatan karena nilai RMSE pada tiap channel yang diambil data temperaturnya memiliki nilai dibawah 3° seperti yang dianjurkan oleh literatur dengan nilai RMSE terbesar diambil pada channel 12 dengan nilai 2.64° .
4. Validasi pada simulasi konveksi paksa dengan variasi jarak antar sel baterai 7,6 cm berhasil karena nilai RMSE pada tiap channel yang diambil data temperaturnya memiliki nilai dibawah 3° seperti yang dianjurkan oleh literatur dengan nilai RMSE terbesar diambil pada channel 12 dengan nilai 1.32° .
5. Pada perbandingan kenaikan temperature berdasarkan jenis konveksi, didapat jenis konveksi natural dengan jarak antar sel baterai 2 cm yang memiliki temperature akhir paling tinggi hingga mencapai 318.1 K pada channel 7 dan 8. Sedangkan temperature akhir terendah di dapat pada eksperimen dengan konveksi paksa dan jarak antar sel baterai 7.6 cm pada channel 2 sebesar 303.8 K.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, terutama bagian eksperimen, penulis sangat menyarankan beberapa hal agar penelitian atau praktikum yang dilakukan yang menggunakan tulisan ini sebagai basis dapat dilakukan dengan lebih baik.

1. Saat eksperimen menggunakan baterai yang masih dalam keadaan baik sehingga perhitungan dengan menggunakan rumus Bernardi dapat mempresentasikan dengan jauh lebih baik dari hasil eksperimen.
2. Berikutnya adalah memperbaiki kotak domain udara yang dirasa terlalu rendah untuk baterai yang diuji yang menyebabkan sulitnya kabel arus untuk dapat terpasang dengan baik saat pengujian.
3. Menggunakan atau mempersiapkan kabel yang mumpuni agar dapat menahan beban arus yang tinggi.
4. Sebaiknya menggunakan *battery tester* yang memiliki tiga input dan output sekaligus agar baterai yang diuji memiliki keseragaman arus, voltase, dan SoC baterai yang lebih baik atau menggunakan *Battery Balancer*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Aristiawan, I, G. (2024). Studi Eksperimen dan Simulasi Perbandingan Panas Bangkitan Sebagai Fungsi Waktu dengan Kondisi Aktual pada Bakterai Lithium-Ion dengan Pendinginan Phase Change Material. Departemen Teknik Mesin. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Bernardi. Pawlikowski. Newman. (1985). A general Energy Balance for Battery Systems. Departement of Chemical Engineering. University of California.
- Choudhari. Dhoble. & Sathe. (2020). A Review on Effect of Heat Generation and Various Thermal Management Systems for Lithium-Ion Battery Used for Electric Vehicle. *Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101729>.
- Dale. (2022). Statistical Review of Energy 2022 71st Edition. BP.
- Diouf, B, Pode, R. (2014). Potential of Lithium-Ion Batteries in Renewable Energy. *Elsevier*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.058>.
- Ellaban, O. Abu-Rub, H. & Blaabjerg, F. (2014). Renewable Energy Resources: Current Status, Future Prospect, and Their Enabling Technology. *Elsevier*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>.
- Galatro, D. Al-Zareer, M. Da Silva, C. Romero. Amon, C. (2020). Thermal Behavior of Lithium Ion Batteries: Aging Heat Generation, Thermal management, and Failure. *Departement of Mechanical Engineering and Industrial Engineering, University of Toronto, Ontario*. DOI: 10.5098/hmt.14.17
- Incropera, F., P. Dewitt, P., D. Bergman, T., L. & Lavine, A., S. (2011). Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition. *Wiley*.
- Kalkan, O. Celen, A. & Bakirci, K. (2021). Experimental and Numerical Investigation of The LiFePO₄ Battery Cooling by Natural Convection. *Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102796>.
- Kalkan, O. Celen, A. Bakirci, K. Dalkilic, A, S. (2021). Experimental Investigation of Thermal Performance of Novel Cold Plate Design Used in a Li-Ion Pouch-Type Battery. *Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116885>.
- Li, Y. Zhou, Z. Su, L. Bai, M. Gao, L. Li, Y. Liu, X. Li, Y. & Song, Y. (2022). Numerical Simulations for Indirect and Direct Cooling Cooling of 54 V LiFePO₄ Battery Pack. *MDPI*, <https://doi.org/10.3390/en15134581>.
- Liang, J. Gan, Y. Yao, M. & Li, Y. (2020). Numerical Analysis of Capacity Fading for a LiFePO₄ Battery Under Different Current Rates and Ambient Temperatures. *Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120615>.
- Liu, H. Gao, X. Zhao, J. Yu, M. Niu, D. Yulong, J. (2022). Liquid-based Battery Thermal Management System Performance Improvement with Intersected Serpentine Channels. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.026>.
- Ma, S. Jiang, M. Tao, P. Song, C. Wu, J. Wang, J. Deng, T. Shang, W. (2018). Temperature Effect and Thermal Impact in Lithium-Ion Batteries: A Review. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002>

- Murali, G. Sravya, G. Jaya, J. Vamsi, N. (2021). A Review on Hybrid Thermal Management of Battery Packs and Its Cooling Performance by Enhanced PCM. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111513>.
- Panchal, Dincel. Agelin-Chaab. Fraser. Fowler. (2016). Experimental and Theoretical Investigations of Heat Generation Rates for A Water Cooled LiFePO₄ Battery. *Elsevier*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.126>
- Panchal, S. Gudlanarva, K. Tran, M. Herdem, M, S. Panchal, K. Fraser, R. & Forlwer, M. (2022). Numerical Simulation of Cooling Plate Using K-Epsilon Turbulence Model to Cool Down Larger-Sized Graphite/ LiFePO₄ Battery at High C-Rates. *MDPI*, <https://doi.org/10.3390/wevj13080138>.
- Ping, P. Peng, R. Komg, D. Chen, G. & Wen, J. (2018). Investigation on Thermal Management Performance of PCM-Fin Structure for Li-Ion Battery in High Temperature Environment. *Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.025>.
- Qin, P. Sun, J. Yang, X. Wang, Q. (2020). Battery Thermal Management System Based on The Forced Air Convection: A Review. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100097>.
- Sun, Zeyu. Guo, Yue. Zhang, Cheng. Whitehouse, Jon. Zhou, Quan. Xu, Hongming. Wang, Chongming. (2022). Experimental Study of Battery Passive Thermal Management System Using Copper Foam-Based Phase Change Materials. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100255>.
- Turner, J. (2016). Progress in Modeling and Simulation of Batteries. *SAE*.
- Vayrynen, A. & Salminen, J. (2011). Lithium Ion Battery Productions. *Elsevier*.
- Versteeg, H. & Malalasekera, W. (2007) An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (Second Edition). Harlow, Essex, England: *Pearson Education Limited*.
- Warner, T. T. (2015). The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types, and Terminology. *Elsevier*. doi:10.1016/j.jct.2011.09.005
- Zhang, Wei-Jun. (2010). Structure and Performance of LiFePO₄ Cathode Materials: A Review. *Elsevier*. <https://doi:10.1016/j.jpowsour.2010.11.113>

LAMPIRAN

Simulasi Baterai 1 Natural 2 cm												
Waktu (s)	Temperatur (K)											
	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8	Ch 9	Ch 10	Ch 11	Ch 12
0	302	302	302	302	302	302	302	302	302	302	302	302
100	302.22	302.22	302.22	302.22	302.28	302.28	302.28	302.28	302.29	302.29	302.29	302.29
200	302.43	302.43	302.43	302.43	302.56	302.56	302.56	302.56	302.57	302.57	302.57	302.57
300	302.65	302.65	302.65	302.65	302.84	302.84	302.84	302.84	302.86	302.85	302.86	302.85
400	302.87	302.86	302.87	302.86	303.12	303.11	303.12	303.11	303.14	303.13	303.14	303.13
500	303.06	303.05	303.06	303.05	303.37	303.36	303.37	303.36	303.39	303.38	303.39	303.38
600	303.27	303.26	303.27	303.26	303.65	303.64	303.65	303.64	303.67	303.66	303.67	303.66
700	303.49	303.47	303.49	303.47	303.93	303.92	303.93	303.92	303.95	303.94	303.95	303.93
800	303.7	303.68	303.7	303.68	304.21	304.19	304.21	304.19	304.23	304.21	304.23	304.21
900	303.91	303.88	303.91	303.89	304.49	304.47	304.49	304.47	304.51	304.48	304.51	304.48
1000	304.1	304.07	304.1	304.07	304.74	304.71	304.74	304.71	304.76	304.72	304.75	304.72
1100	304.31	304.27	304.31	304.27	305.02	304.98	305.02	304.98	305.03	304.99	305.03	304.98
1200	304.51	304.47	304.52	304.48	305.3	305.25	305.3	305.25	305.3	305.25	305.3	305.25
1300	304.72	304.67	304.72	304.68	305.57	305.52	305.57	305.52	305.57	305.51	305.57	305.51
1400	304.93	304.87	304.93	304.88	305.84	305.79	305.84	305.79	305.83	305.77	305.83	305.77
1500	305.11	305.05	305.11	305.05	306.09	306.02	306.09	306.02	306.07	306	306.07	306
1600	305.31	305.25	305.31	305.25	306.35	306.28	306.36	306.28	306.34	306.26	306.33	306.25
1700	305.51	305.44	305.51	305.44	306.62	306.54	306.62	306.54	306.6	306.51	306.59	306.51
1800	305.71	305.63	305.71	305.64	306.89	306.8	306.89	306.8	306.85	306.76	306.85	306.76
1900	305.91	305.82	305.91	305.83	307.15	307.05	307.15	307.05	307.11	307.01	307.11	307
2000	306.09	306	306.09	306	307.38	307.28	307.38	307.28	307.34	307.23	307.34	307.23
2100	306.28	306.18	306.29	306.19	307.64	307.53	307.64	307.53	307.59	307.47	307.59	307.47
2200	306.48	306.37	306.48	306.37	307.89	307.78	307.89	307.78	307.84	307.72	307.84	307.71
2300	306.67	306.56	306.67	306.56	308.14	308.02	308.14	308.02	308.09	307.96	308.09	307.95
2400	306.86	306.74	306.86	306.74	308.39	308.26	308.39	308.26	308.34	308.19	308.33	308.19
2500	307.03	306.91	307.03	306.91	308.61	308.48	308.61	308.48	308.56	308.41	308.55	308.4
2600	307.22	307.09	307.22	307.09	308.86	308.71	308.86	308.71	308.8	308.64	308.8	308.63
2700	307.41	307.27	307.41	307.27	309.1	308.94	309.1	308.94	309.04	308.87	309.04	308.87
2800	307.59	307.45	307.6	307.45	309.33	309.17	309.33	309.17	309.27	309.1	309.27	309.1
2900	307.76	307.61	307.76	307.61	309.54	309.38	309.54	309.38	309.49	309.3	309.48	309.3
3000	307.94	307.78	307.94	307.79	309.78	309.6	309.78	309.6	309.72	309.53	309.72	309.53
3100	308.13	307.96	308.13	307.96	310	309.83	310.01	309.83	309.95	309.75	309.95	309.75
3200	308.31	308.13	308.31	308.13	310.23	310.04	310.23	310.04	310.18	309.97	310.18	309.97
3300	308.48	308.3	308.48	308.3	310.45	310.26	310.45	310.26	310.41	310.19	310.4	310.19
3400	308.64	308.45	308.64	308.46	310.65	310.45	310.65	310.45	310.61	310.39	310.61	310.38
3500	308.82	308.62	308.82	308.63	310.87	310.66	310.87	310.66	310.83	310.6	310.83	310.6
3600	308.99	308.79	308.99	308.79	311.08	310.87	311.08	310.87	311.05	310.82	311.05	310.81
3700	309.17	308.96	309.17	308.96	311.29	311.07	311.29	311.07	311.27	311.03	311.27	311.02
3800	309.34	309.12	309.34	309.13	311.5	311.28	311.5	311.28	311.49	311.24	311.48	311.23
3900	309.49	309.27	309.49	309.27	311.69	311.45	311.69	311.45	311.68	311.42	311.68	311.42
4000	309.66	309.43	309.66	309.44	311.89	311.65	311.89	311.65	311.89	311.63	311.89	311.62

4100	309.82	309.59	309.83	309.6	312.09	311.84	312.09	311.84	312.1	311.83	312.1	311.83
4200	309.99	309.75	309.99	309.76	312.29	312.04	312.29	312.04	312.31	312.03	312.31	312.03
4300	310.15	309.91	310.16	309.91	312.48	312.22	312.48	312.22	312.52	312.23	312.51	312.23
4400	310.3	310.05	310.3	310.06	312.65	312.39	312.65	312.39	312.7	312.41	312.7	312.4
4500	310.46	310.21	310.46	310.21	312.84	312.58	312.84	312.58	312.9	312.61	312.9	312.6
4600	310.62	310.36	310.62	310.37	313.03	312.76	313.03	312.76	313.1	312.8	313.1	312.79
4700	310.78	310.52	310.78	310.52	313.21	312.94	313.21	312.94	313.3	312.99	313.3	312.99
4800	310.94	310.67	310.94	310.67	313.4	313.11	313.4	313.11	313.5	313.18	313.5	313.18
4900	311.08	310.8	311.08	310.81	313.56	313.27	313.56	313.27	313.67	313.35	313.67	313.35
5000	311.24	310.95	311.24	310.96	313.74	313.44	313.74	313.44	313.86	313.54	313.86	313.53
5100	311.39	311.1	311.39	311.1	313.91	313.61	313.91	313.61	314.06	313.72	314.05	313.72
5200	311.54	311.25	311.54	311.25	314.09	313.78	314.09	313.78	314.24	313.91	314.24	313.9
5300	311.68	311.38	311.68	311.38	314.24	313.93	314.24	313.93	314.41	314.07	314.41	314.06
5400	311.83	311.52	311.83	311.53	314.41	314.1	314.41	314.1	314.6	314.25	314.6	314.24
5500	311.98	311.67	311.98	311.67	314.58	314.26	314.58	314.26	314.78	314.43	314.78	314.42
5600	312.13	311.81	312.13	311.82	314.75	314.43	314.75	314.43	314.96	314.6	314.96	314.6
5700	312.28	311.95	312.28	311.96	314.91	314.59	314.91	314.59	315.14	314.78	315.14	314.77
5800	312.41	312.08	312.41	312.08	315.06	314.73	315.06	314.73	315.31	314.93	315.3	314.93
5900	312.55	312.22	312.55	312.22	315.23	314.89	315.23	314.89	315.48	315.11	315.48	315.1
6000	312.7	312.36	312.7	312.36	315.39	315.05	315.39	315.05	315.66	315.28	315.66	315.27
6100	312.84	312.49	312.84	312.5	315.55	315.21	315.55	315.21	315.83	315.45	315.83	315.44
6200	312.98	312.63	312.98	312.64	315.71	315.36	315.71	315.36	316	315.61	316	315.61
6300	313.11	312.75	313.11	312.76	315.86	315.5	315.86	315.5	316.16	315.76	316.15	315.76
6400	313.25	312.89	313.25	312.89	316.02	315.66	316.02	315.66	316.32	315.92	316.32	315.92
6500	313.39	313.02	313.39	313.03	316.18	315.81	316.18	315.81	316.49	316.09	316.49	316.08
6600	313.52	313.15	313.52	313.16	316.34	315.97	316.34	315.97	316.66	316.25	316.66	316.24
6700	313.66	313.29	313.66	313.29	316.49	316.12	316.5	316.13	316.82	316.41	316.82	316.4
6800	313.78	313.4	313.78	313.41	316.64	316.26	316.64	316.26	316.97	316.55	316.97	316.54
6900	313.92	313.53	313.92	313.54	316.8	316.42	316.8	316.42	317.13	316.71	317.13	316.7
7000	314.05	313.66	314.05	313.67	316.96	316.58	316.96	316.58	317.29	316.86	317.29	316.86
7100	314.18	313.79	314.18	313.8	317.12	316.73	317.12	316.73	317.45	317.02	317.45	317.01
7200	314.31	313.92	314.31	313.93	317.28	316.89	317.28	316.89	317.61	317.17	317.61	317.16

Eksperimen Baterai 1 Natural 2 cm												
Waktu (s)	Temperatur (K)											
	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8	Ch 9	Ch 10	Ch 11	Ch 12
0	302.1	302.1	302.1	302	301.9	302	302	302.1	302	302	302.1	302.1
100	302.4	302.1	302.3	302	302.2	302	302.4	302.4	302.2	302	302.2	302
200	302.8	302.1	302.7	302	302.7	302.1	303	303	302.7	302.1	302.7	302.1
300	303.4	302.2	303.1	302.2	303.2	302.2	303.5	303.5	303.3	302.2	303.1	302.2
400	303.8	302.4	303.6	302.4	303.6	302.4	304	304	303.6	302.3	303.5	302.4
500	304.2	302.5	303.9	302.5	303.9	302.6	304.3	304.3	304	302.5	303.9	302.5
600	304.6	302.7	304.3	302.7	304.3	302.8	304.8	304.8	304.4	302.7	304.3	302.8
700	304.9	302.9	304.6	302.9	304.6	303	305.1	305.1	304.8	303	304.7	303.1
800	305.2	303.1	305	303.2	305	303.3	305.5	305.5	305.1	303.1	305	303.2
900	305.5	303.3	305.2	303.3	305.3	303.5	305.7	305.7	305.5	303.4	305.3	303.5

1000	305.8	303.6	305.5	303.6	305.6	303.8	306.1	306.1	305.7	303.6	305.6	303.7
1100	306.2	303.8	305.9	303.9	306	304.1	306.4	306.4	306.1	303.9	305.9	304
1200	306.4	304	306.1	304.1	306.2	304.4	306.7	306.7	306.3	304.1	306.2	304.2
1300	306.7	304.3	306.4	304.3	306.5	304.6	307	307	306.7	304.4	306.6	304.5
1400	307	304.5	306.7	304.6	306.8	304.9	307.3	307.3	306.9	304.6	306.8	304.7
1500	307.2	304.7	306.9	304.8	307	305.1	307.5	307.5	307.1	304.8	307	304.9
1600	307.4	304.9	307.1	305	307.2	305.3	307.7	307.7	307.4	305.1	307.3	305.1
1700	307.7	305.1	307.4	305.3	307.5	305.6	308	308	307.6	305.3	307.5	305.3
1800	308	305.4	307.7	305.5	307.8	305.9	308.3	308.3	307.9	305.6	307.8	305.6
1900	308.2	305.6	307.9	305.8	308.1	306.1	308.6	308.6	308.1	305.8	308	305.8
2000	308.5	305.9	308.2	306.1	308.3	306.4	308.9	308.9	308.4	306.1	308.3	306
2100	308.7	306	308.4	306.2	308.5	306.6	309.1	309.1	308.7	306.3	308.5	306.3
2200	309	306.3	308.7	306.5	308.8	306.9	309.3	309.3	308.9	306.6	308.7	306.5
2300	309.2	306.5	308.9	306.7	309.1	307.1	309.6	309.6	309.2	306.8	309	306.7
2400	309.4	306.7	309.1	306.9	309.3	307.3	309.8	309.8	309.4	307.1	309.2	307
2500	309.6	306.9	309.3	307.1	309.5	307.6	310	310	309.6	307.3	309.4	307.1
2600	309.9	307.1	309.6	307.4	309.7	307.8	310.3	310.3	309.8	307.5	309.6	307.3
2700	310.1	307.3	309.8	307.6	310	308.1	310.5	310.5	310.1	307.7	309.9	307.6
2800	310.3	307.5	310	307.8	310.2	308.3	310.7	310.7	310.3	308	310.1	307.8
2900	310.5	307.7	310.2	308	310.4	308.5	310.9	310.9	310.5	308.1	310.3	308
3000	310.7	307.9	310.4	308.2	310.6	308.7	311.1	311.1	310.6	308.3	310.4	308.1
3100	310.9	308.1	310.6	308.4	310.7	308.9	311.3	311.3	310.9	308.6	310.6	308.3
3200	311.1	308.3	310.8	308.6	311	309.2	311.5	311.5	311	308.7	310.8	308.5
3300	311.3	308.4	311	308.8	311.2	309.3	311.8	311.8	311.3	309	311	308.7
3400	311.5	308.6	311.2	309	311.4	309.5	311.9	311.9	311.5	309.2	311.2	308.9
3500	311.7	308.9	311.5	309.3	311.6	309.8	312.2	312.2	311.6	309.4	311.4	309.1
3600	311.9	309	311.6	309.4	311.8	310	312.4	312.4	311.9	309.6	311.6	309.3
3700	312.1	309.2	311.9	309.7	312	310.2	312.6	312.6	312	309.8	311.8	309.5
3800	312.3	309.4	312.1	309.8	312.2	310.5	312.8	312.8	312.2	309.9	311.9	309.6
3900	312.5	309.5	312.2	310	312.4	310.6	313	313	312.4	310.2	312.2	309.8
4000	312.7	309.7	312.4	310.2	312.6	310.8	313.2	313.2	312.6	310.4	312.3	310
4100	312.9	310	312.7	310.5	312.8	311.1	313.4	313.4	312.8	310.6	312.5	310.2
4200	313.2	310.2	312.9	310.7	313.1	311.3	313.7	313.7	313	310.8	312.7	310.4
4300	313.2	310.3	313	310.8	313.2	311.4	313.8	313.8	313.2	310.9	312.9	310.5
4400	313.5	310.5	313.3	311.1	313.4	311.7	314	314	313.4	311.2	313	310.7
4500	313.6	310.7	313.4	311.2	313.6	311.9	314.2	314.2	313.5	311.3	313.2	310.9
4600	313.8	310.8	313.6	311.4	313.8	312.1	314.4	314.4	313.7	311.5	313.4	311.1
4700	313.9	310.9	313.7	311.5	313.9	312.2	314.5	314.5	313.9	311.7	313.5	311.2
4800	314.1	311	313.9	311.7	314.1	312.4	314.7	314.7	314	311.8	313.6	311.3
4900	314.2	311.2	314	311.9	314.3	312.6	314.9	314.9	314.1	312	313.8	311.5
5000	314.4	311.3	314.2	312	314.5	312.8	315.1	315.1	314.3	312.1	314	311.6
5100	314.6	311.5	314.4	312.3	314.7	313	315.3	315.3	314.6	312.4	314.2	311.9
5200	314.7	311.6	314.6	312.4	314.8	313.2	315.4	315.4	314.7	312.5	314.3	311.9
5300	314.9	311.8	314.7	312.5	314.9	313.3	315.6	315.6	314.8	312.7	314.4	312.1
5400	315.1	311.9	314.9	312.7	315.1	313.5	315.8	315.8	315	312.8	314.6	312.2
5500	315.2	312	315	312.8	315.3	313.6	315.9	315.9	315.1	313	314.7	312.4

5600	315.3	312.2	315.2	313	315.4	313.8	316.1	316.1	315.3	313.1	314.9	312.5
5700	315.5	312.3	315.3	313.1	315.6	314	316.2	316.2	315.4	313.3	315	312.6
5800	315.7	312.5	315.6	313.4	315.8	314.2	316.5	316.5	315.6	313.4	315.2	312.8
5900	315.8	312.7	315.7	313.5	316	314.4	316.6	316.6	315.7	313.6	315.3	313
6000	316	312.8	315.8	313.7	316.1	314.5	316.7	316.7	315.9	313.8	315.5	313.1
6100	316.1	312.9	315.9	313.8	316.2	314.7	316.9	316.9	315.9	313.8	315.5	313.2
6200	316.2	313	316	313.9	316.3	314.8	317	317	316.1	314	315.6	313.2
6300	316.3	313.2	316.2	314.1	316.5	315	317.2	317.2	316.3	314.1	315.8	313.4
6400	316.4	313.2	316.3	314.1	316.6	315	317.2	317.2	316.4	314.3	315.9	313.6
6500	316.5	313.3	316.4	314.3	316.7	315.1	317.4	317.4	316.5	314.4	316	313.7
6600	316.6	313.4	316.5	314.4	316.8	315.3	317.5	317.5	316.6	314.5	316.1	313.8
6700	316.7	313.5	316.6	314.5	316.9	315.4	317.6	317.6	316.7	314.6	316.2	313.9
6800	316.9	313.7	316.8	314.7	317.1	315.6	317.8	317.8	316.8	314.7	316.3	313.9
6900	317	313.8	316.9	314.8	317.2	315.7	317.9	317.9	316.9	314.8	316.4	314.1
7000	317.1	313.9	317	314.9	317.3	315.8	318	318	317	314.9	316.5	314.2
7100	317.2	313.9	317.1	315	317.4	315.9	318.1	318.1	317.1	315	316.6	314.3
7200	317.2	313.9	317.1	314.9	317.5	315.9	318.1	318.1	317.2	315	316.6	314.3

Eksperimen Natural 7.6 cm												
Waktu (s)	Temperatur (K)											
	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8	Ch 9	Ch 10	Ch 11	Ch 12
0	301.9	302	302	302	302	302	302	302.1	302	302	302	302
100	302.1	302	302.2	302	302.2	302	302.3	302.1	302.2	302	302.2	302
200	302.6	302	302.6	302	302.7	302.1	302.8	302.2	302.7	302.1	302.7	302.1
300	303.1	302.1	303.1	302.2	303.1	302.2	303.3	302.3	303.3	302.2	303.1	302.2
400	303.6	302.2	303.5	302.3	303.5	302.5	303.7	302.5	303.6	302.3	303.5	302.4
500	303.9	302.4	303.9	302.6	303.9	302.6	304.1	302.7	304	302.5	303.9	302.5
600	304.3	302.5	304.3	302.7	304.2	302.8	304.4	302.9	304.4	302.7	304.3	302.8
700	304.6	302.7	304.6	302.9	304.5	303	304.7	303.1	304.8	303	304.7	303.1
800	304.9	302.9	304.9	303.1	304.8	303.3	305	303.3	305.1	303.1	305	303.2
900	305.3	303.2	305.2	303.4	305.2	303.5	305.4	303.6	305.5	303.4	305.3	303.5
1000	305.5	303.3	305.5	303.6	305.4	303.7	305.7	303.8	305.7	303.6	305.6	303.7
1100	305.8	303.6	305.9	303.9	305.7	304	306	304.1	306.1	303.9	305.9	304
1200	306.1	303.8	306.1	304.1	306	304.2	306.3	304.3	306.3	304.1	306.2	304.2
1300	306.4	304	306.4	304.3	306.3	304.4	306.5	304.5	306.7	304.4	306.6	304.5
1400	306.6	304.2	306.7	304.5	306.5	304.7	306.8	304.7	306.9	304.6	306.8	304.7
1500	306.9	304.4	306.8	304.7	306.8	304.9	307	304.9	307.1	304.8	307	304.9
1600	307.2	304.7	307.2	305	307.1	305.2	307.3	305.2	307.4	305.1	307.3	305.1
1700	307.4	304.9	307.4	305.2	307.3	305.4	307.5	305.4	307.6	305.3	307.5	305.3
1800	307.7	305.2	307.7	305.5	307.6	305.7	307.8	305.7	307.9	305.6	307.8	305.6
1900	307.9	305.4	307.9	305.7	307.8	305.9	308	305.9	308.1	305.8	308	305.8
2000	308	305.5	308.1	305.8	307.9	306	308.2	306.1	308.4	306.1	308.3	306
2100	308.4	305.8	308.4	306.1	308.2	306.3	308.5	306.3	308.7	306.3	308.5	306.3
2200	308.6	306	308.6	306.3	308.4	306.5	308.7	306.6	308.9	306.6	308.7	306.5
2300	308.8	306.2	308.8	306.6	308.6	306.7	308.9	306.8	309.2	306.8	309	306.7
2400	309	306.3	309	306.7	308.9	307	309.1	307	309.4	307.1	309.2	307

2500	309.2	306.5	309.2	306.9	309.1	307.2	309.3	307.2	309.6	307.3	309.4	307.1
2600	309.5	306.8	309.5	307.2	309.3	307.4	309.6	307.4	309.8	307.5	309.6	307.3
2700	309.7	307	309.7	307.4	309.5	307.6	309.8	307.6	310.1	307.7	309.9	307.6
2800	309.9	307.2	309.8	307.5	309.7	307.8	310	307.8	310.3	308	310.1	307.8
2900	310.1	307.3	310.1	307.8	309.9	308	310.2	308	310.5	308.1	310.3	308
3000	310.3	307.5	310.3	308	310.1	308.2	310.4	308.3	310.6	308.3	310.4	308.1
3100	310.5	307.7	310.5	308.2	310.3	308.4	310.6	308.4	310.9	308.6	310.6	308.3
3200	310.7	307.9	310.7	308.4	310.5	308.6	310.8	308.6	311	308.7	310.8	308.5
3300	310.9	308.1	310.9	308.6	310.8	308.9	311	308.9	311.3	309	311	308.7
3400	311.1	308.3	311.1	308.8	310.9	309	311.2	309.1	311.5	309.2	311.2	308.9
3500	311.3	308.5	311.3	308.9	311.1	309.2	311.4	309.2	311.6	309.4	311.4	309.1
3600	311.5	308.7	311.4	309.2	311.3	309.4	311.6	309.4	311.9	309.6	311.6	309.3
3700	311.6	308.9	311.7	309.3	311.5	309.6	311.7	309.6	312	309.8	311.8	309.5
3800	311.8	309	311.8	309.5	311.6	309.8	311.9	309.8	312.2	309.9	311.9	309.6
3900	311.9	309.1	311.9	309.6	311.8	309.9	312	309.9	312.4	310.2	312.2	309.8
4000	312.1	309.3	312.1	309.8	311.9	310.1	312.2	310.1	312.6	310.4	312.3	310
4100	312.2	309.4	312.3	309.9	312.1	310.3	312.4	310.3	312.8	310.6	312.5	310.2
4200	312.4	309.6	312.4	310.1	312.3	310.5	312.6	310.5	313	310.8	312.7	310.4
4300	312.6	309.8	312.6	310.3	312.5	310.7	312.7	310.7	313.2	310.9	312.9	310.5
4400	312.9	310	312.8	310.5	312.7	310.9	312.9	310.9	313.4	311.2	313	310.7
4500	313	310.2	313	310.7	312.9	311.1	313.2	311.1	313.5	311.3	313.2	310.9
4600	313.2	310.3	313.2	310.9	313	311.3	313.3	311.2	313.7	311.5	313.4	311.1
4700	313.4	310.5	313.4	311.1	313.2	311.4	313.5	311.4	313.9	311.7	313.5	311.2
4800	313.5	310.7	313.5	311.2	313.4	311.6	313.6	311.6	314	311.8	313.6	311.3
4900	313.7	310.9	313.7	311.4	313.5	311.8	313.8	311.8	314.1	312	313.8	311.5
5000	313.9	311	313.8	311.5	313.6	311.9	313.9	311.9	314.3	312.1	314	311.6
5100	314.1	311.2	314.1	311.8	313.9	312.2	314.2	312.2	314.6	312.4	314.2	311.9
5200	314.2	311.3	314.1	311.8	314	312.2	314.2	312.2	314.7	312.5	314.3	311.9
5300	314.4	311.5	314.3	312.1	314.1	312.4	314.5	312.5	314.8	312.7	314.4	312.1
5400	314.5	311.6	314.4	312.2	314.3	312.6	314.6	312.6	315	312.8	314.6	312.2
5500	314.7	311.7	314.6	312.3	314.4	312.8	314.7	312.8	315.1	313	314.7	312.4
5600	314.9	311.9	314.8	312.5	314.6	312.9	314.9	312.9	315.3	313.1	314.9	312.5
5700	315	312.1	315	312.7	314.8	313.1	315.1	313.1	315.4	313.3	315	312.6
5800	315.2	312.2	315.1	312.8	314.9	313.2	315.2	313.3	315.6	313.4	315.2	312.8
5900	315.2	312.3	315.2	312.9	315	313.3	315.3	313.4	315.7	313.6	315.3	313
6000	315.4	312.5	315.4	313.1	315.1	313.5	315.5	313.5	315.9	313.8	315.5	313.1
6100	315.6	312.6	315.5	313.2	315.3	313.6	315.6	313.7	315.9	313.8	315.5	313.2
6200	315.6	312.6	315.5	313.3	315.3	313.7	315.6	313.7	316.1	314	315.6	313.2
6300	315.7	312.7	315.7	313.4	315.4	313.8	315.8	313.9	316.3	314.1	315.8	313.4
6400	315.9	312.9	315.8	313.6	315.6	314	315.9	314	316.4	314.3	315.9	313.6
6500	316	313	315.9	313.7	315.7	314.1	316	314.1	316.5	314.4	316	313.7
6600	316.1	313.1	316	313.8	315.8	314.2	316.1	314.3	316.6	314.5	316.1	313.8
6700	316.3	313.2	316.2	313.9	315.9	314.3	316.2	314.3	316.7	314.6	316.2	313.9
6800	316.4	313.3	316.3	314	316	314.4	316.3	314.4	316.8	314.7	316.3	313.9
6900	316.5	313.4	316.3	314.1	316.1	314.5	316.4	314.5	316.9	314.8	316.4	314.1
7000	316.5	313.4	316.4	314.2	316.1	314.6	316.4	314.6	317	314.9	316.5	314.2

7100	316.6	313.5	316.5	314.2	316.2	314.7	316.6	314.7	317.1	315	316.6	314.3
7200	316.7	313.6	316.6	314.3	316.3	314.7	316.7	314.7	317.2	315	316.6	314.3

Simulasi Natural 7.6 cm												
Waktu (s)	Temperatur (K)											
	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8	Ch 9	Ch 10	Ch 11	Ch 12
0	301.9	302	302	302	302	302	302	302	302	302	302	302
100	302.1	302.21	302.21	302.21	302.27	302.27	302.27	302.27	302.29	302.29	302.29	302.29
200	302.6	302.42	302.43	302.42	302.55	302.55	302.55	302.55	302.57	302.57	302.57	302.57
300	303.1	302.64	302.64	302.64	302.82	302.82	302.82	302.82	302.85	302.85	302.85	302.85
400	303.6	302.85	302.86	302.85	303.1	303.09	303.1	303.09	303.14	303.13	303.14	303.13
500	303.9	303.05	303.06	303.05	303.35	303.34	303.35	303.34	303.39	303.38	303.39	303.38
600	304.3	303.27	303.28	303.27	303.62	303.61	303.62	303.61	303.67	303.66	303.67	303.66
700	304.6	303.48	303.5	303.48	303.9	303.88	303.9	303.88	303.95	303.93	303.95	303.93
800	304.9	303.7	303.72	303.7	304.18	304.15	304.18	304.15	304.23	304.21	304.23	304.2
900	305.3	303.92	303.94	303.92	304.46	304.42	304.46	304.43	304.51	304.47	304.51	304.47
1000	305.5	304.12	304.14	304.12	304.7	304.67	304.7	304.67	304.75	304.72	304.75	304.72
1100	305.8	304.34	304.37	304.34	304.98	304.93	304.98	304.94	305.02	304.98	305.02	304.98
1200	306.1	304.55	304.59	304.55	305.25	305.2	305.25	305.2	305.3	305.24	305.29	305.24
1300	306.4	304.77	304.81	304.77	305.52	305.47	305.52	305.47	305.56	305.51	305.56	305.51
1400	306.6	304.99	305.03	304.99	305.79	305.73	305.79	305.73	305.83	305.76	305.83	305.76
1500	306.9	305.18	305.23	305.18	306.04	305.97	306.04	305.97	306.07	306	306.07	306
1600	307.2	305.4	305.46	305.4	306.3	306.22	306.3	306.23	306.33	306.25	306.33	306.25
1700	307.4	305.61	305.68	305.61	306.57	306.48	306.57	306.48	306.59	306.5	306.59	306.5
1800	307.7	305.83	305.9	305.83	306.83	306.74	306.83	306.74	306.85	306.75	306.85	306.75
1900	307.9	306.04	306.12	306.04	307.09	306.99	307.09	306.99	307.1	307	307.1	307
2000	308	306.23	306.31	306.23	307.33	307.22	307.33	307.22	307.33	307.22	307.33	307.22
2100	308.4	306.44	306.53	306.44	307.59	307.47	307.59	307.47	307.58	307.47	307.58	307.46
2200	308.6	306.65	306.75	306.65	307.84	307.71	307.84	307.71	307.83	307.71	307.83	307.71
2300	308.8	306.86	306.96	306.86	308.09	307.96	308.09	307.96	308.08	307.95	308.08	307.95
2400	309	307.06	307.17	307.06	308.34	308.2	308.34	308.2	308.32	308.18	308.32	308.18
2500	309.2	307.25	307.36	307.25	308.56	308.41	308.56	308.41	308.54	308.4	308.54	308.39
2600	309.5	307.45	307.57	307.45	308.81	308.65	308.81	308.65	308.78	308.63	308.78	308.63
2700	309.7	307.65	307.78	307.66	309.05	308.88	309.05	308.89	309.02	308.86	309.01	308.86
2800	309.9	307.85	307.99	307.86	309.29	309.12	309.29	309.12	309.25	309.09	309.25	309.09
2900	310.1	308.03	308.18	308.03	309.5	309.32	309.5	309.32	309.46	309.29	309.46	309.29
3000	310.3	308.23	308.38	308.23	309.73	309.55	309.73	309.55	309.69	309.52	309.69	309.51
3100	310.5	308.43	308.58	308.43	309.96	309.77	309.96	309.77	309.92	309.74	309.92	309.74
3200	310.7	308.62	308.78	308.62	310.19	309.99	310.19	309.99	310.15	309.96	310.15	309.96
3300	310.9	308.81	308.98	308.81	310.42	310.21	310.42	310.21	310.37	310.18	310.37	310.17
3400	311.1	308.98	309.15	308.99	310.62	310.4	310.62	310.41	310.57	310.37	310.57	310.37
3500	311.3	309.17	309.35	309.17	310.84	310.62	310.84	310.62	310.79	310.58	310.79	310.58
3600	311.5	309.36	309.54	309.36	311.05	310.83	311.05	310.83	311.01	310.8	311.01	310.79
3700	311.6	309.55	309.74	309.55	311.27	311.04	311.27	311.04	311.23	311.01	311.23	311
3800	311.8	309.73	309.92	309.73	311.48	311.24	311.48	311.24	311.44	311.21	311.44	311.21
3900	311.9	309.89	310.1	309.9	311.67	311.42	311.67	311.42	311.63	311.4	311.63	311.4

4000	312.1	310.08	310.28	310.08	311.87	311.62	311.87	311.62	311.85	311.6	311.84	311.6
4100	312.2	310.25	310.47	310.26	312.07	311.82	312.07	311.82	312.06	311.8	312.05	311.8
4200	312.4	310.43	310.65	310.43	312.28	312.02	312.28	312.02	312.26	312.01	312.26	312
4300	312.6	310.61	310.83	310.61	312.48	312.21	312.48	312.21	312.46	312.2	312.46	312.2
4400	312.9	310.77	311	310.77	312.65	312.38	312.65	312.38	312.65	312.38	312.64	312.38
4500	313	310.94	311.18	310.94	312.85	312.57	312.85	312.57	312.85	312.58	312.84	312.57
4600	313.2	311.11	311.35	311.12	313.04	312.76	313.04	312.76	313.05	312.77	313.04	312.77
4700	313.4	311.29	311.53	311.29	313.23	312.94	313.23	312.94	313.24	312.96	313.24	312.96
4800	313.5	311.46	311.71	311.46	313.41	313.12	313.41	313.13	313.44	313.15	313.43	313.15
4900	313.7	311.61	311.86	311.61	313.58	313.29	313.58	313.29	313.61	313.32	313.61	313.32
5000	313.9	311.78	312.04	311.78	313.77	313.47	313.77	313.47	313.8	313.51	313.8	313.5
5100	314.1	311.94	312.21	311.94	313.95	313.64	313.95	313.64	313.99	313.69	313.99	313.69
5200	314.2	312.11	312.38	312.11	314.13	313.82	314.13	313.82	314.18	313.87	314.18	313.87
5300	314.4	312.26	312.53	312.26	314.29	313.97	314.29	313.97	314.34	314.03	314.34	314.03
5400	314.5	312.42	312.7	312.42	314.47	314.15	314.47	314.15	314.53	314.21	314.53	314.21
5500	314.7	312.59	312.87	312.59	314.65	314.32	314.65	314.32	314.71	314.39	314.71	314.39
5600	314.9	312.75	313.04	312.75	314.82	314.49	314.82	314.49	314.89	314.57	314.89	314.56
5700	315	312.91	313.21	312.91	314.99	314.66	314.99	314.66	315.07	314.74	315.07	314.74
5800	315.2	313.06	313.36	313.06	315.15	314.81	315.15	314.81	315.23	314.9	315.23	314.89
5900	315.2	313.22	313.53	313.22	315.32	314.97	315.32	314.97	315.41	315.07	315.4	315.07
6000	315.4	313.39	313.7	313.39	315.49	315.14	315.49	315.14	315.58	315.24	315.58	315.23
6100	315.6	313.55	313.87	313.55	315.66	315.31	315.66	315.31	315.76	315.41	315.75	315.4
6200	315.6	313.71	314.04	313.71	315.83	315.47	315.83	315.47	315.93	315.57	315.92	315.57
6300	315.7	313.86	314.19	313.86	315.98	315.62	315.98	315.62	316.08	315.72	316.08	315.72
6400	315.9	314.02	314.36	314.03	316.15	315.78	316.15	315.78	316.25	315.89	316.25	315.88
6500	316	314.19	314.53	314.19	316.32	315.95	316.32	315.95	316.42	316.05	316.41	316.05
6600	316.1	314.35	314.7	314.35	316.49	316.11	316.49	316.11	316.58	316.21	316.58	316.21
6700	316.3	314.52	314.87	314.52	316.66	316.27	316.66	316.27	316.74	316.37	316.74	316.37
6800	316.4	314.67	315.02	314.67	316.81	316.42	316.81	316.42	316.89	316.51	316.89	316.51
6900	316.5	314.84	315.19	314.84	316.98	316.59	316.98	316.59	317.06	316.67	317.05	316.67
7000	316.5	315	315.36	315.01	317.15	316.75	317.15	316.75	317.22	316.83	317.21	316.82
7100	316.6	315.17	315.54	315.18	317.32	316.92	317.32	316.92	317.38	316.98	317.37	316.98
7200	316.7	315.35	315.72	315.35	317.49	317.09	317.49	317.09	317.53	317.14	317.53	317.13

Eksperimen Paksa 2 cm												
Waktu (s)	Temperatur (K)											
	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8	Ch 9	Ch 10	Ch 11	Ch 12
90	302.4	302.1	302.3	302	302.2	301.9	301.9	302.4	302.2	301.9	302.1	302.1
190	302.7	302.2	302.7	302	302.7	302	302	303	302.8	301.9	302.6	302.1
290	303	302.2	303	302.1	303.1	302	302	303.4	303.2	302	303	302.1
390	303.3	302.4	303.3	302.3	303.3	302.2	302.2	303.9	303.5	302.1	303.4	302.3
490	303.5	302.5	303.5	302.4	303.5	302.3	302.3	304.2	303.9	302.2	303.7	302.4
590	303.6	302.6	303.7	302.5	303.7	302.5	302.5	304.4	304.2	302.4	303.9	302.6
690	303.8	302.7	303.8	302.6	303.9	302.6	302.6	304.7	304.5	302.6	304.2	302.8
790	303.8	302.7	304	302.8	304.1	302.8	302.8	304.8	304.6	302.7	304.4	302.9
890	303.9	302.8	304.2	302.8	304.3	302.9	302.9	305	304.9	302.9	304.6	303.1

990	304.1	302.9	304.3	303	304.4	303.1	303.1	305.3	305.1	303.1	304.8	303.2
1090	304.1	303	304.4	303.1	304.6	303.2	303.2	305.4	305.3	303.2	304.9	303.4
1190	304.3	303.1	304.6	303.3	304.7	303.4	303.4	305.7	305.4	303.4	305.1	303.6
1290	304.4	303.2	304.7	303.3	304.8	303.5	303.5	305.8	305.6	303.5	305.2	303.7
1390	304.4	303.2	304.7	303.4	304.9	303.6	303.6	305.9	305.7	303.7	305.4	303.9
1490	304.4	303.2	304.8	303.5	305	303.7	303.7	306	305.9	303.8	305.5	304
1590	304.5	303.4	305	303.6	305.1	303.9	303.9	306.2	306	303.9	305.6	304.1
1690	304.6	303.4	305.1	303.7	305.4	304	304	306.4	306.2	304.1	305.8	304.2
1790	304.6	303.5	305.1	303.7	305.3	304.1	304.1	306.5	306.4	304.3	305.9	304.5
1890	304.7	303.5	305.2	303.8	305.5	304.2	304.2	306.6	306.5	304.4	306	304.6
1990	304.8	303.6	305.3	303.9	305.6	304.3	304.3	306.7	306.6	304.5	306.1	304.7
2090	304.8	303.6	305.4	304	305.7	304.5	304.5	306.9	306.7	304.6	306.3	304.8
2190	304.9	303.6	305.4	304.1	305.7	304.5	304.5	306.9	306.9	304.8	306.4	304.9
2290	304.9	303.7	305.5	304.1	305.8	304.6	304.6	307	307	304.9	306.5	305.1
2390	305	303.8	305.6	304.3	305.8	304.8	304.8	307.1	307.1	305	306.6	305.2
2490	305	303.8	305.7	304.3	305.9	304.8	304.8	307.2	307.2	305.1	306.7	305.3
2590	305	303.8	305.6	304.3	305.9	304.9	304.9	307.3	307.3	305.2	306.9	305.4
2690	305	303.8	305.6	304.3	306	304.9	304.9	307.4	307.4	305.2	306.8	305.4
2790	305.1	303.9	305.7	304.4	306.1	305	305	307.4	307.5	305.4	307	305.5
2880	305.1	303.9	305.8	304.4	306.2	305.1	305.1	307.5	307.6	305.4	307	305.7
2990	305.1	303.9	305.8	304.5	306.1	305.2	305.2	307.5	307.7	305.6	307.1	305.7
3090	305.1	304	305.9	304.5	306.2	305.3	305.3	307.7	307.8	305.7	307.2	305.8
3190	305.1	303.9	305.8	304.5	306.3	305.2	305.2	307.7	307.9	305.7	307.2	305.9
3290	305.2	304	305.9	304.6	306.4	305.4	305.4	307.8	307.9	305.8	307.3	306
3390	305.2	304	305.9	304.6	306.3	305.4	305.4	307.8	308	305.9	307.4	306
3490	305.1	304	306	304.7	306.3	305.4	305.4	307.9	308	305.9	307.3	306.2
3590	305.2	304	306	304.7	306.4	305.5	305.5	307.9	308.1	306	307.5	306.2
3690	305.2	303.9	306	304.6	306.4	305.5	305.5	307.9	308.2	306.1	307.6	306.3
3790	305.2	304	306.1	304.7	306.6	305.6	305.6	308	308.2	306.1	307.6	306.3
3890	305.2	304.1	306.1	304.7	306.6	305.6	305.6	308.1	308.3	306.2	307.6	306.4
3990	305.3	304	306.1	304.8	306.5	305.6	305.6	308.1	308.4	306.3	307.7	306.5
4090	305.3	304.1	306.1	304.8	306.6	305.7	305.7	308.2	308.4	306.4	307.8	306.5
4190	305.3	304.1	306.1	304.8	306.7	305.7	305.7	308.2	308.5	306.4	307.8	306.6
4290	305.2	304.1	306.1	304.8	306.5	305.7	305.7	308.2	308.5	306.4	307.9	306.6
4390	305.3	304.1	306.2	304.8	306.7	305.8	305.8	308.3	308.5	306.4	307.8	306.6
4490	305.3	304.1	306.2	304.9	306.7	305.8	305.8	308.3	308.6	306.5	307.9	306.7
4590	305.2	304.1	306.1	304.8	306.7	305.8	305.8	308.3	308.7	306.6	308	306.7
4690	305.3	304.1	306.2	304.8	306.7	305.8	305.8	308.3	308.7	306.6	308	306.8
4790	305.3	304.1	306.2	304.8	306.7	305.8	305.8	308.4	308.8	306.7	308	306.8
4890	305.4	304.2	306.3	304.9	306.8	306	306	308.5	308.8	306.7	308.1	306.9
4990	305.4	304.2	306.3	305	306.8	306	306	308.5	308.9	306.7	308.1	306.9
5090	305.4	304.2	306.3	305	306.7	306	306	308.6	308.9	306.8	308.1	307
5190	305.3	304.1	306.3	305	306.8	306	306	308.6	308.9	306.8	308.2	307
5280	305.4	304.2	306.4	305	307	306.1	306.1	308.6	309	306.9	308.2	307.1
5390	305.4	304.2	306.4	305	306.9	306.1	306.1	308.7	309	306.9	308.2	307.1
5490	305.5	304.2	306.4	305.1	307.1	306.2	306.2	308.7	309.1	307	308.2	307.2

5590	305.5	304.2	306.4	305.1	307	306.1	306.1	308.7	309.2	307	308.5	307.3
5690	305.4	304.2	306.3	305	306.9	306.1	306.1	308.7	309.2	307.1	308.4	307.3
5790	305.5	304.2	306.4	305.1	307.1	306.2	306.2	308.8	309.2	307.1	308.3	307.3
5890	305.4	304.2	306.4	305	306.9	306.2	306.2	308.8	309.2	307.1	308.6	307.3
5990	305.4	304.2	306.4	305.1	307	306.2	306.2	308.8	309.2	307.1	308.5	307.3
6090	305.5	304.2	306.4	305.1	307	306.3	306.3	308.9	309.3	307.1	308.5	307.3
6190	305.5	304.2	306.5	305.1	307	306.3	306.3	308.9	309.3	307.2	308.5	307.4
6290	305.4	304.2	306.4	305.1	307	306.3	306.3	308.8	309.3	307.2	308.4	307.4
6390	305.4	304.2	306.4	305.1	307.1	306.3	306.3	308.8	309.2	307.1	308.4	307.4
6490	305.3	304.1	306.3	305	306.9	306.2	306.2	308.8	309.3	307.1	308.4	307.4
6590	305.4	304.1	306.4	305	307	306.2	306.2	308.8	309.3	307.1	308.4	307.3
6690	305.4	304.1	306.3	305	306.9	306.2	306.2	308.8	309.3	307.1	308.5	307.4
6790	305.4	304.1	306.3	305	307	306.2	306.2	308.8	309.3	307.2	308.4	307.4
6890	305.4	304.1	306.3	305	307.1	306.2	306.2	308.8	309.3	307.2	308.4	307.4
6990	305.4	304.2	306.3	305	307	306.2	306.2	308.9	309.3	307.2	308.4	307.4
7090	305.4	304.1	306.3	305	307.1	306.2	306.2	308.8	309.3	307.1	308.4	307.3
7190	305.2	304	306.3	304.9	307	306.1	306.1	308.8	309.3	307.1	308.4	307.3
7200	305.3	304.1	306.3	305	307	306.2	306.2	308.8	309.2	307.1	308.4	307.3

Simulasi Paksa 2 cm												
Waktu (s)	Temperatur (K)											
	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8	Ch 9	Ch 10	Ch 11	Ch 12
0	302	302	302	302	302	302	302	302	302	302	302	302
100	302.23	302.23	302.23	302.23	302.18	302.18	302.18	302.18	302.31	302.31	302.31	302.31
200	302.44	302.44	302.45	302.45	302.36	302.36	302.36	302.36	302.61	302.62	302.61	302.61
300	302.64	302.63	302.64	302.64	302.52	302.53	302.53	302.53	302.89	302.92	302.89	302.91
400	302.81	302.8	302.81	302.82	302.67	302.69	302.68	302.69	303.16	303.2	303.16	303.19
500	302.95	302.93	302.96	302.96	302.81	302.83	302.82	302.83	303.4	303.45	303.4	303.43
600	303.09	303.08	303.1	303.1	302.95	302.97	302.96	302.97	303.65	303.71	303.64	303.69
700	303.22	303.2	303.23	303.23	303.08	303.11	303.09	303.11	303.88	303.97	303.88	303.95
800	303.33	303.32	303.34	303.35	303.2	303.24	303.21	303.24	304.11	304.21	304.11	304.19
900	303.44	303.42	303.45	303.46	303.32	303.36	303.33	303.37	304.33	304.45	304.32	304.42
1000	303.52	303.51	303.54	303.54	303.42	303.47	303.44	303.47	304.51	304.65	304.51	304.62
1100	303.61	303.59	303.62	303.63	303.52	303.58	303.54	303.58	304.71	304.86	304.71	304.83
1200	303.69	303.67	303.7	303.71	303.62	303.69	303.64	303.69	304.9	305.07	304.9	305.03
1300	303.76	303.74	303.77	303.79	303.72	303.79	303.74	303.79	305.08	305.26	305.08	305.22
1400	303.82	303.81	303.84	303.85	303.81	303.88	303.83	303.89	305.25	305.45	305.25	305.41
1500	303.88	303.86	303.89	303.91	303.89	303.96	303.91	303.97	305.4	305.61	305.39	305.57
1600	303.93	303.91	303.95	303.96	303.97	304.05	303.99	304.05	305.55	305.78	305.55	305.74
1700	303.98	303.96	304	304.01	304.04	304.13	304.07	304.13	305.7	305.94	305.7	305.89
1800	304.03	304.01	304.04	304.06	304.12	304.2	304.14	304.21	305.84	306.1	305.84	306.04
1900	304.07	304.05	304.08	304.1	304.18	304.28	304.21	304.28	305.97	306.24	305.97	306.19
2000	304.1	304.08	304.12	304.13	304.24	304.34	304.27	304.35	306.09	306.37	306.08	306.31
2100	304.14	304.12	304.15	304.17	304.3	304.4	304.33	304.41	306.21	306.5	306.2	306.45
2200	304.17	304.15	304.19	304.2	304.36	304.47	304.39	304.47	306.32	306.63	306.32	306.57
2300	304.2	304.18	304.22	304.23	304.42	304.52	304.45	304.53	306.43	306.74	306.43	306.68

2400	304.22	304.2	304.24	304.26	304.47	304.58	304.5	304.59	306.53	306.86	306.53	306.79
2500	304.25	304.23	304.27	304.28	304.51	304.63	304.54	304.64	306.62	306.95	306.62	306.89
2600	304.27	304.25	304.29	304.31	304.56	304.68	304.59	304.69	306.71	307.05	306.71	306.99
2700	304.29	304.27	304.31	304.33	304.61	304.73	304.64	304.74	306.8	307.15	306.79	307.09
2800	304.31	304.29	304.33	304.35	304.65	304.77	304.68	304.78	306.88	307.24	306.88	307.17
2900	304.33	304.31	304.35	304.36	304.69	304.81	304.72	304.82	306.95	307.32	306.95	307.25
3000	304.34	304.32	304.36	304.38	304.72	304.85	304.76	304.86	307.03	307.4	307.02	307.33
3100	304.36	304.34	304.38	304.4	304.76	304.89	304.79	304.9	307.1	307.47	307.09	307.4
3200	304.38	304.35	304.4	304.41	304.8	304.93	304.83	304.94	307.16	307.55	307.16	307.48
3300	304.39	304.37	304.41	304.43	304.83	304.96	304.86	304.97	307.23	307.62	307.22	307.55
3400	304.4	304.38	304.42	304.44	304.86	304.99	304.89	305	307.28	307.68	307.28	307.61
3500	304.42	304.39	304.44	304.45	304.89	305.03	304.92	305.04	307.34	307.74	307.33	307.67
3600	304.43	304.41	304.45	304.47	304.92	305.06	304.95	305.07	307.4	307.8	307.39	307.73
3700	304.44	304.42	304.46	304.48	304.95	305.09	304.98	305.1	307.45	307.86	307.44	307.78
3800	304.45	304.43	304.47	304.49	304.97	305.11	305.01	305.13	307.5	307.92	307.49	307.84
3900	304.46	304.44	304.48	304.5	305	305.14	305.03	305.15	307.54	307.97	307.54	307.89
4000	304.47	304.45	304.49	304.51	305.02	305.17	305.06	305.18	307.59	308.02	307.59	307.95
4100	304.48	304.46	304.5	304.52	305.05	305.19	305.08	305.2	307.64	308.07	307.63	308
4200	304.49	304.47	304.51	304.53	305.07	305.22	305.1	305.23	307.69	308.12	307.68	308.04
4300	304.5	304.48	304.52	304.54	305.09	305.24	305.13	305.25	307.73	308.17	307.72	308.09
4400	304.51	304.48	304.53	304.55	305.11	305.26	305.15	305.27	307.77	308.21	307.76	308.13
4500	304.52	304.49	304.54	304.56	305.13	305.28	305.17	305.29	307.82	308.26	307.81	308.18
4600	304.52	304.5	304.55	304.56	305.15	305.31	305.19	305.32	307.86	308.31	307.85	308.23
4700	304.53	304.51	304.56	304.57	305.17	305.33	305.21	305.34	307.91	308.36	307.9	308.28
4800	304.54	304.52	304.56	304.58	305.19	305.35	305.23	305.36	307.95	308.41	307.94	308.33
4900	304.55	304.53	304.57	304.59	305.21	305.37	305.25	305.38	307.99	308.45	307.98	308.37
5000	304.56	304.53	304.58	304.6	305.23	305.39	305.27	305.4	308.04	308.5	308.03	308.42
5100	304.57	304.54	304.59	304.61	305.25	305.41	305.29	305.42	308.09	308.56	308.08	308.47
5200	304.57	304.55	304.6	304.61	305.27	305.43	305.31	305.44	308.14	308.61	308.13	308.53
5300	304.58	304.56	304.6	304.62	305.29	305.45	305.33	305.46	308.19	308.66	308.18	308.58
5400	304.59	304.56	304.61	304.63	305.31	305.47	305.35	305.48	308.24	308.72	308.23	308.64
5500	304.6	304.57	304.62	304.64	305.33	305.49	305.37	305.5	308.3	308.78	308.29	308.69
5600	304.6	304.58	304.63	304.65	305.35	305.51	305.39	305.52	308.35	308.84	308.35	308.75
5700	304.61	304.59	304.64	304.65	305.37	305.53	305.41	305.54	308.42	308.91	308.41	308.82
5800	304.62	304.59	304.64	304.66	305.38	305.55	305.42	305.56	308.47	308.97	308.47	308.88
5900	304.63	304.6	304.65	304.67	305.4	305.57	305.45	305.58	308.54	309.04	308.54	308.96
6000	304.64	304.61	304.66	304.68	305.42	305.59	305.47	305.6	308.61	309.12	308.61	309.03
6100	304.64	304.62	304.67	304.68	305.45	305.61	305.49	305.63	308.69	309.2	308.68	309.11
6200	304.65	304.63	304.68	304.69	305.47	305.63	305.51	305.65	308.77	309.28	308.76	309.19
6300	304.66	304.63	304.68	304.7	305.49	305.66	305.53	305.67	308.84	309.36	308.84	309.27
6400	304.67	304.64	304.69	304.71	305.51	305.68	305.55	305.69	308.93	309.46	308.92	309.36
6500	304.67	304.65	304.7	304.72	305.53	305.7	305.57	305.72	309.02	309.56	309.02	309.47
6600	304.68	304.66	304.71	304.72	305.55	305.73	305.6	305.74	309.12	309.66	309.11	309.57
6700	304.69	304.67	304.72	304.73	305.58	305.75	305.62	305.76	309.22	309.77	309.21	309.67
6800	304.7	304.67	304.72	304.74	305.6	305.77	305.64	305.79	309.32	309.88	309.31	309.78
6900	304.71	304.68	304.73	304.75	305.62	305.8	305.67	305.81	309.43	310	309.43	309.89

7000	304.72	304.69	304.74	304.76	305.65	305.83	305.69	305.84	309.55	310.12	309.55	310.02
7100	304.72	304.7	304.75	304.77	305.67	305.85	305.72	305.87	309.68	310.26	309.67	310.16
7200	304.73	304.71	304.76	304.77	305.7	305.88	305.75	305.9	309.81	310.4	309.8	310.3

Eksperimen Paksa 7.6 cm												
Waktu (s)	Temperatur (K)											
	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8	Ch 9	Ch 10	Ch 11	Ch 12
0	301.9	301.9	301.9	301.9	301.9	301.9	301.8	301.8	302	301.9	302	301.9
100	302.1	302.3	302.2	302	302.1	301.9	302.1	301.9	302.2	302	302.3	302
200	302.4	302.4	302.6	302.1	302.5	302	302.6	301.9	302.7	302.1	302.7	302
300	302.4	302.5	302.8	302.2	302.7	302	302.9	302	303.1	302.2	303.1	302.1
400	302.6	302.7	303.1	302.3	302.9	302.1	303.1	302.1	303.5	302.3	303.4	302.3
500	302.7	302.8	303.3	302.5	303.1	302.2	303.3	302.2	303.8	302.5	303.8	302.5
600	302.8	302.7	303.5	302.6	303.3	302.4	303.5	302.4	304.1	302.8	304.1	302.7
700	302.9	303	303.6	302.7	303.4	302.4	303.7	302.4	304.4	303	304.4	302.9
800	303	303	303.9	302.9	303.6	302.6	303.9	302.7	304.6	303.2	304.6	303.1
900	303.1	303	304	303	303.7	302.7	304	302.8	304.8	303.3	304.8	303.2
1000	303.1	303.2	304.1	303.1	303.8	302.8	304.1	302.9	305	303.5	305	303.4
1100	303.3	303.2	304.2	303.3	303.9	303	304.3	303	305.2	303.7	305.3	303.6
1200	303.1	302.9	304.2	303.3	304	303	304.3	303.1	305.4	303.9	305.5	303.8
1300	303.1	302.8	304.3	303.4	304.1	303.1	304.5	303.2	305.6	304.1	305.7	303.9
1400	303.3	303.4	304.5	303.6	304.3	303.3	304.6	303.4	305.8	304.3	305.9	304.1
1500	303.3	303.4	304.5	303.6	304.2	303.3	304.7	303.5	306	304.5	306.1	304.3
1600	303.4	303.3	304.6	303.7	304.4	303.4	304.8	303.6	306.2	304.7	306.3	304.5
1700	303.5	303.4	304.7	303.8	304.5	303.6	304.9	303.8	306.3	304.8	306.4	304.6
1800	303.5	303.4	304.7	303.8	304.6	303.6	305	303.8	306.4	304.9	306.5	304.7
1900	303.4	303.4	304.8	303.9	304.6	303.7	305.1	303.9	306.5	305.1	306.7	304.9
2000	303.5	303.4	304.8	304	304.7	303.8	305.1	304	306.7	305.3	306.9	305.1
2100	303.5	303.4	304.9	304.1	304.9	303.9	305.3	304.2	306.8	305.4	307	305.2
2200	303.6	303.5	305	304.1	304.9	304	305.4	304.3	307	305.5	307.1	305.3
2300	303.5	303.4	305	304.1	304.9	304	305.4	304.3	307.1	305.6	307.2	305.4
2400	303.5	303.6	305	304.2	304.9	304.1	305.5	304.4	307.2	305.8	307.3	305.6
2500	303.5	303.4	305	304.2	304.9	304.1	305.5	304.4	307.3	305.9	307.4	305.7
2600	303.6	303.6	305.1	304.3	305.1	304.3	305.7	304.6	307.4	306	307.6	305.9
2700	303.5	303.5	305.1	304.2	305.1	304.3	305.6	304.6	307.5	306.1	307.7	305.9
2800	303.6	303.6	305.1	304.3	305.1	304.3	305.8	304.7	307.6	306.3	307.8	306
2900	303.7	303.6	305.2	304.4	305.3	304.4	305.8	304.8	307.7	306.4	307.8	306.1
3000	303.7	303.6	305.2	304.4	305.3	304.5	305.9	304.9	307.8	306.5	308	306.2
3100	303.7	303.7	305.2	304.4	305.4	304.5	305.9	304.9	307.9	306.6	308.1	306.3
3200	303.6	303.5	305.2	304.4	305.4	304.6	306	304.9	308	306.6	308.2	306.3
3300	303.6	303.5	305.3	304.4	305.4	304.6	306	305	308	306.7	308.2	306.5
3400	303.6	303.5	305.3	304.5	305.5	304.7	306.1	305.1	308.1	306.8	308.3	306.6
3500	303.6	303.6	305.3	304.5	305.6	304.7	306.2	305.1	308.1	306.9	308.3	306.6
3600	303.6	303.4	305.3	304.5	305.5	304.8	306.2	305.2	308.2	307	308.4	306.7
3700	303.6	303.6	305.3	304.5	305.6	304.8	306.2	305.2	308.3	307	308.5	306.8
3800	303.7	303.7	305.4	304.5	305.6	304.9	306.3	305.3	308.4	307.1	308.6	306.9

3900	303.6	303.4	305.3	304.5	305.7	304.9	306.3	305.3	308.4	307.2	308.6	306.9
4000	303.7	303.7	305.4	304.6	305.7	305	306.4	305.4	308.5	307.2	308.7	306.9
4100	303.7	303.7	305.4	304.6	305.7	305	306.4	305.4	308.6	307.3	308.7	307
4200	303.7	303.6	305.4	304.6	305.7	305	306.4	305.5	308.6	307.4	308.8	307.1
4300	303.8	303.7	305.4	304.6	305.9	305.1	306.5	305.5	308.7	307.5	308.9	307.1
4400	303.7	303.7	305.5	304.7	305.9	305.1	306.6	305.6	308.8	307.5	309	307.3
4500	303.7	303.7	305.4	304.7	305.9	305.2	306.6	305.6	308.8	307.6	309	307.3
4600	303.6	303.5	305.4	304.6	305.9	305.1	306.6	305.6	308.9	307.7	309	307.3
4700	303.6	303.7	305.4	304.7	305.9	305.2	306.6	305.7	309	307.7	309.1	307.4
4800	303.7	303.7	305.5	304.7	306	305.3	306.7	305.8	309	307.8	309.2	307.4
4900	303.5	303.5	305.4	304.7	305.9	305.3	306.7	305.8	309.1	307.8	309.2	307.5
5000	303.6	303.5	305.5	304.7	306	305.3	306.8	305.9	309.1	307.9	309.3	307.6
5100	303.6	303.5	305.5	304.7	306	305.3	306.8	305.8	309.1	307.9	309.4	307.6
5200	303.8	303.8	305.5	304.7	306.1	305.4	306.8	305.9	309.2	308	309.4	307.7
5300	303.6	303.5	305.5	304.7	305.9	305.4	306.9	305.9	309.2	308	309.4	307.7
5400	303.7	303.7	305.6	304.8	306	305.4	306.9	306	309.4	308.1	309.6	307.8
5500	303.7	303.6	305.5	304.8	306.1	305.5	306.9	306	309.4	308.1	309.6	307.8
5600	303.8	303.8	305.5	304.8	306.2	305.5	307	306.1	309.4	308.2	309.6	307.8
5700	303.6	303.6	305.5	304.7	306.1	305.4	306.9	306	309.5	308.2	309.7	307.8
5800	303.8	303.8	305.6	304.8	306.2	305.6	307	306.1	309.5	308.3	309.7	307.9
5900	303.7	303.6	305.6	304.8	306.2	305.6	307.1	306.2	309.6	308.3	309.7	307.9
6000	303.7	303.8	305.6	304.8	306.2	305.5	307.1	306.2	309.6	308.3	309.8	307.9
6100	303.7	303.7	305.5	304.8	306.2	305.6	307.1	306.2	309.6	308.3	309.8	307.9
6200	303.7	303.8	305.6	304.8	306.3	305.6	307.1	306.2	309.7	308.4	309.9	307.9
6300	303.7	303.6	305.5	304.8	306.2	305.6	307.1	306.2	309.7	308.4	309.9	308
6400	303.6	303.5	305.5	304.7	306.2	305.5	307.1	306.2	309.8	308.4	310	308
6500	303.6	303.5	305.5	304.7	306.2	305.6	307.1	306.2	309.8	308.4	310	308
6600	303.7	303.6	305.5	304.8	306.2	305.6	307.2	306.2	309.9	308.5	310.1	308
6700	303.6	303.6	305.4	304.7	306.2	305.6	307.1	306.2	309.9	308.5	310.1	308
6800	303.5	303.4	305.4	304.7	306.2	305.6	307.1	306.2	309.9	308.5	310.1	308.1
6900	303.6	303.5	305.4	304.7	306.1	305.5	307	306.2	310	308.5	310.1	308.1
7000	303.6	303.5	305.4	304.7	306.2	305.6	307.1	306.2	310	308.5	310.1	308.1
7100	303.6	303.6	305.4	304.6	306.1	305.6	307.1	306.2	310	308.6	310.2	308.1
7200	303.9	303.8	305.3	304.6	306.2	305.5	307	306.1	310	308.5	310.2	308.1

Simulasi Paksa 7.6 cm												
Waktu (s)	Temperatur (K)											
	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8	Ch 9	Ch 10	Ch 11	Ch 12
0	302	302	301.9	302	302	302	302	302	302	302	302	302
100	302.23	302.23	302.2	302.23	302.27	302.27	302.27	302.27	302.31	302.31	302.31	302.31
200	302.45	302.45	302.6	302.45	302.53	302.52	302.53	302.53	302.61	302.62	302.61	302.62
300	302.65	302.64	302.8	302.65	302.77	302.77	302.77	302.77	302.89	302.92	302.9	302.92
400	302.84	302.82	303.1	302.83	303	303	303.01	303	303.16	303.22	303.17	303.21
500	302.99	302.98	303.3	302.99	303.19	303.19	303.2	303.2	303.4	303.47	303.41	303.47
600	303.15	303.13	303.5	303.14	303.4	303.4	303.41	303.41	303.65	303.75	303.66	303.74
700	303.3	303.28	303.6	303.29	303.59	303.6	303.61	303.61	303.89	304.01	303.91	304

800	303.43	303.41	303.9	303.42	303.78	303.78	303.79	303.8	304.12	304.27	304.13	304.26
900	303.56	303.53	304	303.55	303.95	303.96	303.97	303.97	304.34	304.51	304.36	304.5
1000	303.66	303.63	304.1	303.65	304.1	304.11	304.12	304.12	304.53	304.72	304.55	304.71
1100	303.77	303.74	304.2	303.76	304.26	304.26	304.27	304.28	304.73	304.95	304.76	304.94
1200	303.87	303.84	304.2	303.86	304.4	304.41	304.42	304.43	304.93	305.17	304.95	305.16
1300	303.96	303.93	304.3	303.95	304.54	304.55	304.56	304.57	305.11	305.38	305.13	305.37
1400	304.05	304.01	304.5	304.03	304.67	304.68	304.69	304.71	305.29	305.58	305.32	305.57
1500	304.12	304.08	304.5	304.11	304.78	304.8	304.8	304.82	305.44	305.76	305.48	305.74
1600	304.19	304.15	304.6	304.18	304.9	304.91	304.92	304.94	305.61	305.94	305.64	305.93
1700	304.26	304.22	304.7	304.25	305.01	305.03	305.03	305.05	305.76	306.12	305.79	306.1
1800	304.33	304.28	304.7	304.31	305.11	305.13	305.13	305.15	305.91	306.28	305.94	306.27
1900	304.39	304.34	304.8	304.37	305.2	305.23	305.23	305.25	306.05	306.44	306.08	306.43
2000	304.44	304.39	304.8	304.42	305.28	305.31	305.31	305.34	306.17	306.58	306.21	306.56
2100	304.49	304.44	304.9	304.47	305.37	305.4	305.4	305.42	306.3	306.73	306.34	306.71
2200	304.54	304.49	305	304.51	305.46	305.48	305.48	305.5	306.42	306.87	306.46	306.84
2300	304.58	304.53	305	304.56	305.53	305.55	305.56	305.58	306.53	306.99	306.58	306.98
2400	304.62	304.57	305	304.6	305.6	305.62	305.63	305.65	306.65	307.12	306.69	307.11
2500	304.66	304.61	305	304.64	305.66	305.68	305.68	305.71	306.74	307.23	306.77	307.21
2600	304.7	304.65	305.1	304.68	305.71	305.74	305.74	305.77	306.84	307.35	306.88	307.33
2700	304.73	304.68	305.1	304.71	305.78	305.8	305.8	305.83	306.93	307.45	306.97	307.43
2800	304.77	304.71	305.1	304.74	305.83	305.85	305.85	305.89	307.03	307.56	307.07	307.54
2900	304.79	304.74	305.2	304.77	305.87	305.9	305.9	305.93	307.11	307.65	307.15	307.63
3000	304.82	304.76	305.2	304.79	305.92	305.95	305.95	305.98	307.18	307.74	307.24	307.72
3100	304.85	304.79	305.2	304.82	305.96	305.99	305.99	306.02	307.26	307.83	307.31	307.81
3200	304.87	304.82	305.2	304.85	306	306.03	306.03	306.06	307.34	307.92	307.39	307.9
3300	304.9	304.84	305.3	304.87	306.04	306.06	306.07	306.1	307.41	308	307.46	307.98
3400	304.92	304.86	305.3	304.89	306.06	306.09	306.09	306.13	307.47	308.07	307.52	308.04
3500	304.94	304.88	305.3	304.91	306.09	306.12	306.12	306.16	307.53	308.13	307.58	308.11
3600	304.96	304.9	305.3	304.93	306.12	306.16	306.15	306.19	307.59	308.21	307.65	308.18
3700	304.98	304.92	305.3	304.95	306.15	306.18	306.18	306.21	307.65	308.27	307.7	308.25
3800	305	304.94	305.4	304.97	306.17	306.2	306.2	306.24	307.71	308.33	307.77	308.31
3900	305.02	304.95	305.3	304.99	306.18	306.22	306.22	306.26	307.75	308.39	307.81	308.36
4000	305.03	304.97	305.4	305.01	306.21	306.25	306.24	306.28	307.81	308.45	307.87	308.43
4100	305.05	304.99	305.4	305.02	306.22	306.26	306.26	306.3	307.87	308.51	307.92	308.48
4200	305.07	305	305.4	305.04	306.24	306.28	306.27	306.32	307.92	308.56	307.97	308.54
4300	305.08	305.02	305.4	305.05	306.26	306.3	306.29	306.33	307.97	308.62	308.02	308.6
4400	305.09	305.03	305.5	305.06	306.27	306.31	306.31	306.34	308.01	308.68	308.07	308.65
4500	305.11	305.04	305.4	305.08	306.29	306.32	306.32	306.36	308.07	308.73	308.14	308.71
4600	305.12	305.06	305.4	305.1	306.29	306.33	306.33	306.37	308.11	308.79	308.16	308.76
4700	305.14	305.07	305.4	305.11	306.31	306.34	306.34	306.38	308.16	308.84	308.21	308.82
4800	305.15	305.08	305.5	305.12	306.31	306.36	306.35	306.39	308.21	308.9	308.27	308.87
4900	305.16	305.09	305.4	305.13	306.33	306.36	306.36	306.4	308.25	308.95	308.29	308.93
5000	305.17	305.11	305.5	305.14	306.33	306.37	306.36	306.41	308.3	309.01	308.36	308.98
5100	305.18	305.12	305.5	305.15	306.33	306.38	306.37	306.41	308.35	309.07	308.42	309.04
5200	305.19	305.13	305.5	305.17	306.35	306.39	306.38	306.42	308.4	309.13	308.46	309.1
5300	305.2	305.14	305.5	305.17	306.35	306.39	306.39	306.43	308.45	309.18	308.5	309.16

5400	305.21	305.15	305.6	305.19	306.37	306.4	306.4	306.44	308.52	309.25	308.57	309.23
5500	305.23	305.16	305.5	305.19	306.36	306.41	306.4	306.44	308.58	309.32	308.64	309.29
5600	305.24	305.17	305.5	305.2	306.38	306.41	306.41	306.45	308.64	309.39	308.71	309.36
5700	305.25	305.18	305.5	305.21	306.38	306.42	306.42	306.46	308.71	309.46	308.78	309.43
5800	305.25	305.19	305.6	305.22	306.39	306.43	306.42	306.46	308.77	309.53	308.83	309.5
5900	305.26	305.2	305.6	305.23	306.4	306.43	306.43	306.47	308.84	309.61	308.9	309.58
6000	305.28	305.21	305.6	305.24	306.41	306.44	306.44	306.48	308.91	309.69	308.97	309.66
6100	305.29	305.22	305.5	305.25	306.41	306.45	306.44	306.49	308.98	309.78	309.06	309.75
6200	305.3	305.23	305.6	305.26	306.41	306.46	306.46	306.5	309.07	309.87	309.15	309.83
6300	305.31	305.24	305.5	305.27	306.43	306.47	306.46	306.5	309.15	309.95	309.22	309.92
6400	305.32	305.25	305.5	305.28	306.44	306.47	306.47	306.51	309.23	310.05	309.31	310.02
6500	305.33	305.26	305.5	305.3	306.45	306.49	306.48	306.52	309.33	310.15	309.41	310.12
6600	305.34	305.27	305.5	305.31	306.46	306.5	306.5	306.53	309.43	310.27	309.51	310.24
6700	305.35	305.28	305.4	305.31	306.47	306.51	306.51	306.55	309.54	310.39	309.62	310.36
6800	305.36	305.28	305.4	305.32	306.48	306.52	306.52	306.56	309.64	310.49	309.72	310.45
6900	305.36	305.29	305.4	305.33	306.5	306.54	306.54	306.58	309.75	310.61	309.83	310.58
7000	305.38	305.3	305.4	305.34	306.52	306.55	306.55	306.59	309.88	310.75	309.95	310.71
7100	305.39	305.31	305.4	305.35	306.54	306.57	306.57	306.61	310.01	310.89	310.09	310.86
7200	305.4	305.33	305.3	305.36	306.55	306.59	306.59	306.63	310.15	311.04	310.22	311.01

BIODATA PENULIS



Penulis merupakan pria yang dilahirkan di Temanggung pada malam hari di hari Minggu tanggal 25 Februari 2001. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh Pendidikan di berbagai kota karena banyak berpindah tempat tinggal diantaranya SD IBA Palembang, SDIT Al Kautsar Temanggung, SDN Patra Mandiri 2 Palembang, SDN Polisi 1 Kota Bogor, SMPN 5 Kota Bogor hingga pada akhirnya lulus di SMAN 2 Kota Bogor pada tahun 2018. Penulis sempat menempuh sekolah penerbangan di Royhle Filipina, tepatnya di kota Dumaguete selama satu tahun hingga tahun 2019. Setelah lulus dari sekolah penerbangan tersebut penulis memutuskan mencoba peruntungan untuk kuliah formal dan mengikuti ujian UTBK di tahun 2020 hingga diterima pada pilihan kedua di

Departemen Teknik Mesin ITS.

Semasa kuliah penulis cukup aktif pada kegiatan diluar akademik seperti mengikuti UKM Flagfootball di ITS dan sempat mengemban tanggung jawab sebagai ketua UKM tersebut di tahun 2022-2023. Penulis juga sempat mengikuti seleksi anggota tim Anargya ITS divisi *Vehicle Dynamics*, namun tidak berhasil masuk ke tim utama di tahap terakhir seleksi. Selain itu penulis sempat mengajar selama 3 bulan di sanggar belajar SIER Rungkut Surabaya untuk mengajar anak-anak SD dan SMP. Penulis juga sempat mengikuti kegiatan KKN di Tulungagung di tahun 2023. Terakhir penulis sempat menjalani kerja praktek di JOB Medco Pertamina di Luwuk Sulawesi Tengah di akhir tahun 2023.