

TUGAS AKHIR - TM234802

**ANALISA NUMERIK PENGARUH SISTEM PENDINGINAN
HYBRID PHASE CHANGE MATERIAL (PCM) DAN AIR
TERHADAP TEMPERATUR DAN SIKLUS HIDUP BATERAI
LITHIUM-ION**

I PUTU HARRY ARYA BAGIADA

NRP 5007201202

Dosen Pembimbing

Ir. Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, PhD, IPM, A.Eng

NIP 197105241997021001

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekaya Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

(halaman ini sengaja dikosongkan)



TUGAS AKHIR - TM234802

**ANALISA NUMERIK PENGARUH SISTEM PENDINGINAN
HYBRID PHASE CHANGE MATERIAL (PCM) DAN AIR
TERHADAP TEMPERATUR DAN SIKLUS HIDUP BATERAI
LITHIUM-ION**

I PUTU HARRY ARYA BAGIADA

NRP 5007201202

Dosen Pembimbing

Ir. Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, PhD, IPM, A.Eng

NIP 197105241997021001

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekaya Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

(halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT- TM234802

**NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF HYBRID
PHASE CHANGE MATERIAL (PCM) AND WATER
COOLING SYSTEM ON TEMPERATURE AND LIFE CYCLE
LITHIUM-ION BATTERIES**

I PUTU HARRY ARYA BAGIADA

NRP 5007201202

Advisor

Ir. Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, PhD, IPM, A.Eng

NIP 197105241997021001

Bachelor Degree of Mechanical Engineering

Mechanical Engineering Departement

Faculty of Industrial Technology and System Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA NUMERIK PENGARUH SISTEM PENDINGINAN HYBRID *PHASE CHANGE MATERIAL* (PCM) DAN AIR TERHADAP TEMPERATUR DAN SIKLUS HIDUP BATERAI LITHIUM-ION

PROPOSAL 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 : I Putu Harry Arya Bagiada
NRP. 5007201202

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir :

1. Ir. Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, Ph.D.
IPM, AEng Pembimbing
2. Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, ST, MSc, IPM
AEng Penguji
3. Dr. Ir. Bambang Arip Dwiyanoto, ST,
MSc.Eng, IPM, AEng Penguji
4. Tri Vicca Kusumadewi, ST., M.Sc Penguji

SURABAYA
Juli, 2024

(halaman ini sengaja dikosongkan

APPROVAL SHEET

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF HYBRID PHASE CHANGE MATERIAL (PCM) AND WATER COOLING SYSTEM ON TEMPERATURE AND LIFE CYCLE OF LITHIUM-ION BATTERIES

FINAL PROJECT

Submitted to Fulfill One of the Requirements
to Obtain the Bachelor of Engineering Degree
Bachelor Program of Mechanical Engineering Department
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Author: I Putu Harry Arya Bagiada
NRP. 5007201202

Approved by Final Project Examiner Team

1. Ir. Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, Ph.D,
IPM, AEng Supervisor
2. Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, ST, MSc, IPM, AEng Examiner
3. Dr.Ir. Bambang Arip Dwiyantoro, ST, MSc.Eng, IPM, AEng Examiner
4. Tri Vicca Kusumadewi, ST., M.Sc Examiner

SURABAYA
July, 2024

(halaman ini sengaja dikosongkan)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Name / NRP : I Putu Harry Arya Bagiada / 5007201202
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing / NIP : Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, PhD. /
197105241997021001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "ANALISA NUMERIK PENGARUH SISTEM PENDINGINAN *HYBRID* PHASE CHANGE MATERIAL (PCM) DAN AIR TERHADAP TEMPERATUR DAN SIKLUS HIDUP BATERAI LITHIUM-ION" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Mengetahui
Dosen Pembimbing

Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, PhD.
NIP. 197105241997021001



Surabaya, 8 Juli 2024

Mahasiswa,

I Putu Harry Arya Bagiada
NRP. 5007201202

(halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below ;

Name of student / NRP : I Putu Harry Arya Bagiada / 5007201202
Departement : Teknik Mesin
Advisor / NIP : Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, PhD. /
197105241997021001

hereby declare that the Final Project with the title of "NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF HYBRID PHASE CHANGE MATERIAL (PCM) AND AIR COOLING SYSTEM ON TEMPERATURE AND LIFE CYCLE OF LITHIUM-ION BATTERIES" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, 8 July 2024

Acknowledged,
Advisor,



Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, PhD.
NIP. 197105241997021001

Student,

I Putu Harry Arya Bagiada
NRP. 5007201202

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis panjatkan sepenuhnya kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkah dan izin-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak dan Ibu serta keluarga yang senantiasa memberikan dukungan dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini
2. Ir. Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, Ph.D, IPM, Aeng, selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis baik dalam pengerjaan tugas akhir maupun di luar pengerjaan tugas akhir. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
3. Bapak Dr. Ir. Is Bunyamin Suryo, ST, MSc, IPM A.Eng, M.Eng, Bapak Dr.Ir. Bambang Arip Dwiyanoro, ST, MSc.Eng, IPM, A.Eng, dan Ibu Tri Vicca Kusumadewi, ST., M.Sc selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih telah meluangkan waktunya dan atas saran-saran yang telah diberikan.
4. Rekan-rekan satu Laboratorium Rekayasa Thermal atas kerjasamanya dalam penggunaan komputer untuk kepentingan simulasi.
5. Rekan-rekan M63 yang selalu bekerjasama saling membantu dan membagikan informasi selama perkuliahan.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2024

Penulis

(halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRAK

ANALISA NUMERIK PENGARUH SISTEM PENDINGINAN HYBRID *PHASE CHANGE MATERIAL* (PCM) DAN AIR TERHADAP TEMPERATUR DAN SIKLUS HIDUP BATERAI LITHIUM-ION

Nama Mahasiswa / NRP : I Putu Harry Arya Bagiada / 5007201202
Departemen : Teknik Mesin FTI-RS ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, Ph.D, IPM, AEng

ABSTRAK

Baterai merupakan sumber energi utama pada mobil listrik. Kapasitas pada baterai mobil listrik sangat terbatas. Hal tersebut diperburuk dengan adanya fenomena degradasi kapasitas. Degradasi kapasitas merupakan fenomena hilangnya kemampuan baterai untuk menyimpan energi yang akan mempengaruhi jarak tempuh mobil listrik dan jumlah siklus yang dimiliki oleh baterai. Nilai degradasi yang terjadi pada baterai dipengaruhi oleh temperatur baterai sehingga diperlukan sistem pendinginan untuk menjaga nilai degradasi yang terjadi pada baterai. Pada penelitian ini, pendinginan dengan PCM dipilih dikarenakan efektifitasnya dan dapat mendinginkan secara merata. Akan tetapi, PCM memiliki rentang operasi yang terbatas pada perubahan fasenya. Ketika PCM berubah fase secara sempurna maka PCM tidak akan dapat lagi menyerap panas dengan baik sehingga temperatur pada baterai akan meningkat secara signifikan. Namun, hal tersebut dapat diatasi dengan menggunakan metode pendinginan *hybrid* antara air dan PCM. Metode ini dapat menjaga PCM lebih lama di rentang operasinya sehingga dapat mendinginkan baterai lebih baik. Namun, metode tersebut masih memerlukan kajian lebih lanjut terkait dengan efektifitas pendinginannya dan pengaruhnya ke jumlah siklus hidup baterai. Variasi penelitian yang dilakukan berupa kecepatan aliran air dan luas penampang di saluran air mengalir (*channel*) untuk mencari desain dan operasi sistem manajemen termal yang paling optimal. Variasi luas penampang dilakukan dengan mengubah jumlah *channel* dengan jumlah channel pada setiap variasi, yakni desain 1 dengan 5 *channel*, desain 2 dengan 3 *channel*, dan desain 3 dengan 1 *channel*. Pada variasi kecepatan terdapat tiga variasi kecepatan, yakni 0,05 m/s; 0,15 m/s; dan 0,5 m/s pada setiap variasi desain. Penelitian dilakukan secara numerik dengan software Ansys Fluent 2023 R1. Hasil penelitian menunjukkan desain 1 pada kecepatan aliran 0,5 m/s memiliki sistem pendinginan terbaik dengan temperatur baterai 42,225°C dan jumlah siklus hidup 2953 sedangkan desain 3 pada kecepatan aliran 0,5 m/s memiliki persentase penurunan temperatur baterai dan peningkatan jumlah siklus hidup terbesar, yakni 4,9% dan 15,2%. Berdasarkan penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa kecepatan aliran dan luas penampang yang semakin besar akan meningkatkan performa pendinginan pada baterai dan meningkatkan jumlah siklus hidup yang dimiliki baterai.

Kata Kunci: Baterai, PCM, Pendinginan, Siklus Hidup,

(halaman ini sengaja dikosongkan)

ABSTRACT

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF HYBRID PHASE CHANGE MATERIAL (PCM) AND WATER COOLING SYSTEM ON TEMPERATURE AND LIFE CYCLE OF LITHIUM-ION BATTERIES

Student Name / NRP : I Putu Harry Arya Bagiada / 5007201202
Departement : Teknik Mesin FTI-RS ITS
Advisor : Ir. Ary Bachtiar Krisna Putra, ST, MT, Ph.D, IPM, AEng

ABSTRACT

The battery is the primary energy source in electric vehicles. The capacity of electric vehicle batteries is quite limited. This issue is exacerbated by the phenomenon of capacity degradation, which refers to the loss of the battery's ability to store energy. This degradation affects the driving range of electric vehicles and the battery's cycle life. The rate of degradation is influenced by the battery's temperature, necessitating a cooling system to mitigate this effect. In this study, cooling with Phase Change Material (PCM) is chosen due to its effectiveness and ability to cool evenly. However, PCM has a limited operating range during its phase change. Once the PCM has fully transitioned, it can no longer absorb heat efficiently, leading to a significant increase in battery temperature. This issue can be addressed by using a hybrid cooling method that combines water and PCM. This method can maintain the PCM within its operational range for a longer period, thereby improving battery cooling. However, further research is needed to evaluate the cooling effectiveness of this method and its impact on battery cycle life. The study varies the water flow rate and the cross-sectional area of the flow channels to determine the optimal design and operation of the thermal management system. The cross-sectional area variation involves changing the number of channels, with design 1 having 5 channels, design 2 having 3 channels, and design 3 having 1 channel. Each design variation includes three flow rates: 0.05 m/s, 0.15 m/s, and 0.5 m/s. The study is conducted numerically using Ansys Fluent 2023 R1 software. The results indicate that design 1 with a flow rate of 0.5 m/s has the best cooling performance, with a battery temperature of 42.225°C and a cycle life of 2953 cycles. Design 3 with a flow rate of 0.5 m/s shows the largest percentage reduction in battery temperature and increase in cycle life, at 4.9% and 15.2%, respectively. Based on the study, it can be concluded that larger flow rates and cross-sectional areas improve battery cooling performance and increase battery cycle life.

Keywords: *Battery, PCM, Cooling, Life Cycle, Ansys*

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
KATA PENGANTAR	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baterai Lithium-ion	5
2.2 Battery Thermal Management System	5
2.3 <i>Phase Change Material</i> (PCM).....	7
2.4 Panas Sensible dan Panas Laten	8
2.5 Perpindahan Panas.....	9
2.5.1 Konduksi.....	9
2.5.2 Konveksi.....	10
2.5.3 Internal Flow	11
2.6 <i>Heat Generation</i> pada Baterai Lithium-ion.....	14
2.7 <i>Capacity Loss</i>	14
2.8 <i>Computational Fluid Dynamics</i>	15
2.9 Penelitian Terdahulu	16
2.9.1 Thermal Management System Using Phase Change Material for Lithium-ion Battery	16
2.9.2 Thermal Analysis of Conjugated Cooling Configurations Using Phase Change Material and Liquid Cooling Techniques for A Battery Module.....	19

2.9.3	Air and PCM Cooling For Battery Thermal Management Considering Battery Cycle Life.....	21
BAB III	METODOLOGI	29
3.1	Diagram Alir Penelitian	29
3.2	Spesifikasi Baterai Lithium-ion Tipe 18650.....	31
3.3	Spesifikasi PCM	31
3.4	Spesifikasi Material Penyusun Model	31
3.5	<i>Heat Generation</i> pada Baterai	32
3.6	Simulasi Distribusi Temperatur pada Baterai	32
3.6.1	Geometri	32
3.6.2	Meshing	35
3.6.3	Meshing Quality Check	37
3.6.4	Setup Fluent.....	38
3.6.5	Grid Independency Test.....	40
3.6.6	Post processing	41
3.7	Validasi Simulasi	41
3.8	Variasi pada Penelitian.....	42
BAB IV	ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	45
4.1	Validasi Simulasi	45
4.2	Analisa Pengaruh Penambahan Fluida Terhadap Pendinginan PCM	45
4.2.1	Analisa Kontur Temperatur Baterai dan Liquid Fraction PCM pada Sistem Pendinginan Hanya PCM dan Sistem Pendinginan <i>Hybrid</i>	45
4.2.2	Grafik Temperatur Rata-Rata Baterai dan Liquid Fraction PCM pada Sistem Pendinginan Hanya PCM dan Sistem Pendinginan Hybrid terhadap Waktu.....	48
4.3	Analisa Pengaruh Perubahan Kecepatan Terhadap Temperatur Baterai	49
4.3.1	Desain 1	49
4.3.2	Desain 2	53
4.3.3	Desain 3	56
4.3.4	Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Nilai Koefisien Konveksi.....	60
4.4	Analisa Pengaruh Perubahan Area Terhadap Temperatur Baterai.....	64
4.5	Analisa Pengaruh Area dan Kecepatan Aliran Terhadap Jumlah Siklus Hidup Baterai	64
4.5.1	Validasi Perhitungan	65
4.5.2	Contoh Perhitungan Jumlah Siklus Hidup Baterai	66
4.5.3	Grafik Jumlah Siklus Hidup Baterai pada Masing-Masing Desain dan Kecepatan	67

BAB V KESIMPULAN	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	72
BIOGRAFI PENULIS	81

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses Oksidasi dan Reduksi	5
Gambar 2. 2 Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Konten Energi Pada PCM.....	8
Gambar 2. 3 Panas Sensible dan Latent	8
Gambar 2. 4 Perpindahan Panas Konduksi dikarenakan Gradien Temperatur dan Pergerakan Acak Molekul (Incropera, 2006)	9
Gambar 2. 5 Thermal Boundary Layer pada Perpindahan Panas Konveksi (Incropera, 2006)	10
Gambar 2. 6 Perpindahan Panas secara Konveksi a) Konveksi natural b) Konveksi paksa (Incropera, 2006)	11
Gambar 2. 7 Gambar Pembentukan Velocity Boundary Layer (Incropera, 2006).....	11
Gambar 2. 8 Gambar Pembentukan Thermal Boundary Layer (Incropera, 2006).....	12
Gambar 2. 9 Proses Simulasi CFD.....	16
Gambar 2. 10 Grafik Pengaruh Ketebalan PCM terhadap Temperatur Baterai (a) Ketebalan PCM 3 mm (b) Ketebalan PCM 6 mm (c) Ketebalan PCM 9 mm.....	18
Gambar 2. 11 Model Baterai	19
Gambar 2. 12 Distribusi Temperatur pada Heating Power 6 W.....	20
Gambar 2. 13 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen pada Heating Power yang Berbeda.....	21
Gambar 2. 14 Perbandingan Temperatur Baterai dengan Metode Pendinginan yang Berbeda	21
Gambar 2. 15 Grafik Temperatur Rata-Rata Selama Satu Siklus dengan Pendinginan Udara (a) Tamb = 30 derajat C (b) Tamb = 50 derajat C.	23
Gambar 2. 16 Grafik Capacity Loss (a) Tamb = 30 derajat C (b) Tamb 50 derajat C.	23
Gambar 2. 17 Biaya Siklus Baterai Menggunakan Pendinginan Udara pada TemperaturLingkungan yang Berbeda	24
Gambar 2. 18 Grafik Temperatur Rata-Rata pada Satu Siklus dengan Pendinginan PCM (a) Tamb = 30 derajat C (b) Tamb = 50 derajat C.	24
Gambar 2. 19 Grafik Capacity Loss (a) Tamb = 30 derajat C (b) Tamb 50 derajat C.	25
Gambar 2. 20 Hubungan Siklus Baterai Menggunakan Pendinginan PCM terhadap Temperatur Lingkungan.	25
Gambar 2. 21 Distribusi Temperatur Berdasarkan Hasil Simulasi pada Time Size 3000 sekon (a) Pendinginan Menggunakan Udara (b) Pendinginan Menggunakan PCM.....	26
Gambar 2. 22 Perbandingan Siklus Hidup Baterai pada Beberapa Metode Pendinginan	27
Gambar 3. 1 Diagram Alir Proses Penelitian	30
Gambar 3. 2 Geometri Baterai Pack untuk Pendinginan Hybrid (a) Isometric view (b) Side view (c) Front view (d) Top view	34
Gambar 3. 3 Geometri Baterai Pack untuk Pendinginan PCM (a) Isometric view (b) Side view (c) Front view (d) Top view	35
Gambar 3. 4 Meshing Battery Pack untuk Pendinginan Hybrid (a) Isometric view (b) Side View (c) Front view (d) Top view	36
Gambar 3. 5 Meshing Battery Pack untuk Pendinginan PCM (a) Isometric view (b) Side View (c) Front view (d) Top view	37
Gambar 3. 6 Meshing Quality Parameter.....	37
Gambar 3. 7 Boundary Condition pada Model Baterai	38

Gambar 3. 8 Arah Aliran Terhadap Sumbu	39
Gambar 3. 9 Grafik Hasil Grid Independency Test.....	40
Gambar 3. 10 Grafik Validasi untuk Metode Pendinginan Hybrid (Song dkk, 2019).....	42
Gambar 3. 11 Variasi Desain Cold Column	43
Gambar 4. 1 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Song dkk (2019).....	45
Gambar 4. 2 Kontur Temperatur untuk Sistem Pendinginan Hanya PCM dan <i>Hybrid</i>	47
Gambar 4. 3 Grafik Temperatur Rata-Rata Terhadap Waktu pada Sistem Pendinginan Hanya PCM dan Hybrid.....	48
Gambar 4. 4 Grafik Liquid Fraction Terhadap Waktu pada Sistem Pendinginan Hanya PCM dan Hybrid	49
Gambar 4. 5 Kontur Temperatur Baterai pada Desain 1	51
Gambar 4. 6 Grafik Temperatur Rata-Rata Terhadap Waktu Pada Desain 1	52
Gambar 4. 7 Grafik Liquid Fraction Terhadap Waktu Pada Desain 1	52
Gambar 4. 8 Gambar Kontur Temperatur dan Liquid Fraction Pada Desain 2.....	55
Gambar 4. 9 Grafik Temperatur Rata-Rata Terhadap Waktu Pada Desain 2	55
Gambar 4. 10 Grafik Liquid Fraction Terhadap Waktu Pada Desain 2	56
Gambar 4. 11 Gambar Kontur Temperatur dan Liquid Fraction Pada Desain 3.....	59
Gambar 4. 12 Grafik Temperatur Rata-Rata Terhadap Waktu Pada Desain 3	59
Gambar 4. 13 Grafik Liquid Fraction Terhadap Waktu Pada Desain 3	60
Gambar 4. 14 Grafik Koefisien Konveksi pada Masing-Masing Variasi Kecepatan dan Desain	63
Gambar 4. 15 Temperatur Rata-Rata Baterai pada Masing-Masing Desain Cold Column	64
Gambar 4. 16 Bentuk Channel Berperan Sebagai Fins.....	64
Gambar 4. 17 Grafik Capacity Loss Terhadap Total Ah (Wang dkk, 2019)	65
Gambar 4. 18 Grafik Jumlah Siklus Hidup Baterai pada Masing-Masing Desain dan Kecepatan	67
Gambar 4. 19 Grafik Persentase Peningkatan Siklus Hidup pada Masing-Masing Desain dan Kecepatan	68

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Perbandingan Beberapa Tipe Baterai (Vidyanandan, 2019).....	1
Tabel 2. 1 Perbandingan Beberapa Thermal Management System (Wazeer dkk, 2022).....	6
Tabel 2. 2 Data Konstanta B	15
Tabel 2. 3 Spesifikasi Baterai.....	16
Tabel 2. 4 Spesifikasi PCM Capric Acid.....	16
Tabel 2. 5 Spesifikasi PCM Hexacosane	17
Tabel 2. 6 Penurunan Temperatur Baterai terhadap Variasi Temperatur Lingkungan	17
Tabel 2. 7 Efektivitas Pendinginan terhadap Variasi Ketebalan PCM	19
Tabel 2. 8 Rangkuman Data Geometri.....	20
Tabel 2. 9 Setup untuk Kasus Pendinginan Udara	22
Tabel 2. 10 Boundary Conditions pada Kasus Pendinginan dengan PCM.....	22
Tabel 2. 11 Sifat thermo-physical pada PCM	22
Tabel 3. 1 Spesifikasi Baterai Lithium-ion Tipe 18650 (Song dkk, 2019)	31
Tabel 3. 2 Spesifikasi PCM Parafin OP44E (Song dkk, 2019).....	31
Tabel 3. 3 Spesifikasi Material Penyusun Model (Song dkk, 2019).....	31
Tabel 3. 4 Data Geometri Model Baterai 1 X 10 (Song dkk, 2019)	32
Tabel 3. 5 Parameter Hasil Meshing	37
Tabel 3. 6 Setup Solver pada Fluent	38
Tabel 3. 7 Setup Model pada Fluent	38
Tabel 3. 8 Setup Boundary Condition pada Fluent	39
Tabel 3. 9 Setup Solution Methods pada Fluent	39
Tabel 3. 10 Setup Initialization dan Run Calculation pada Fluent.....	39
Tabel 3. 11 Hasil Grid Independency Test	40
Tabel 3. 12 Data Spesifikasi Baterai pada Proses Validasi	41
Tabel 3. 13 Data Spesifikasi Material	41
Tabel 3. 14 Data Spesifikasi PCM Paraffin OP44E.....	41
Tabel 3. 15 Variasi Penelitian.....	42
Tabel 4. 1 Rangkuman Hasil Simulasi dan Hasil Song dkk (2019).....	45
Tabel 4. 2 Rangkuman Hasil Simulasi Sistem Pendinginan Hanya PCM dan Hybrid	46
Tabel 4. 3 Rangkuman Hasil Simulasi Desain 1	49
Tabel 4. 4 Rangkuman Hasil Simulasi pada Desain 2	53
Tabel 4. 5 Rangkuman Hasil Simulasi pada Desain 3	57
Tabel 4. 6 Parameter Input pada Perhitungan Reynold Number.....	60
Tabel 4. 7 Rangkuman Nilai Keofisien Konveksi pada Seluruh Variasi	63
Tabel 4. 8 Parameter Input pada Proses Validasi	65
Tabel 4. 9 Konstanta Perhitungan Siklus Hidup	65
Tabel 4. 10 Parameter Input pada Perhitungan Jumlah Siklus Hidup Baterai	66
Tabel 4. 11 Rangkuman Nilai Jumlah Siklus Hidup dan Temperatur pada Masing-Masing Desain dan Kecepatan	68

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transportasi menjadi salah satu penyebab utama polusi udara dan efek rumah kaca. Kendaraan konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil dapat melepaskan zat-zat berbahaya ke udara, yang dapat menyebabkan gangguan kesehatan dan perubahan iklim. Solusi dari masalah tersebut adalah dengan melakukan transisi ke transportasi berbasis energi terbarukan, seperti mobil listrik. Mobil listrik memiliki teknologi yang lebih baru, lebih efisien, dan lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan kendaraan konvensional berbasis ICE (*Internal Combustion Engine*).

Tabel 1. 1 Perbandingan Beberapa Tipe Baterai (Vidyanandan, 2019)

Battery Type	Nominal Voltage (V)	Specific Energy (Wh/kg)	Energy Density (Wh/L)	Specific Power (W/kg)	Life Cycle
Pb-acid	2.1	30-40	100	180	500
Ni-Cd	1.2	50-80	300	200	2000
Ni-MH	1.2	60-120	180-220	200-300	<3000
ZEBRA	2.6	90-120	160	155	>1200
Li-ion	3.6	120-250	200-600	200-430	2000
LiPO	3.7	130-225	200-250	260-450	>1200

Pada mobil listrik, energi yang digunakan disimpan di dalam susunan baterai yang disebut dengan *battery pack*. Saat ini, Lithium-Ion Batteries (LIBs) merupakan baterai yang paling populer digunakan untuk mobil listrik di pasaran (Vidyanandan, 2019). Hal tersebut dikarenakan, densitas energi dan waktu siklus yang dimiliki oleh LIBs lebih besar dibandingkan dengan tipe baterai lainnya. Densitas energi menunjukkan jumlah energi yang dapat disimpan per satuan massa. Densitas energi akan mempengaruhi jarak tempuh yang dapat dicapai oleh mobil (Dieng dkk, 2020). Sedangkan, waktu siklus menunjukkan umur yang dimiliki oleh baterai.

Pada baterai terdapat fenomena degradasi kapasitas akibat proses pengisian dan pengosongan pada baterai. Degradasi kapasitas atau *capacity loss* merupakan kondisi hilangnya kemampuan baterai untuk menyimpan energi. Degradasi akan mempengaruhi waktu hidup (*lifetime*) yang dimiliki oleh baterai. Semakin besar degradasi maka semakin kecil waktu hidup yang dimiliki oleh baterai sehingga akan mempercepat waktu untuk mengganti baterai mobil listrik dan akan meningkatkan biaya operasional pada mobil listrik. Degradasi pada baterai sangat dipengaruhi oleh temperatur operasi, *heat generation*, DOD, dan lama operasi baterai tersebut (Wang dkk, 2011). Degradasi akan semakin tinggi ketika temperatur operasi semakin tinggi. Sehingga waktu siklus yang dimiliki oleh baterai juga akan semakin menurun (Fenfang dkk, 2020). Oleh karena itu, diperlukan sistem pendinginan yang baik pada baterai sehingga dapat menjaga suhu baterai tetap dingin dan mengurangi laju degradasi pada baterai.

Pendinginan pada baterai dapat dilakukan dengan beberapa metode, seperti pendinginan dengan udara, cairan, dan *phase change material* (PCM). Skema pendinginan menggunakan udara memiliki kelebihan berupa pendinginan pasif, sistem operasi yang lebih simpel dan kemudahan dalam perawatan, tetapi memiliki nilai koefisien perpindahan panas yang rendah sehingga memiliki kemampuan pendinginan yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem pendinginan lainnya. Pendinginan menggunakan cairan (*liquid*) lebih efisien dibandingkan dengan pendinginan menggunakan udara, tetapi pendinginan dengan cairan memiliki kerumitan sistem operasi yang lebih rumit dibandingkan dengan pendinginan menggunakan udara. Selain itu, pendinginan dengan cairan memiliki potensi yang cukup tinggi untuk mengalami kebocoran. Oleh karena itu, PCM merupakan alternatif terbaik dalam pendinginan baterai. Hal tersebut sudah terbukti oleh berbagai studi bahwa PCM merupakan sistem pendinginan pasif

yang luar biasa (Wazeer dkk,2022). PCM atau *Phase Change Material* merupakan material yang dapat berubah fasa dan memanfaatkan *latent heat* selama perubahan fasa untuk menyimpan dan melepaskan energi yang cukup besar.

Namun, PCM memiliki kekurangan terutama pada saat berada pada kondisi operasi yang kontinu. Ketika PCM dipanaskan secara terus menerus maka PCM akan mulai meleleh sampai dengan *temperatur liquidus*-nya. Setelah meleleh secara sempurna, PCM tidak akan dapat lagi mendinginkan baterai secara baik yang menyebabkan temperatur baterai terus meningkat. Peningkatan temperatur yang terlalu tinggi pada baterai dapat menyebabkan terjadinya kerusakan dan turunnya kapasitas pada baterai secara drastis. (Song dkk, 2019). Namun, hal tersebut dapat diatasi dengan mengalirkan air pada PCM sehingga PCM tetap terjaga temperaturnya.

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dikaji lebih lanjut bagaimana pengaruh penambahan air pada sistem pendinginan *hybrid* antara air dengan PCM terhadap temperatur dan siklus hidup baterai. Pada penelitian ini dilakukan variasi berupa kecepatan aliran air dan luas penampang di saluran air mengalir (*channel*) untuk mencari desain dan operasi sistem manajemen termal yang paling optimal. Penelitian akan dilakukan secara numerik dengan menggunakan *software* Ansys Fluent 2023 R1 untuk proses simulasi dan Solidwork untuk proses desain.

1.2 Rumusan Masalah

Bedasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka dapat disusun beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan fluida berupa air ke dalam sistem pendinginan hybrid terhadap distribusi temperatur pada baterai?
2. Bagaimana pengaruh perubahan luas penampang yang dilewati aliran terhadap distribusi temperatur pada baterai?
3. Bagaimana pengaruh kecepatan masuk aliran air terhadap distribusi temperatur pada baterai?
4. Bagaimana pengaruh perubahan luas penampang dan kecepatan masuk aliran terhadap jumlah siklus hidup baterai lithium-ion?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan diharapkan dapat mencapai beberapa tujuan berikut. Berikut merupakan beberapa tujuan yang ingin di capai:

1. Mengetahui pengaruh penambahan fluida berupa air ke dalam sistem pendinginan *hyrbid* terhadap distribusi temperatur pada baterai.
2. Mengetahui pengaruh perubahan luas penampang terhadap distribusi temperatur pada baterai.
3. Mengetahui pengaruh perubahan kecepatan masuk aliran terhadap distribusi temperatur pada baterai.
4. Mengetahui pengaruh perubahan luas penampang dan kecepatan masuk aliran terhadap jumlah siklus hidup baterai lithium-ion.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian dilakukan dengan menerapkan beberapa batasan dan asumsi untuk mencapai tujuan. Berikut merupakan batasan dan asumsi yang diterapkan:

1. Baterai yang digunakan merupakan baterai lithium-ion tipe 18650 dari LG
2. Simulasi dilakukan pada *software* Ansys Fluent 2023 R1.
3. Pada penelitian ini, efek radiasi diabaikan karena nilai yang sangat kecil.
4. *Heat generation* yang digunakan berada pada DOD 100% dan *heat generation* pada baterai dianggap seragam

5. Pada penelitian ini, siklus hidup pada baterai yang dihitung akan menggunakan temperatur rata-rata pada baterai hasil simulasi.
6. Arus yang keluar dan masuk dari baterai dianggap konstan.
7. Pada penelitian ini, sistem pendinginan menggunakan PCM dan air sebagai fluidanya.
8. Penelitian pada setiap variasi dilakukan dengan waktu 1800 s.
9. Variabel yang digunakan sebagai variasi pada tugas akhir ini adalah luas penampang dengan bentuk 1, 2, dan 3 serta kecepatan masuk aliran air 0,5 m/s; 0,15 m/s; dan 0,05 m/s.

1.5 Manfaat

Penulis berharap hasil dari tugas akhir ini dapat memberikan beberapa manfaat, antara lain:

1. Meningkatkan pemahaman pengaruh pentingnya sistem pendinginan pada baterai, khususnya sistem pendinginan *hybrid*, terhadap temperatur dan siklus hidup baterai.
2. Hasil penelitian dapat dijadikan sebagai referensi dalam mengembangkan sistem pendinginan baterai yang lebih baik.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baterai Lithium-ion

Baterai merupakan suatu media penyimpanan energi yang dapat merubah energi kimia menjadi energi listrik. Salah satu jenis baterai yang sering digunakan adalah baterai Lithium-ion. Baterai Lithium-ion terdiri dari beberapa komponen, yakni elektroda positif (katoda), elektroda negatif (anoda), separator, dan elektrolisis.

a. Elektroda

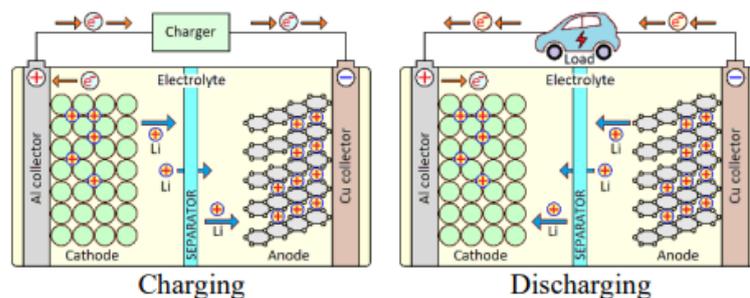
Merupakan material atau tempat yang digunakan untuk mengumpulkan ion-ion lithium. Pada elektroda terjadi proses reaksi oksidasi dan reduksi. Reaksi oksidasi merupakan reaksi yang terjadi dikarenakan adanya pelepasan elektron dari suatu molekul sedangkan reaksi reduksi merupakan reaksi yang terjadi dikarenakan adanya penambahan elektron pada suatu molekul atau atom.

b. Separator

Separator merupakan material yang berada di antara anoda dan katoda yang berfungsi untuk mencegah terjadinya kontak singkat (*short contact*) akibat kontak antara anoda dan katoda. Dalam pemilihan separator perlu diperhatikan sifat separator seperti isolator, hambatan listrik kecil, dan tidak terdegradasi dengan elektrolit. Beberapa material yang dapat digunakan sebagai separator antara lain polyolefins, Polyvinylidene fluodire, PTFE, PVC, dan polyethylene oxide.

c. Elektrolisis

Elektrolit merupakan material yang berfungsi untuk menghantarkan ion lithium dari anoda ke katoda dan sebaliknya. Elektrolit dibagi menjadi dua jenis, yakni elektrolit cair dan elektrolit padat. Elektrolit cair memiliki kelebihan konduktivitas ionik yang besar, harga yang murah, namun memiliki performa siklus yang rendah. Beberapa material yang dapat digunakan untuk elektrolit cair antara lain LiNO_3 , LiClO , Li_2SO_4 , dan lain-lain. Elektrolit padat memiliki kelebihan daya tahan siklus yang lebih tinggi dibandingkan dengan elektrolit cair. Beberapa material yang dapat digunakan untuk elektrolit padat antara lain $(\text{La,Li})\text{TiO}_3$ dan lain-lain.



Gambar 2. 1 Proses Oksidasi dan Reduksi

Pada saat pengisian daya (*charging*), elektron bergerak dari katoda menuju anoda sedangkan ion yang terdapat pada lithium bergerak dari katoda menuju anoda melalui elektrolit. Pada saat penggunaan daya (*discharge*), elektron bergerak dari anoda menuju katoda sedangkan ion bergerak dari anoda melewati separator menuju katoda. Reaksi yang terjadi pada proses *charging* dan *discharging* ini dipengaruhi oleh reaksi reduksi dan oksidasi (Perdana, 2020).

2.2 Battery Thermal Management System

Pada saat *charge* atau *discharge* baterai mengalami kenaikan temperatur. Hal tersebut dikarenakan munculnya panas yang terjadi akibat reaksi kimia dan akibat efek joule heating.

Peningkatan temperatur pada baterai dapat menyebabkan turunya kapasitas dan daya yang dapat dihasilkan baterai. Hal tersebut dikarenakan peningkatan temperatur menyebabkan material aktif pada baterai menjadi tidak aktif dan meningkatkan impedensi yang terjadi pada baterai. Hal ini akan mempengaruhi umur baterai dan juga performa yang dimiliki oleh baterai.

Selain itu, panas yang muncul pada saat proses *charge* dan *discharge* dapat meningkatkan terjadi *thermal runaway*. *Thermal runaway* merupakan fenomena yang memberikan konsekuensi kerusakan, seperti peningkatan temperatur, pembangkitan gas, dan ledakan pada baterai akibat laju peningkatan temperatur. Penyebab utama terjadinya *thermal runaway* adalah ketidak rataan penyebaran panas yang terdapat pada baterai. Ketidak rataan penyebaran temperatur ini terjadi dikarenakan hambatan termal dan panas yang muncul dari baterai. (Kim dkk, 2018)

Pada baterai suhu baterai tidak boleh berada di atas maupun dibawah rentang temperatur operasi. Hal tersebut dikarenakan apabila suhu baterai terlalu rendah maka akan menimbulkan penurunan performa baterai. Hal tersebut dikarenakan peningkatan lapisan film dan impedansi yang terjadi pada baterai. Sehingga, *battery thermal management system* (BTMS) diperlukan untuk menjaga temperatur baterai tetap berada di rentang operasi.

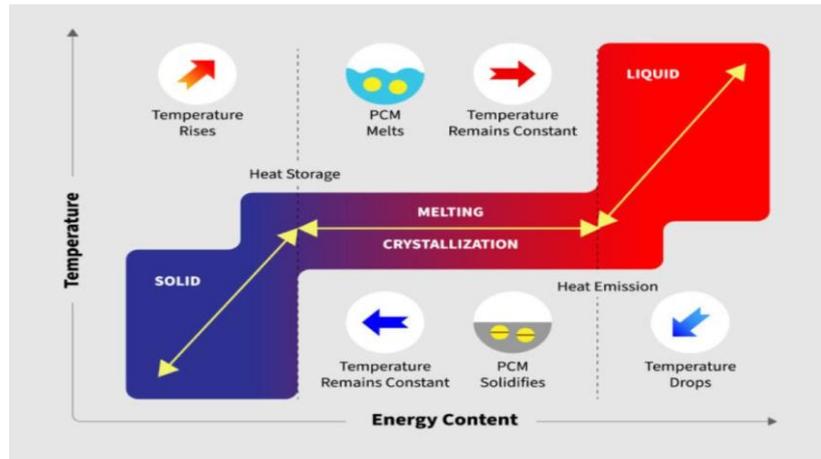
Tabel 2. 1 Perbandingan Beberapa *Thermal Management System* (Wazeer dkk, 2022)

TYPE OF BTMS	ADVANTAGES	DISADVANTAGES
Natural Convection	Low initial cost	Low heat transfer coefficient
	No operative cost	Depends on ambient air temperature
	Easy to integrate	Limited temperature reduction
	Passive cooling	Low efficiency
Air forced convection	Simple operation	Low heat transfer coefficient
	Low initial cost	Depends on ambient air temperature
	Low maintenance	Electricity consumption for fans
		Uneven temperature distribution
Liquid passive cooling	Low initial cost	Risk of leakage
	Low operative cost	Risk of loss of the gass
	Passive cooling	Insufficient for extreme conditions
	Low maintenance	
Liquid active cooling	Higher heat transfer	Highest initial cost
	More uniform temperature distribution	Highest operative cost
		Complex
		Risks of leakage
		Short lifespan
	Electricity consumption for pump	
Heat pump	Higher conductivity	Highest initial cost
	Higher heat transfer	High operative cost
	Higher efficiency	Complex
		Risks of leakage
	Electricity consumption	
PCM	Low cost	Low conductivity
	Low maintenance	Risk of leakage
	Passive cooling	Regeneration of PCM
	Higher efficiency	Risk of supercooling
	More uniform temperature distribution	Volume difference with phase change

BTMS merupakan skema yang dikontrol secara elektronik untuk menjaga *battery pack* tetap berada di rentang temperatur operasional dan menjaga distribusi temperatur agar tetap merata (Wazeer dkk, 2022). Pada BTMS, pendinginan dapat dilakukan dengan menggunakan cairan, udara, maupun *phase change material* (PCM). Pada BTMS, terdapat dua skema yang digunakan, yakni skema aktif dan skema pasif. Skema aktif memerlukan komponen mekanis, seperti kipas atau *heat pipe* untuk melakukan pendinginan atau pemanasan, sedangkan skema pasif tidak memerlukan komponen tersebut.

2.3 Phase Change Material (PCM)

Phase Change Material (PCM) merupakan material yang dapat berubah fase pada temperatur tertentu dan memiliki kemampuan menyimpan energi dalam bentuk *sensible heat* dan *latent heat*. PCM akan mengalami perubahan fase ketika temperatur perubahannya (*phase change temperatur*) tercapai. PCM akan menyerap energi dari suatu sistem dan akan melepaskan energi tersebut ke lingkungan saat temperatur PCM berada di bawah temperatur perubahan fasanya. Pada saat pelepasan energi, PCM akan kembali ke bentuk awalnya dan akan berubah lagi ketika dipanaskan kembali (Wazeer dkk, 2022).



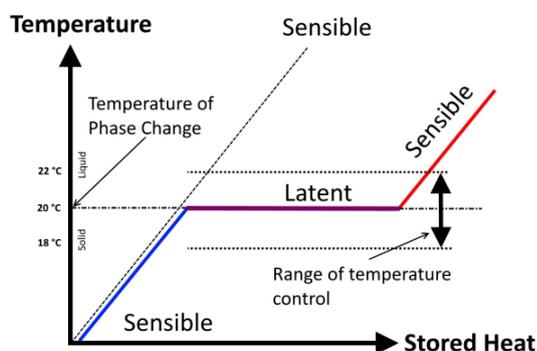
Gambar 2. 2 Grafik Hubungan Temperatur Terhadap Konten Energi Pada PCM

Pada baterai, PCM dapat digunakan untuk menjaga temperatur internal baterai dan menjaga keseragaman distribusi temperatur pada baterai. Dalam pemilihan PCM, perlu diperhatikan beberapa hal agar mendapatkan hasil pendinginan yang optimal. Berikut merupakan hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan PCM (Chen dkk, 2019) .

1. Kapasitas termal yang besar, termasuk *latent* dan *sensible*. Hal ini menunjukkan kemampuan penyerapan panas yang dimiliki oleh PCM.
2. Konduktivitas termal yang tinggi. Hal ini menunjukkan kemampuan PCM dalam melakukan perpindahan panas. Semakin tinggi konduktivitas termal maka semakin cepat perpindahan panasnya dan semakin bagus kemampuan pendinginan yang dimiliki oleh PCM.
3. *Phase change temperatur* yang memadai.
4. Ratio perubahan bolume yang kecil, stabilitas kimia yang baik, tidak beracun, tidak mudah terbakar, dan ramah lingkungan.
5. Mudah didapatkan, murah, dan memiliki ketahanan yang kuat.

2.4 Panas Sensible dan Panas Laten

Panas sensible merupakan panas yang dapat meningkatkan temperatur suatu material, sedangkan panas laten merupakan panas yang dilepaskan atau diserap oleh suatu material tanpa menyebabkan perubahan temperatur. Pada penyimpanan energi, penyimpanan panas laten merupakan cara yang paling efisien karena kestabilan temperatur yang diberikan pada saat proses pelepasan dan penyerapan energi. Sedangkan, panas sensible mendasari perubahan kapasitas panas dan juga temperatur pada proses *charging* dan *discharging* sehingga PCM dengan panas sensible yang tinggi tidak cukup baik untuk material dengan rentang temperatur operasi yang rendah (Skovajsa & Zalesak, 2018)



Gambar 2. 3 Panas Sensible dan Laten

Energi dari panas sensible dapat dihitung menggunakan konsep perpindahan panas, sebagai berikut:

$$Q = m \cdot \int_{T_i}^{T_f} c_p dT \quad (2.1)$$

Keterangan:

Q	: energi dari panas sensible	(J)
m	: masa material	(kg)
c_p	: kalor jenis	$\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$
T_i	: temperatur awal	(K)
T_f	: temperatur akhir	(K)

Pada panas laten, jumlah energi yang diserap dan dilepaskan selama perubahan fasa dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta Q = m \cdot \Delta h \quad (2.2)$$

Keterangan:

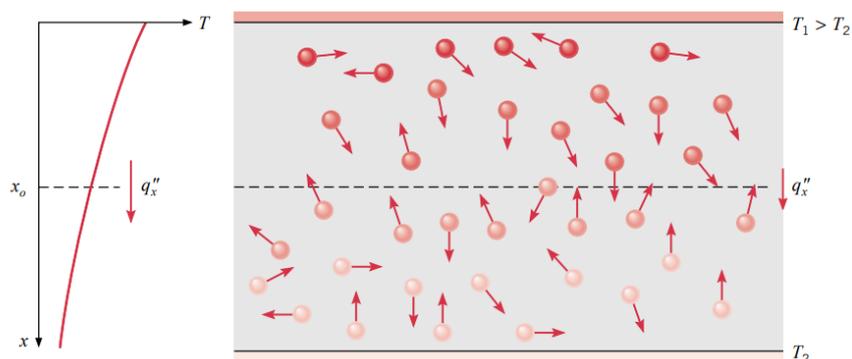
ΔQ	: jumlah energi yang diserap atau disimpan	(J)
Δh	: perubahan entalphi	$\left(\frac{J}{kg}\right)$

2.5 Perpindahan Panas

Perpindahan panas merupakan perpindahan energi yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur antara dua media dan perpindahan energinya terjadi dari daerah dengan temperatur lebih tinggi menuju temperatur lebih rendah. Perpindahan panas secara umum dapat dibedakan menjadi tiga, yakni konduksi, konveksi, dan radiasi. Setiap tipe perpindahan panas memiliki kondisi, media, dan persamaannya masing-masing. Berikut merupakan penjelasan lebih lanjut dari masing-masing tipe perpindahan panas.

2.5.1 Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan energi yang terjadi pada suatu medium dikarenakan gradien temperatur dan pergerakan acak suatu partikel atau molekul. Dalam pengertian lain, konduksi merupakan perpindahan energi dari suatu partikel dengan energi lebih tinggi ke partikel yang kurang berenergi. Konduksi dapat terjadi dikarenakan adanya pergerakan acak dari partikel (difusi) atau molekul yang kemudian saling bertabrakan dan menyebabkan terjadinya perpindahan energi. Jumlah energi pada molekul berbanding lurus dengan temperatur yang dimiliki. Dimana, semakin tinggi nilai temperatur maka akan semakin besar energi yang dapat dihantarkan. Perpindahan panas konduksi dikarenakan gradien temperatur dan pergerakan acak molekul (Incropera, 2006)



Gambar 2. 4 Perpindahan Panas Konduksi dikarenakan Gradien Temperatur dan Pergerakan Acak Molekul (Incropera, 2006)

Perpindahan panas secara konduksi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Fourier. Persamaan ini dapat digunakan untuk menghitung energi yang ditransfer per satuan luasan. Pada konduksi dengan keadaan tunak (*steady state*) dan satu dimensional, persamaan Fourier yang digunakan adalah, sebagai berikut (Incropera, 2006):

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (2.3)$$

Keterangan:

- q : perpindahan panas konduksi (W)
- k : konduktivitas termal ($\frac{W}{m \cdot K}$)
- A : luas permukaan (m^2)
- ΔT : perbedaan temperatur (K)
- ΔX : panjang perpindahan panas (m)

Selain itu, persamaan Fourier juga dapat digunakan untuk menghitung energi yang ditransfer per satuan waktu.

$$q'' = -k \frac{dT}{dX} \quad (2.4)$$

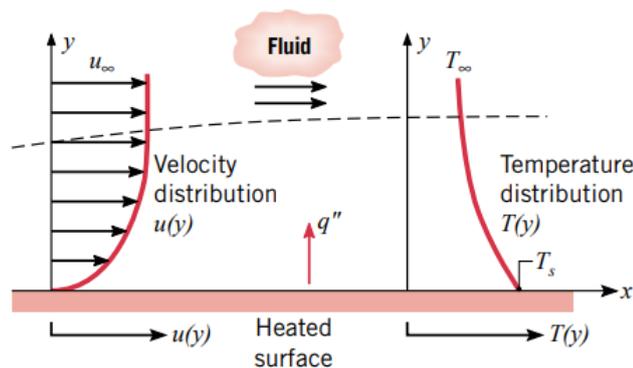
Keterangan:

- q'' : perpindahan panas konduksi ($\frac{W}{m^2}$)

2.5.2 Konveksi

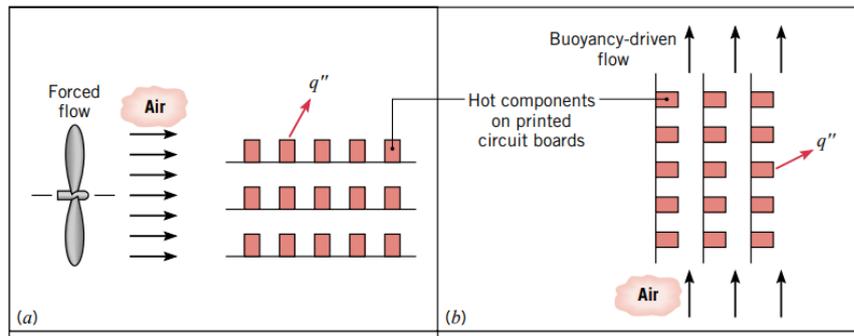
Konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi akibat interaksi antara fluida dan suatu permukaan yang memiliki perbedaan temperatur. Interaksi antara fluida dengan permukaan ini akan menyebabkan munculnya suatu wilayah pada bagian fluida yang memiliki variasi kecepatan dari nol pada permukaan sampai kecepatan tertentu tergantung dengan aliran fluida. Wilayah ini diketahui sebagai *velocity, hydrodynamic, atau boundary layer*.

Perbedaan kecepatan fluida yang mengalir ini akan menyebabkan munculnya wilayah dengan variasi temperatur. Variasi temperatur dimulai dari T_s pada permukaan ($y = 0$) sampai dengan T_∞ pada luar aliran ($y = \infty$). Pada saat $T_s > T_\infty$, perpindahan panas terjadi dari permukaan menuju fluida atau fluida dipanaskan. Sedangkan, ketika $T_s < T_\infty$ maka perpindahan panas terjadi dari fluida menuju permukaan atau permukaan dipanaskan (Incropera, 2006).



Gambar 2.5 Thermal Boundary Layer pada Perpindahan Panas Konveksi (Incropera, 2006)

Perpindahan panas secara konveksi dapat dikelompokkan berdasarkan sifat terjadinya, yakni konveksi natural (*natural convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Konveksi natural merupakan konveksi yang terjadi akibat gaya *buoyancy*, dimana distribusi temperatur fluida menyebabkan terjadinya perbedaan massa jenis fluida. Sedangkan, konveksi paksa merupakan konveksi yang terjadi akibat gaya dari luar, seperti pompa dan kipas.



Gambar 2. 6 Perpindahan Panas secara Konveksi a) Konveksi natural b) Konveksi paksa (Incropera, 2006)

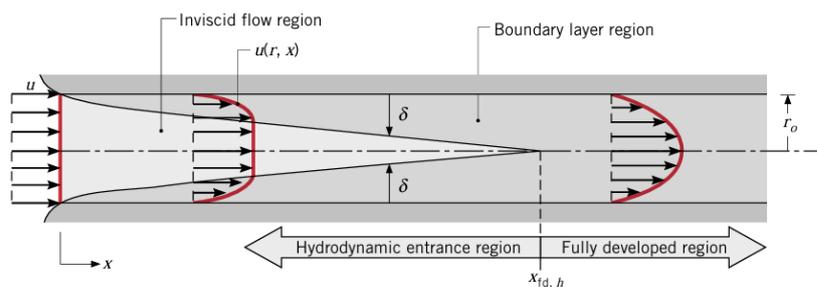
Perpindahan panas secara konveksi dapat didekati dengan menggunakan persamaan berikut:

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2. 5)$$

Keterangan:

h : koefisien konveksi $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$

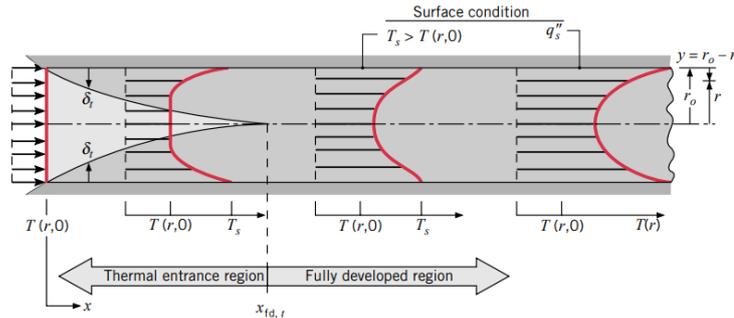
2.5.3 Internal Flow



Gambar 2. 7 Gambar Pembentukan *Velocity Boundary Layer* (Incropera, 2006)

Aliran internal merupakan aliran pada suatu area yang dibatasi oleh suatu permukaan, seperti aliran air dalam pipa atau *duct*. Pada saat aliran akan masuk ke dalam pipa, kecepatan aliran memiliki nilai yang seragam. Namun, akibat gesekan pada dinding pipa menyebabkan kecepatan aliran di bagian dinding pipa berhenti. Hal ini juga menyebabkan profil kecepatan pada aliran menurun secara gradual akibat gesekan dan menciptakan gradien kecepatan. Agar dapat mengatasi penurunan kecepatan tersebut, kecepatan aliran pada bagian tengah pipa harus lebih cepat dibandingkan dengan bagian lainnya sehingga tetap dapat mengalirkan fluida melewati pipa (Cengel & Ghajar, 2020).

Bagian aliran yang terkena dampak dari gaya gesek akibat viskositas fluida disebut dengan *boundary layer*. *Boundary layer* pada aliran akan semakin besar seiring jarak aliran sampai dengan *boundary layer* menyatu. Daerah dengan aliran *boundary layer* yang menyatu disebut dengan *fully developed region* dan jarak antara ujung masuk pipa ke daerah *hydrodynamically fully developed region* disebut dengan *hydrodynamic entry length*, $x_{fd, h}$. Pada daerah *hydrodynamically fully developed region*, profil kecepatan aliran tidak akan meningkat lagi seiring jarak masuk aliran. (Incropera, 2006).



Gambar 2. 8 Gambar Pembentukan Thermal Boundary Layer (*Incropera, 2006*)

Selain profil kecepatan aliran, aliran yang masuk ke dalam pipa juga memiliki temperatur yang konstan. Akibat adanya perpindahan panas secara konveksi antara fluida dengan permukaan dalam pipa maka akan menimbulkan terbentuknya *thermal boundary layer* sepanjang pipa. Daerah dimana *thermal boundary layer* terbentuk disebut dengan *thermal entrance region* dan panjang dari daerah tersebut disebut dengan *thermal entry length*, $x_{fd,t}$. Daerah yang berada setelah *entrance region* disebut dengan *thermal fully developed region*. Pada daerah ini nilai dari profil temperatur bernilai konstan. Pada saat *hydrodynamic dan thermal full developed* terbentuk pada aliran maka aliran tersebut dapat disebut dengan *fully developed flow* (Cengel & Ghajar, 2020).

Pada aliran internal terdapat dua tipe aliran, yakni aliran laminar dan turbulen. Aliran pada *internal flow* dapat ditentukan dengan menghitung nilai *reynold number* yang dimiliki oleh aliran. *Reynold number* merupakan *dimensionless* unit yang menyatakan rasio dari gaya inersia pada aliran terhadap viskositas suatu aliran. Suatu aliran berjenis laminar pada saat *reynold number* bernilai kurang atau sama dengan 2300 dan aliran berjenis turbulen pada saat *reynold number* bernilai lebih dari 2300. Nilai *reynold number* suatu aliran dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$Re_D = \frac{\rho v_m D}{\mu} \quad (2.6)$$

dimana,

$$v_m = \frac{\dot{m}}{A \cdot \rho} \quad (2.7)$$

Keterangan :

- v_m : kecepatan masuk fluida (m/s)
- D : diameter *cross section* (m)
- μ : viskositas dinamik (m^2/s)

Setelah mengetahui jenis aliran yang terjadi maka dapat dilakukan perhitungan lebih lanjut untuk menghitung nilai koefisien konveksi. Berikut merupakan persamaan yang dapat digunakan pada masing-masing tipe aliran.

2.5.3.1 Aliran Laminar

Hydrodynamic entry length biasanya dihitung dari jarak ujung pipa tempat masuk aliran sampai dengan daerah *fully developed region*. Pada aliran laminar, *hydrodynamic* dan *thermal entry length* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{x_{fd,h}}{D} = 0,05 Re_D \quad (2.8)$$

$$\frac{x_{fd,t}}{D} = 0,05 Re_D Pr \quad (2.9)$$

Setelah mengetahui nilai dari *hydrodynamic entry length* dan *thermal entry length* maka dapat dilanjutkan untuk menghitung nilai *nusselt number* pada area *entrance* dan *fully*

developed region. Berikut merupakan persamaan pada aliran laminar untuk masing-masing area aliran.

- *Entrance Region*

Pada daerah *entrance* akan terbentuk *thermal boundary layer* dan *velocity boundary layer*. Dalam menyelesaikan permasalahan pada daerah *entrance* terdapat dua solusi, yakni untuk mencari *thermal entrance length* dapat mengasumsikan bahwa profil kecepatan pada aliran sudah *fully developed* dan untuk solusi lainnya adalah dengan menganggap profil kecepatan dan temperatur (*combined entrance length*) mengalami perkembangan yang bersamaan.

$$\overline{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,0668(D/L)Re_D Pr}{1 + 0,04[(D/L)Re_D Pr]^{2/3}} \quad (2.10)$$

$$\left[\begin{array}{c} \text{thermal entrance length} \\ \text{or} \\ \text{combined entrance length with } Pr \geq 5 \end{array} \right]$$

Persamaan 2.10 dapat digunakan untuk kasus *thermal entrance length* atau *combined entrance length* dengan $Pr \geq 5$.

- *Fully Developed Region*

Pada aliran laminar, daerah *fully developed* dapat didekati dengan menggunakan beberapa persamaan berikut.

- Heat flux* konstan

$$Nu_D = \frac{h \cdot D_h}{k} = 4,36 \quad (2.11)$$

- Temperatur permukaan konstan

$$Nu_D = \frac{h \cdot D_h}{k} = 3,66 \quad (2.12)$$

2.5.3.2 Aliran Turbulen

Pada aliran turbulen, *hydrodynamic entry length* yang dimiliki lebih pendek dibandingkan dengan pada aliran laminar dan pengaruh dari *reynold number* melemah. Efek dari *entrance* tidak begitu signifikan pada pipa dengan panjang 10 kali diameter. Pada *thermal boundary length* nilai *prandtl number* tidak begitu berpengaruh. *Hydrodynamic* dan *thermal entry length* pada aliran turbulen dapat didekati dengan menggunakan persamaan berikut.

$$10 \leq \frac{x_{fd,h}}{D} \leq 60 \quad (2.13)$$

$$\frac{x_{fd,t}}{D} = 10 \quad (2.14)$$

Aliran turbulen akan diasumsikan *fully developed turbulent flow* pada saat $\left(\frac{x}{D}\right) > 10$. Pada aliran turbulen nilai dari panjang *entry length* relatif kecil sehingga nilai *usselt number* rata-rata pada seluruh pipa dapat diasumsikan memiliki nilai yang sama dengan nilai *nusselt number* pada aliran *fully developed*.

$$\overline{Nu}_D = \overline{Nu}_{D,fd} \quad (2.15)$$

Adapun persamaan *nusselt number* pada aliran *fully developed* adalah sebagai berikut.

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.16)$$

$$\left[\begin{array}{c} 3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6 \\ 0,5 \leq Pr \leq 2000 \end{array} \right]$$

2.5.3.3 Non-circular tube

Pada pipa dengan bentuk *non-circular*, *characteristic length* pada pipa didekati dengan menggunakan *effective diameter*. *Effective diameter* tersebut dapat digunakan dalam menghitung nilai *reynold number* dan *nusselt number*. *Effective diameter* yang digunakan bernama *hydraulic diameter* dengan persamaan yang dimiliki adalah sebagai berikut.

$$D_h = \frac{4 \times A_c}{P} \quad (2.17)$$

Keterangan :

D_h : *hydraulic diameter* (m)
 A_c : *cross-sectional area* (m²)
 P : *wetted perimeter* (m)

2.6 Heat Generation pada Baterai Lithium-ion

Heat generation merupakan jumlah panas per satuan volume yang dimiliki oleh baterai. Pembentukan panas pada baterai dapat diakibatkan oleh beberapa efek, yakni panas *reversible* dan panas *irreversible*. Panas *reversible* merupakan panas yang timbul pada katoda dan anoda yang disebabkan oleh terjadinya perubahan entropi selama reaksi kimia. Sedangkan, panas *irreversible* merupakan panas yang timbul akibat adanya tahanan termal pada baterai atau biasa dikenal dengan *joule heating*. Panas *irreversible* merupakan penyumbang panas terbesar pada baterai dengan persentase sekitar 70% dari total panas yang dibangkitkan (Choudhari dkk, 2020). Perhitungan *heat generation* pada baterai dapat dihitung menggunakan persamaan Bernadi.

$$q_{gen} = q_{rev} + q_{irev} \quad (2.18)$$

dimana,

$$q_{rev} = I^2 RT \quad (2.19)$$

$$q_{irev} = I \left(T \frac{dV_{oc}}{dT} \right) \quad (2.20)$$

sehingga,

$$q_{gen} = I^2 RT + I \left(T \frac{dV_{oc}}{dT} \right) \quad (2.21)$$

Adapun, untuk perhitungan *heat generation* per satuan volume dapat diitung menggunakan persamaan berikut.

$$q'''_{gen} = \frac{I^2 RT + I \left(T \frac{dV_{oc}}{dT} \right)}{Vol} \quad (2.22)$$

Keterangan :

q'''_{gen} : laju *heat generation* pada baterai (W/m³)
 Vol : volume baterai (m³)
 q_{gen} : *heat generation* pada baterai (W)
 q_{rev} : panas akibat proses *reversible* (W)
 q_{irrev} : panas akibat reaksi *irreversible* (W)
 I : arus listrik pada baterai (A)
 U : tegangan sirkuit terbuka (V)
 V : tegangan operasi (V)
 T : temperatur baterai (K)

2.7 Capacity Loss

Siklus hidup baterai sangat dipengaruhi oleh temperatur operasi baterai. Temperatur pada baterai bergantung pada jumlah panas yang muncul pada baterai. Semakin panas suatu

baterai maka semakin besar temperatur yang dimiliki oleh baterai. Temperatur yang terlalu tinggi pada baterai dapat menyebabkan terjadinya peningkatan *capacity loss* pada baterai. *Capacity loss* dapat dihitug menggunakan persamaan yang ditulis oleh Wang dkk. Dengan mengetahui nilai *capacity loss*, maka dapat ditentukan jumlah siklus hidup suatu baterai. Siklus hidup baterai merupakan jumlah siklus yang dilalui baterai sampai mencapai nilai *capacity loss* sebesar 20% (Chen dkk, 2020). Berikut merupakan persamaan *capacity loss* yang dituliskan oleh Wang dkk (2011).

$$\theta^{CYC} = B \cdot \exp \left[\frac{-31700 + 370,3 \times C_{rate}}{RT} \right] \cdot (A_h)^{0,55} \quad (2.23)$$

dimana,

$$A_h = \text{jumlah siklus} \times DOD \times 2 \quad (2.24)$$

Keterangan:

- B : konstanta
- C rate : laju *charge* dan *discharge*
- Ah : total ampere
- R : 8,314 (J/ Kmol)
- T : temperatur baterai (°K)
- DOD : *Depth of Discharge* (%)

Tabel 2. 2 Data Konstanta B

Parameter	Nilai			
	0,5C	2C	6C	10 C
B	31.630	21.681	12.934	15.512

2.8 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan bidang ilmu terkait dengan mekanika fluida yang memanfaatkan algoritma dan pendekatan numerik untuk menyelesaikan dan mengalalisa masalah yang diberikan. CFD dilibatkan dalam banyak bidang teknik, seperti pada bidang luar angkasa, arsitektur, otomotif, biomedik, dan lain-lain. Kelebihan dari penggunaan metode CFD adalah dapat menghemat waktu dan biaya yang dikeluarkan untuk membuat peningkatan pada suatu produk. Pada CFD terdapat tiga elemen utama yaitu, *pre-process*, *solver*, dan *post processing*. (Pinto, 2016)

a. Pre-Process

Pre-process merupakan tahapan dalam pembuatan geometri simulasi yang akan digunakan sebagai domain *perhitungan pada CFD*. Pada proses ini diperlukan pemahaman pembuat desain untuk memahami fenomena-fenomena fisika apa saja yang terjadi pada model yang dibuatnya. Setelah selesai melakukan pembuatan geometri, maka dilakukan proses *meshing* pada geometri tersebut. Proses *mesing* merupakan pembagian beberapa bagian model geometri menjadi bagian yang lebih kecil. Semakin kecil luasan hasil pembagian yang dimiliki maka semakin akurat hasil simulasi yang dihasilkan. Kemudian, proses dilanjutkan dengan menentukan material dan fluida yang digunakan pada desain. Setelah material ditentukan, maka dilakukan penentuan *boundary condition* pada model. Penentuan geometri yang tepat diperlukan untuk menggambarkan keadaan sebenarnya pada model secara akurat.

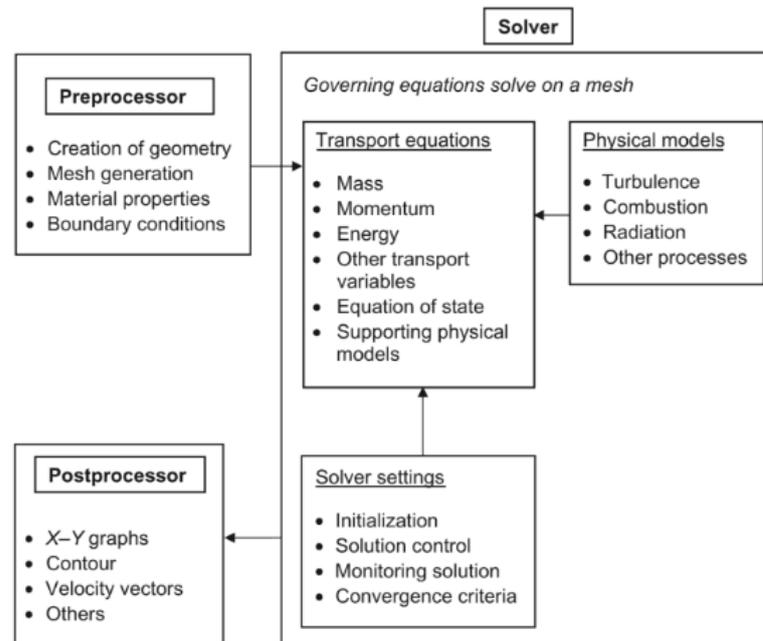
b. Solver

Pada proses *solver*, terdapat dua kondisi yang harus diperhatikan, yakni inialisasi dan *solution control*. Proses inialisasi akan mempengaruhi kecepatan simulasi dalam mencapai konvergen. Semakin dekat nilai inialisasi yang ditetapkan terhadap nilai steady maka semakin cepat proses simulasi yang dilakukan. Pada *solution control* ditentukan tipe interpolasi dan *iterative solvers* yang sesuai. Tipe interpolasi yang umum digunakan pada proses simulasi

adalah *First-Order Upwind*, *Second-Order Upwind*, *Second-Order Central*, dan *Quadratic Upstream Interpolation Convective Kinetics (QUICK)*. Semakin tinggi order yang dipilih maka semakin akurat hasil yang dapat ditunjukkan.

c. *Post Processing*

Pada tahap *post processing*, dilakukan pengolahan hasil simulasi menjadi grafik atau gambar sehingga dapat dilihat dan diamati lebih baik. Pada tahapan ini, bisa didapatkan grafik X-Y, kontur, vektor kecepatan, dan lain-lain. (Tu dkk, 2023)



Gambar 2. 9 Proses Simulasi CFD

2.9 Penelitian Terdahulu

2.9.1 Thermal Management System Using Phase Change Material for Lithium-ion Battery

Penelitian ini merupakan karya dari Grimonio dkk (2021) yang membahas pendinginan pada baterai lithium-ion menggunakan PCM Hexacosane dan Capric acid. Pada penelitian ini, variasi yang dilakukan terdapat pada ketebalan PCM dimuali dari ketebalan 3 mm, 6 mm, sampai dengan 9 mm. Selain itu, pada penelitian ini juga dilakukan variasi pada temperatur lingkungan, yakni 306 K dan 325 K. Variasi tersebut dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh temperatur sekitar (lingkungan) dan ketebalan PCM terhadap temperatur baterai yang diamati. Berikut merupakan data spesifikasi baterai dan PCM yang digunakan.

Tabel 2. 3 Spesifikasi Baterai

Parameter	Infrormasi	Satuan	Satuan
MSMD Battery Model	Cell Capacity	2	Ah
	C-rate	3	C
	Initial DoD	0	%
Battery Material	Density	2604,92	kg/m ³
	Spesific Heat	894	J/kg K
	Thermal Conductivity	1,035	W/m K
Outer Wall (Battery and PCM)	Convection	7	W/m ² K
	Free Stream Temperature	306	K
	Heat Generation Rate	181466,2	W/m ³

Tabel 2. 4 Spesifikasi PCM Capric Acid

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Spesific Heat</i>	475,59	J/kg K
<i>Latent Heat</i>	152,7	kJ/kg K
Konduktivitas Termal (solid)	0,2	W/m K
Konduktivitas Termal (liquid)	0,12	W/m K
<i>Solidus Temperature</i>	302	K
<i>Liquidus Temperature</i>	305	K
<i>Boiling Temperature</i>	542	K
<i>Density (solid)</i>	878	kg/m ³
<i>Density (liquid)</i>	752	kg/m ³

Tabel 2. 5 Spesifikasi PCM Hexacosane

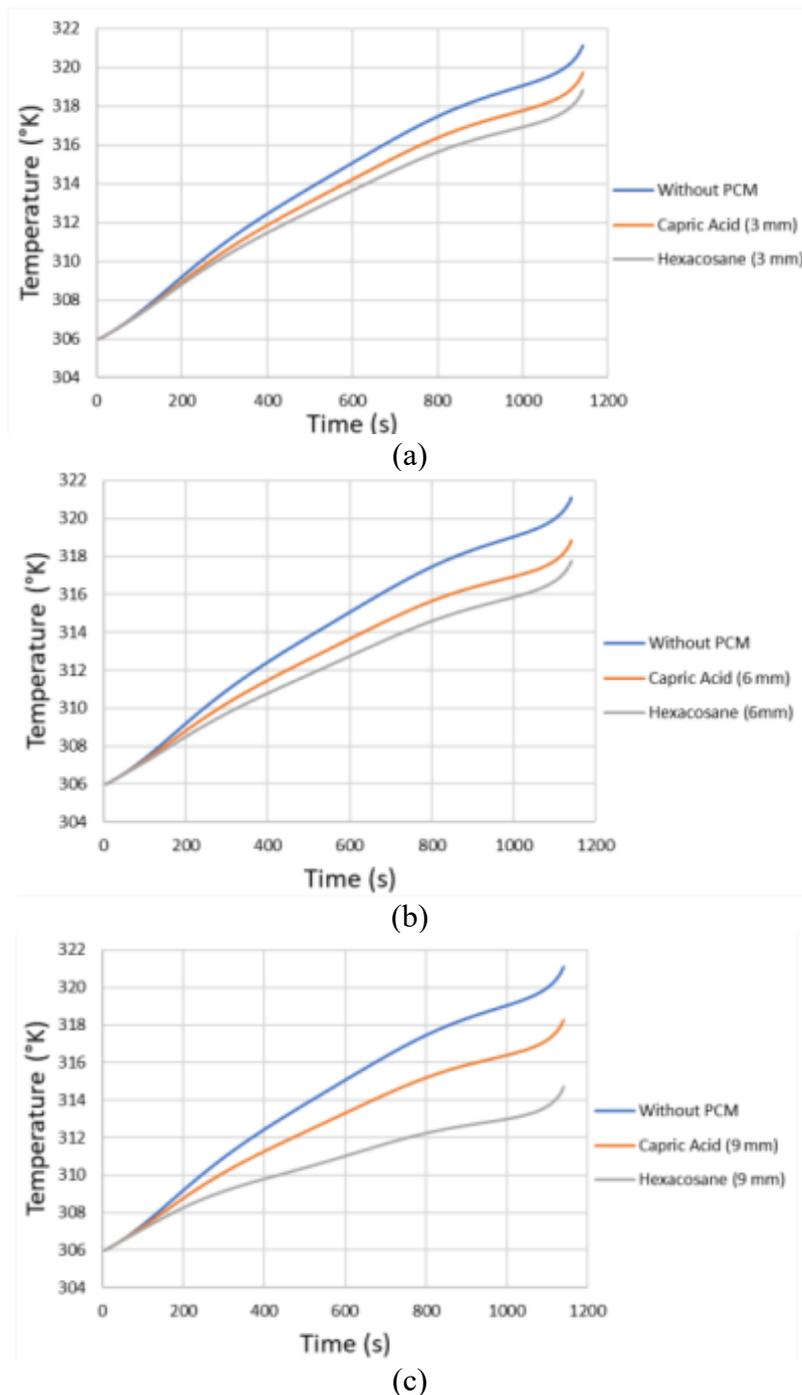
Parameter	Nilai	Satuan
<i>Spesific Heat</i>	1770	J/kg K
<i>Latent Heat</i>	195	kJ/kg K
Konduktivitas Termal (solid)	0,29	W/m K
Konduktivitas Termal (liquid)	0,21	W/m K
<i>Solidus Temperature</i>	327	K
<i>Liquidus Temperature</i>	329	K
<i>Boiling Temperature</i>	685,15	K
<i>Density (solid)</i>	910	kg/m ³
<i>Density (liquid)</i>	822	kg/m ³

Bedasarkan data-data tersebut, dilakukan proses simulasi dengan variasi terhadap ketebalan PCM dan variasi terhadap suhu lingkungan (sekitar). Hasil simulasi dengan variasi suhu lingkungan ditunjukkan oleh tabel 2.6 yang membandingkan antara hasil simulasi pada temperatur lingkungan 306 K dengan 325 K. Berdasarkan tabel tersebut, PCM pada temperatur lingkungan yang lebih tinggi memiliki kemampuan pendinginan yang semakin efektif. Namun, PCM tidak dapat menjaga temperatur baterai pada suhu operasinya, yakni sebesar 325 K atau 50°C.

Tabel 2. 6 Penurunan Temperatur Baterai terhadap Variasi Temperatur Lingkungan

Variation of Ambient Temperatur	Decrement of Battery Temperatur (K)		
	PCM Thickness of 3 mm	PCM Thickness of 6 mm	PCM Thickness of 9 mm
Normal (306 K)	1,39 K	2,26 K	2,84 K
Extreme (325 K)	3,26 K	3,95 K	4,39 K

Pada simulasi dengan variasi PCM, didapatkan kesimpulan bahwa nilai pendinginan PCM Hexacosane memiliki nilai pendinginan yang lebih baik dibandingkan dengan PCM Capric acid. Hal tersebut dikarenakan material Hexacosane yang digunakan memiliki titik leleh, masa jenis, kapasistas panas, dan konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan PCM Capric acid. Semakin tinggi nilai dari sifat-sifat tersebut maka akan semakin banyak panas yang dapat diserap dan disimpan oleh PCM.



Gambar 2. 10 Grafik Pengaruh Ketebalan PCM terhadap Temperatur Baterai (a) Ketebalan PCM 3 mm (b) Ketebalan PCM 6 mm (c) Ketebalan PCM 9 mm

Gambar 2.10 merupakan grafik hubungan ketebalan PCM terhadap temperatur baterai. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwasanya penambahan PCM dengan ketebalan tertentu memberikan efek penurunan temperatur pada baterai. Pada ketebalan PCM 3 mm, PCM Capric acid dapat menurunkan temperatur sampai dengan 1,39 K, sedangkan PCM Hexacosane dapat menurunkan temperatur sampai dengan 2,26 K. Pada ketebalan PCM 6 mm, PCM Capric acid dapat menurunkan temperatur sampai dengan 2,26 K, sedangkan PCM Hexacosane dapat menurunkan temperatur sampai dengan 3,37 K. Pada ketebalan PCM 9 mm, PCM Capric acid dapat menurunkan temperatur sampai dengan 2,84 K, sedangkan PCm Hexacosane dapat

menurunkan temperatur sampai dengan 6,54 K. Berdasarkan hasil percobaan tersebut, dapat dihitung nilai efektivitas pendinginan yang dimiliki oleh PCM. Perhitungan tersebut dilakukan untuk mengetahui ketebalan PCM yang paling efektif untuk digunakan dalam pendinginan.

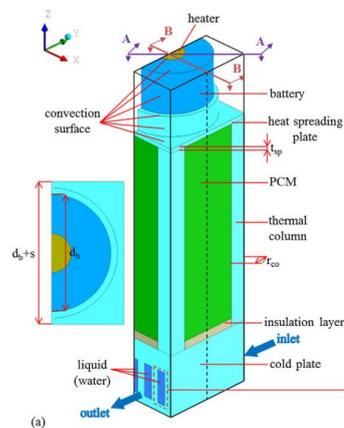
Tabel 2. 7 Efektivitas Pendinginan terhadap Variasi Ketebalan PCM

Variasi Ketebalan PCM	Efektivitas Pendinginan
3 mm	0,15
6 mm	0,22
9 mm	0,43

Tabel 2.7, merupakan tabel yang didapatkan dari hasil tabulasi data simulasi. Pada tabel tersebut terdapat variasi ketebalan PCM beserta dengan efektivitas pendinginan yang diberikan. Dari tabel tersebut, dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin tebal PCM maka akan semakin bagus efek pendinginannya. Peningkatan efektivitas ini dikarenakan semakin tebal PCM maka akan semakin besar masa dan juga volume dari PCM yang digunakan sehingga meningkatkan nilai panas yang dapat diserap oleh PCM.

2.9.2 Thermal Analysis of Conjugated Cooling Configurations Using Phase Change Material and Liquid Cooling Techniques for A Battery Module

Penelitian ini membahas tentang pendinginan baterai menggunakan metode hybrid, antara liquid dan PCM yang dilakukan oleh Song dkk (2019). Penelitian ini, dilakukan dengan melakukan komparasi antara pendinginan menggunakan PCM, cairan, dan *hybrid*. Penelitian ini dilakukan dengan metode analisa numerik dan eksperimen. Adapun alasan penelitian ini dilakukan ialah karena sifat PCM yang tidak dapat menyimpan panas secara baik ketika sudah meleleh secara sempurna, sehingga diperlukan pendinginan tambahan untuk mencegah terjadi *thermal runaway* pada baterai.



Gambar 2. 11 Model Baterai

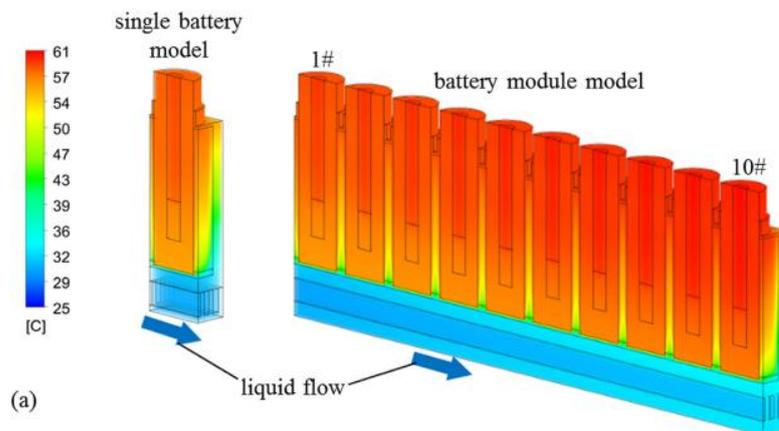
Pada penelitian ini, model baterai yang digunakan merupakan model baterai tiruan yang menyerupai baterai lithium-ion tipe 18650. Model baterai ini dilubangi pada bagian tengah untuk meletakkan heater yang berfungsi untuk mensimulasikan pemanasan pada baterai. Pendinginan pada model baterai ini dilakukan dengan dua media, yakni PCM Paraffin OP44E dan air sebagai cairan pendingin. PCM terletak diantara *spreader plate* dan *cold plate*. *Spreader plate* memiliki ketebalan 1 mm dengan letak 49 mm dari bagian bawah baterai. *Spreader plate* berfungsi untuk meningkatkan perpindahan panas yang terjadi pada baterai. *Cold plate* terletak di bagian bawah baterai dan berfungsi sebagai area mengalirnya cairan pendingin sekaligus

sebagai area pemisah antara cairan dengan baterai untuk mencegah terjadinya arus pendek listrik. Berikut merupakan rangkuman geometri yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2. 8 Rangkuman Data Geometri

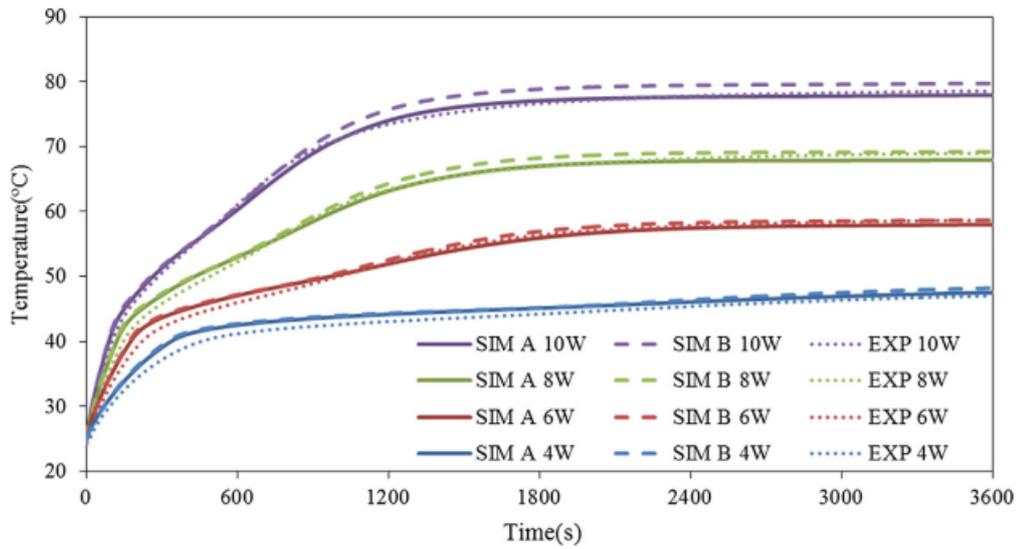
Parameter	Nilai	Satuan
Baterai		
<i>Ketinggian Baterai</i>	69	mm
<i>Dimater Baterai</i>	17	mm
<i>Bagian atas</i>		
<i>Ketinggian Bushing</i>	5	mm
<i>Ketebalan Spreading Plate</i>	1	mm
<i>Bagian bawah</i>		
<i>Lebar channel</i>	2	mm
<i>Ketinggian channel</i>	8	mm
<i>Jarak antar pusat channel</i>	4	mm

Bedasarkan data-data tersebut, dilakukan proses simulasi menggunakan *software* Ansys 17.0. Dalam proses simulasi, dilakukan beberapa kali percobaan dengan *heating power* yang berbeda-beda, mulai dari 4 W, 6 W, 8 W, dan 10 W. Nilai *heating power* tersebut setara dengan nilai *heat generation rates* secara berurutan, yakni $0,2418 \text{ W/cm}^3$; $0,3627 \text{ W/cm}^3$; $0,4837 \text{ W/cm}^3$; dan $0,6046 \text{ W/cm}^3$. Proses simulasi, dilakukan dengan menggunakan *time step* sebesar 3600 sekon yang bertujuan untuk menggambarkan proses kerja baterai yang kontinu.



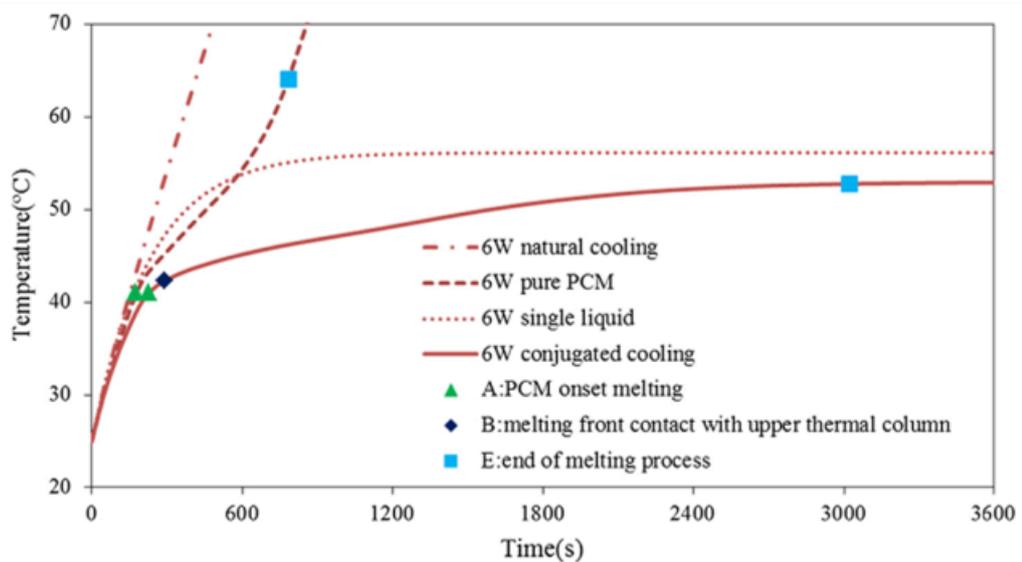
Gambar 2. 12 Distribusi Temperatur pada Heating Power 6 W

Gambar 2.13 menunjukkan hasil simulasi dan eksperimen yang telah dilakukan. Pada hasil simulasi dan eksperimen, terlihat bahwa peningkatan temperatur baterai berbanding lurus dengan peningkatan *heating power* yang diberikan. Nilai temperatur baterai yang dihasilkan dari baterai dan eksperimen tidak terlalu jauh berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa model numerik yang digunakan sudah benar dan sesuai dengan keadaan nyatanya.



Gambar 2.13 Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen pada Heating Power yang Berbeda

Gambar 2.14 menunjukkan hasil simulasi variasi metode pendinginan. Simulasi dilakukan dengan empat metode pendinginan, yaitu pendinginan PCM, pendinginan cairan, pendinginan *hybrid* PCM dan cairan, serta pendinginan dengan *natural convection*. Dari hasil simulasi, terlihat bahwa pendinginan *hybrid* PCM dan cairan menghasilkan temperatur baterai yang paling rendah. Peningkatan temperatur baterai dengan metode *hybrid* juga relatif lebih lambat dibandingkan dengan tiga metode lainnya.



Gambar 2.14 Perbandingan Temperatur Baterai dengan Metode Pendinginan yang Berbeda

2.9.3 Air and PCM Cooling For Battery Thermal Management Considering Battery Cycle Life

Penelitian ini merupakan karya dari Fenfang dkk (2020) yang membahas pengaruh sistem pendinginan terhadap umur hidup baterai. Penelitian ini menggunakan dua metode pendinginan, yakni pendinginan dengan udara dan pendinginan dengan PCM. Kedua pendinginan tersebut diterapkan pada baterai silindris tipe ANR266501A yang merupakan baterai *graphite*-LiFePO₄ buatan A123 System. Pada penelitian ini, dilakukan beberapa

percobaan dengan nilai variabel yang berbeda. Pada penelitian ini, terdapat tiga variabel bebas yang digunakan, yaitu kecepatan udara masuk, temperatur lingkungan, dan *phase change temperatur* (PCT) pada PCM. Berikut merupakan rangkuman data yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2. 9 *Setup* untuk Kasus Pendinginan Udara

Tipe	Pengaturan
Fluid dynamic conditions	Turbulence
Turbulence model	k-epsilon
Inlet velocity [m/s]	0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8
Inlet temperature (°C)	$T_{amb} > 20^{\circ}\text{C}; T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$
	$T_{amb} \leq 20^{\circ}\text{C}; T_{in} = T_{amb}$
Outlet gauge pressure [Pa]	0
Wall of the module	Symmetry
Wall of the cell	Fluid-solid coupling
Ambient temperature [°C]	0, 10, 20, 30, 40, 50

Tabel 2. 10 *Boundary Conditions* pada Kasus Pendinginan dengan PCM

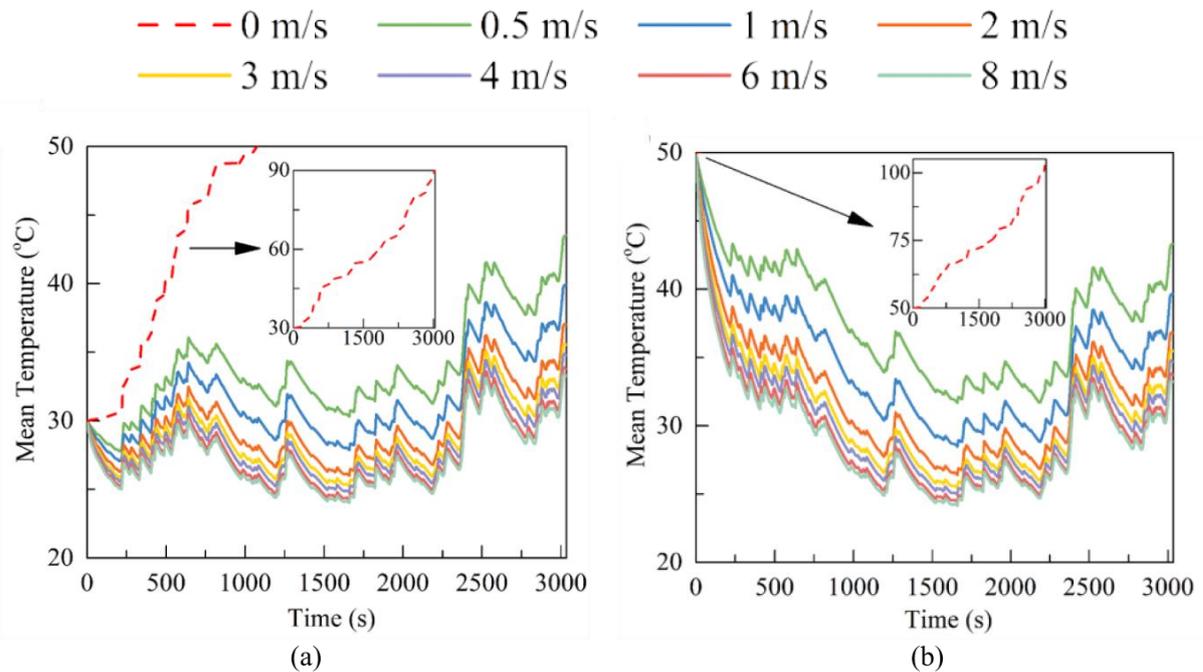
Tipe	Pengaturan
Sides of the module	Symmetry; natural heat transfer
Heat transfer coefficient [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	10
Wall of the cell	Conduction
Ambient temperature [°C]	0, 10, 20, 30, 40, 50

Tabel 2. 11 Sifat *thermo-physical* pada PCM

Tipe	Pengaturan
Latent heat [$J \cdot kg^{-1}$]	181000
Specific heat capacity [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	1980
Thermal conductivity [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	16.6
Density [kg m]	866
Transition interval [°C]	3
Phase change temperature [°C]	35, 40, 45, 50, 55

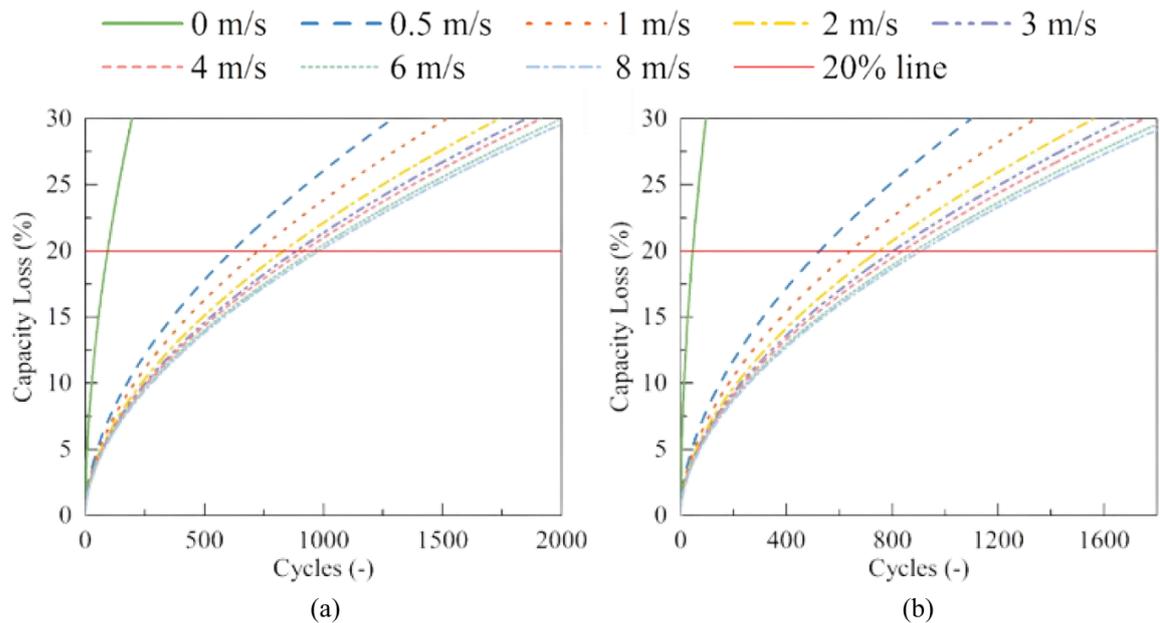
Bedasarkan data-data tersebut, dilakukan simulasi menggunakan *software* CONSOLE. Simulasi ini menggunakan variabel bebas yang sesuai dengan data pada tabel 2.9, tabel 2.10, dan tabel 2.11. Pada simulasi pendinginan menggunakan PCM, bagian sisi samping dari modul didinginkan secara alami dengan nilai koefisien konveksi sebesar $5 \text{ W/m}^2\text{k}$. Proses simulasi dilakukan dengan waktu *time step* 3000 sekon yang menggambarkan jarak tempuh mobil listrik sekitar 16.55 km.

Bedasarkan hasil simulasi yang dilakukan, dapat diketahui bahwa peningkatan kecepatan masuk udara pendinginan memberikan efek penurunan suhu yang berbeda beda. Hal tersebut ditunjukkan oleh gambar 2.15 (a) dan (b). Pada gambar tersebut, terlihat bahwa peningkatan kecepatan masuk udara untuk model ini tidak efektif ketika kecepatan udara melebihi 6 m/s. Hal tersebut dikarenakan biaya yang diperlukan untuk satu siklus baterai semakin meningkat ketika kecepatan masuk udara melebihi 6 m/s. Kenaikan tersebut dapat dilihat pada gambar 2.17 yang menunjukkan hubungan antara kecepatan, dan temperatur lingkungan terhadap biaya sekali siklus.

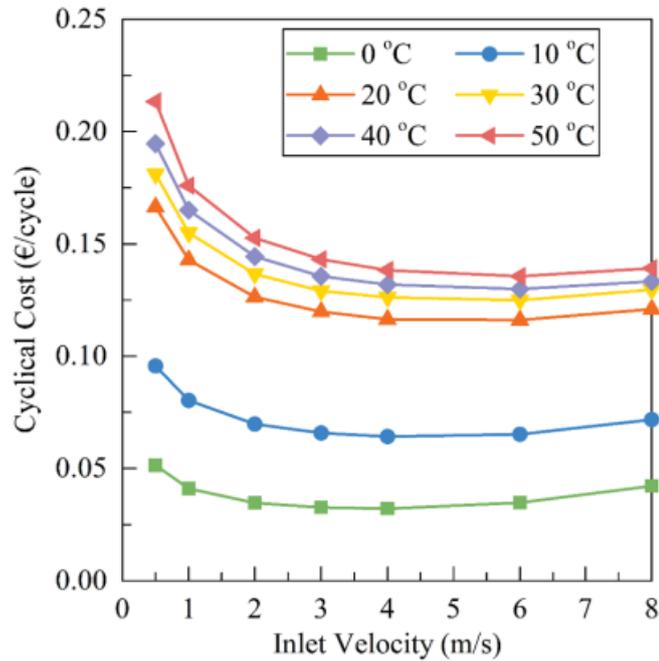


Gambar 2.15 Grafik Temperatur Rata-Rata Selama Satu Siklus dengan Pendinginan Udara (a) Tamb = 30 derajat C (b) Tamb = 50 derajat C.

Bedasarkan hasil simulasi yang dilakukan, diketahui bahwa peningkatan kecepatan masuk udara akan semakin meningkatkan siklus hidup dari baterai. Hal tersebut ditunjukkan oleh gambar 2.16 (a) dan (b). Pada gambar tersebut terlihat bahwa baterai tanpa dialiri udara pendingin memiliki siklus hidup yang sangat rendah apabila dibandingkan dengan baterai yang dialiri udara pendingin. Hal tersebut menunjukkan bahwa pendinginan dengan udara memberikan dampak yang baik terhadap lama siklus hidup baterai.

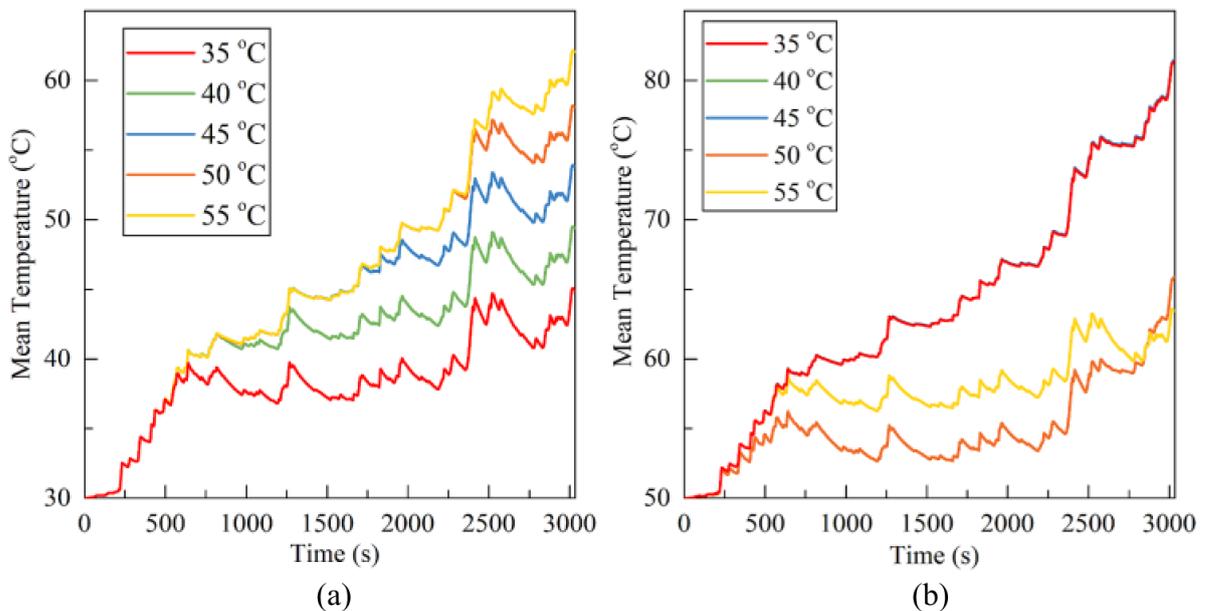


Gambar 2.16 Grafik Capacity Loss (a) Tamb = 30 derajat C (b) Tamb 50 derajat C.

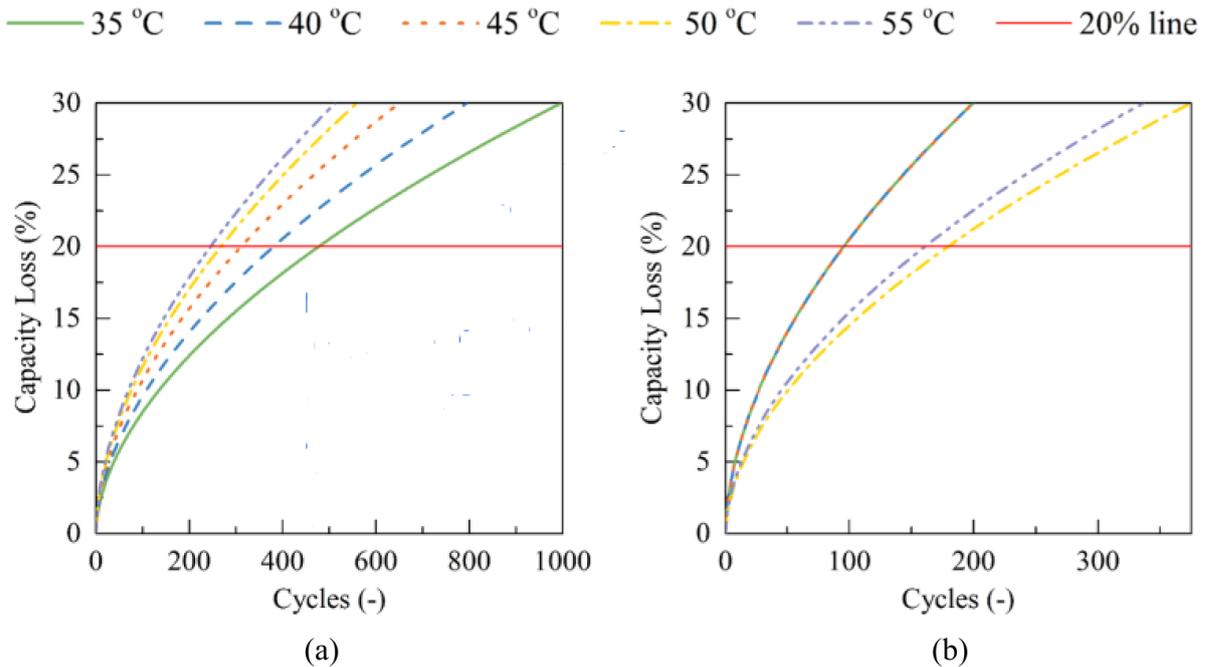


Gambar 2. 17 Biaya Siklus Baterai Menggunakan Pendinginan Udara pada TemperaturLingkungan yang Berbeda

Pendinginan baterai menggunakan PCM menunjukkan hasil temperatur rata-rata pada baterai yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan pendinginan udara. Hal tersebut dapat dilihat dengan membandingkan gambar 2.18 dengan gambar 2.15. Pada gambar 2.18, terlihat bahwa semakin rendah *phase change temperatur* (PCT) yang dimiliki oleh PCM maka rata-rata temperatur baterai yang dimiliki semakin kecil. Temperatur rata-rata baterai yang semakin rendah akan meningkatkan lama siklus yang dimiliki oleh baterai. Hal tersebut ditunjukkan pada gambar 2.19 yang menunjukkan hubungan antara PCT pada PCM terhadap lama siklus hidup yang dimiliki oleh baterai.

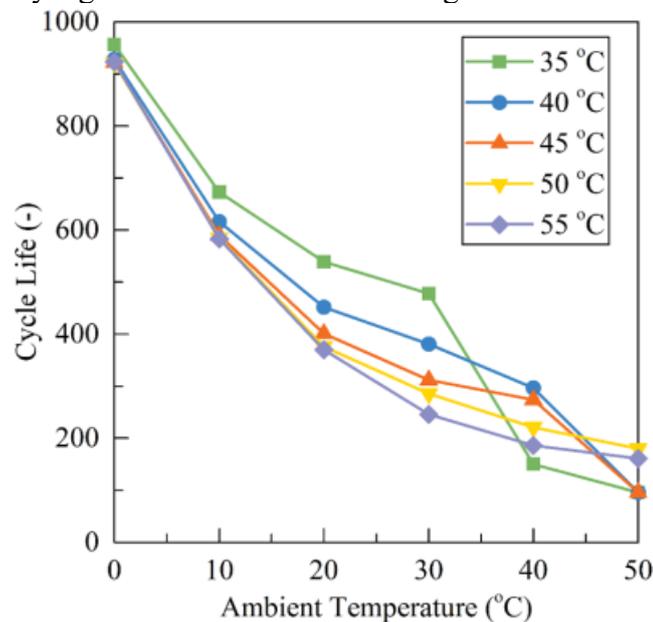


Gambar 2. 18 Grafik Temperatur Rata-Rata pada Satu Siklus dengan Pendinginan PCM (a) Tamb = 30 derajat C (b) Tamb = 50 derajat C.



Gambar 2. 19 Grafik *Capacity Loss* (a) Tamb = 30 derajat C (b) Tamb 50 derajat C.

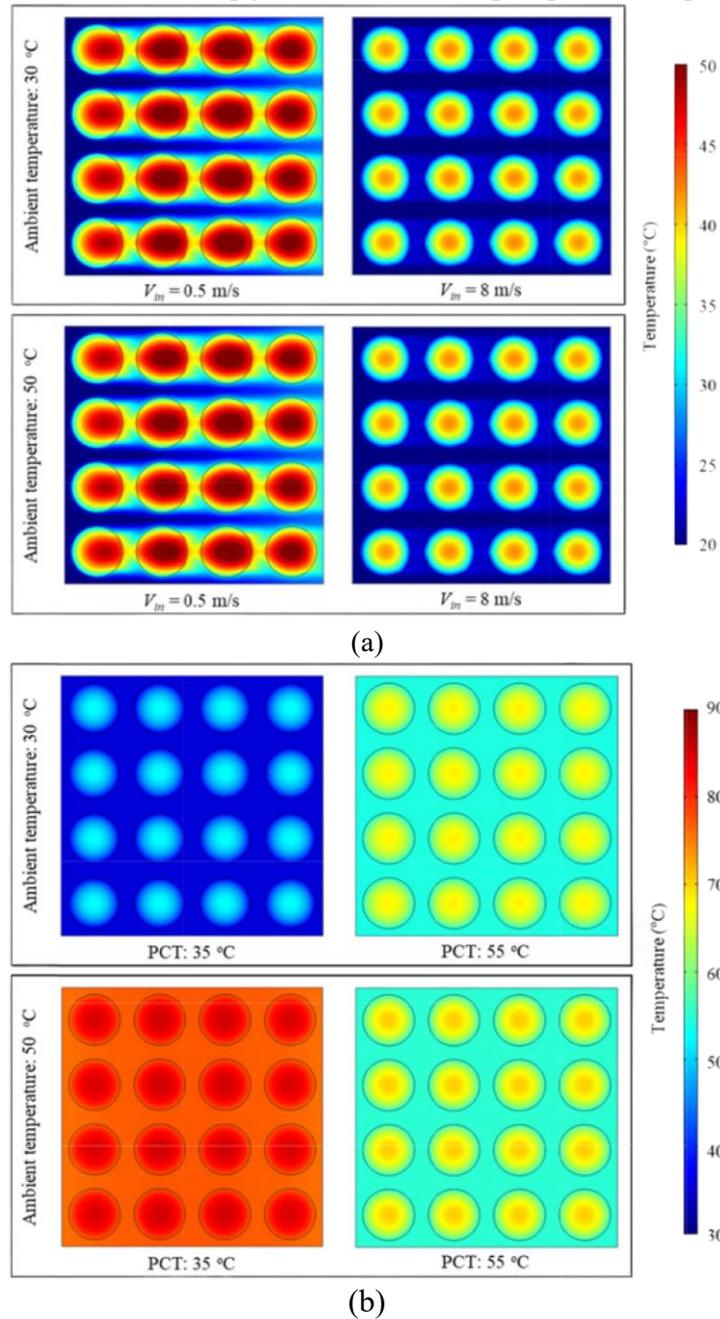
Bedasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat diketahui juga pengaruh temperatur lingkungan terhadap siklus hidup baterai. Hubungan tersebut ditunjukkan oleh gambar 2.19. Pada gambar tersebut, terlihat bahwasanya siklus hidup baterai akan semakin kecil ketika temperatur lingkungan yang dimiliki oleh baterai meningkat.



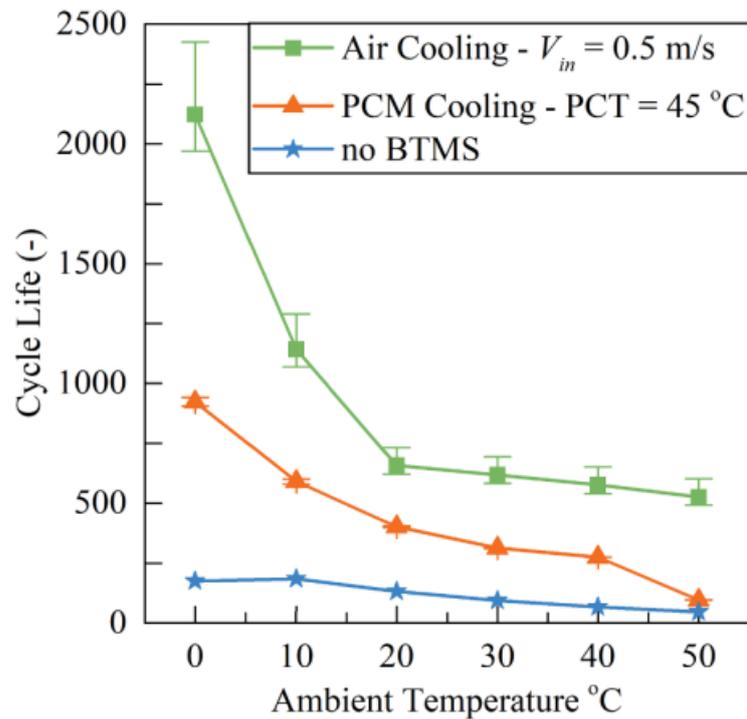
Gambar 2. 20 Hubungan Siklus Baterai Menggunakan Pendinginan PCM terhadap Temperatur Lingkungan.

Bedasarkan hasil simulasi dengan waktu siklus 3000 sekon, diperoleh hasil distribusi temperatur pada dua metode pendinginan, yaitu pendinginan udara dan pendinginann PCM. Pada gambar 2.21 (a) dan (b), terlihat bahwa temperatur baterai pada metode pendinginan udara lebih rendah daripada pendinginan PCM. Namun, distribusi temperatur pada metode pendinginan PCM lebih merata daripada distribusi temperatur pada metode pendinginan udara. Hasil temperatur yang lebih tinggi pada metode pendinginan PCM menyebabkan siklus baterai

pada metode tersebut lebih rendah daripada pendinginan udara. Hubungan antara pendinginan PCM dan pendinginan udara terhadap jumlah siklus hidup dapat dilihat pada gambar 2.22.



Gambar 2. 21 Distribusi Temperatur Berdasarkan Hasil Simulasi pada *Time Size* 3000 sekon
 (a) Pendinginan Menggunakan Udara (b) Pendinginan Menggunakan PCM.



Gambar 2. 22 Perbandingan Siklus Hidup Baterai pada Beberapa Metode Pendinginan

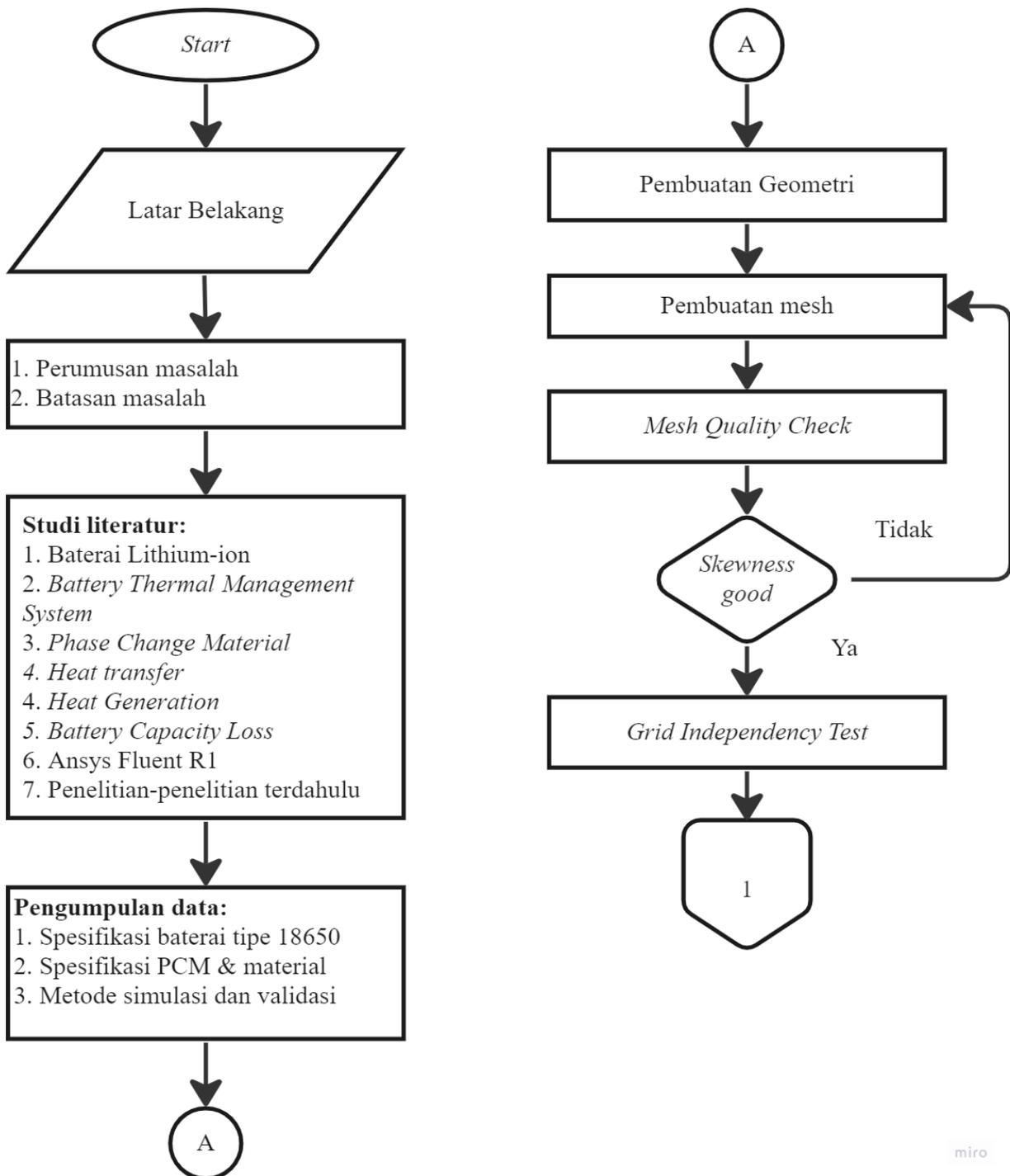
Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwasanya pendinginan memberikan penurunan temperatur yang signifikan pada baterai dan dapat meningkatkan siklus hidup yang dimiliki oleh baterai. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat di rekomendasikan penggunaan pendinginan udara pada baterai dengan performa tinggi yang memiliki temperatur tinggi. Sedangkan, penggunaan PCM direkomendasikan untuk aplikasi yang memerlukan temperatur yang seragam.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

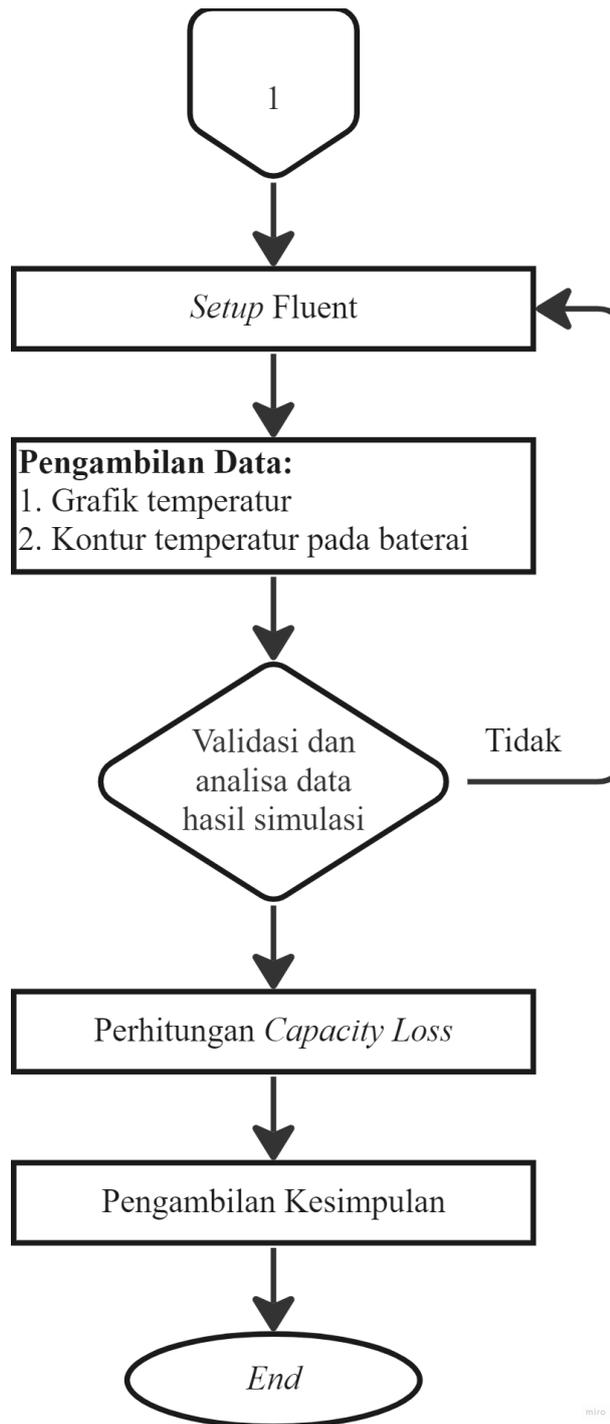
BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan analisa secara numerik dengan dibantu melalui beberapa perhitungan. Pada penelitian terdapat beberapa tahapan penelitian yang dilalui seperti pada Gambar 3.1.



miro



Gambar 3. 1 Diagram Alir Proses Penelitian

3.2 Spesifikasi Baterai Lithium-ion Tipe 18650

Pada penelitian ini baterai yang digunakan merupakan baterai lithium-ion tipe 18650 yang memiliki kapasitas 2,5 Ah. Spesifikasi baterai lithium-ion tipe 18650 yang digunakan pada proses penelitian mengambil referensi dari baterai lithium-ion LG 18650HE4 2500 mAh.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Baterai Lithium-ion Tipe 18650 (Song dkk, 2019)

Parameter	Nilai	Satuan
Kapasitas	2.5	Ah
<i>C-rate</i>	4	C
<i>Density</i>	2510	kg/m ³
<i>Specific Heat</i>	1028	J/kg K
<i>Thermal Conductivity</i>	1,63 (Radial)	W/m K
	36,96 (Axial)	W/m K
<i>Dimensi</i>	18 x 65	mm

3.3 Spesifikasi PCM

Pada penelitian ini PCM yang digunakan merupakan PCM Parafin OP44E. Pada penelitian ini, spesifikasi PCM yang digunakan didapatkan dari hasil penelitian Song dkk (2019) yang membahas terkait penguatan dengan metode *hybrid* pada baterai. PCM Parafin OP44E dipilih dikarenakan memiliki material yang ramah lingkungan dan memiliki nilai *latent heat* yang tinggi.

Tabel 3. 2 Spesifikasi PCM Parafin OP44E (Song dkk, 2019)

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Specific Heat</i>	2000	J/kg K
<i>Latent Heat</i>	255000	kJ/kg K
Konduktivitas Termal	0.13	W/m K
<i>Solidus Temperature</i>	314	K
<i>Liquidus Temperature</i>	317	K
<i>Density</i>	880	kg/m ³
<i>Viscosity</i>	0.01	kg/m s

3.4 Spesifikasi Material Penyusun Model

Spesifikasi material yang digunakan dalam penyusunan model pada penelitian ini dicantumkan pada tabel 3.3. Pada penelitian ini, selain bagian *insulation* dan *heater* menggunakan aluminium. Aluminium dipilih untuk mendapatkan geometri yang ringan dan kuat. Berikut merupakan data spesifikasi material penyusun model.

Tabel 3. 3 Spesifikasi Material Penyusun Model (Song dkk, 2019)

Parameter	<i>Density</i>	<i>Specific heat</i>	Thermal conductivity
Water	998.2	4182	0.6
Aluminium	2719	871	155
Heater (Core)	7930	500	16
Insulation	1000	1200	0.19

3.5 Heat Generation pada Baterai

Pada penelitian ini, akan menggunakan model baterai lithium ion tipe 18650 dengan nilai *heating power* sebesar 3,57 W. Nilai *heating power* tersebut merupakan nilai yang berasal dari hasil penelitian Wu dkk (2020) pada baterai lithium ion di keadaan DOD (*Depth of Discharge*) 100%. Berdasarkan nilai *heating power* tersebut, didapatkan nilai *heat generation* untuk baterai dengan dimensi 18 mm × 65 mm adalah senilai 215332,255 W/m³

3.6 Simulasi Distribusi Temperatur pada Baterai

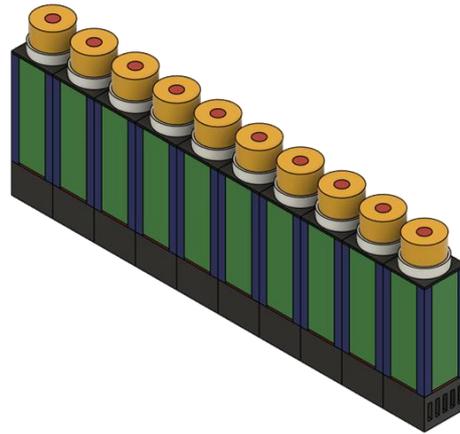
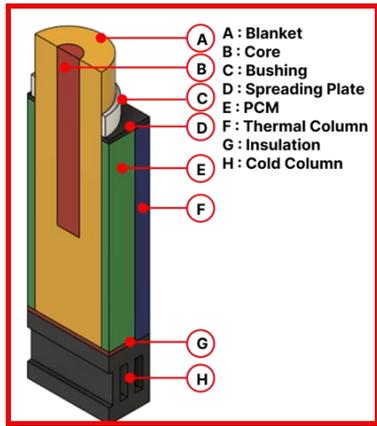
Pada proses simulasi terdapat beberapa tahapan yang dilalui, yakni pembuatan geometri model, *meshing*, *setup*, dan *post-processing*. Pada tahapan-tahapan tersebut akan dimasukkan data-data spesifikasi baterai dan PCM yang digunakan, sehingga hasil simulasi yang dihasilkan akan akurat dan mendekati keadaan nyatanya. Pada penelitian ini, proses simulasi akan menggunakan *software* Ansys Fluent R1 2023 dan *software* Solidwork untuk proses desain geometri.

3.6.1 Geometri

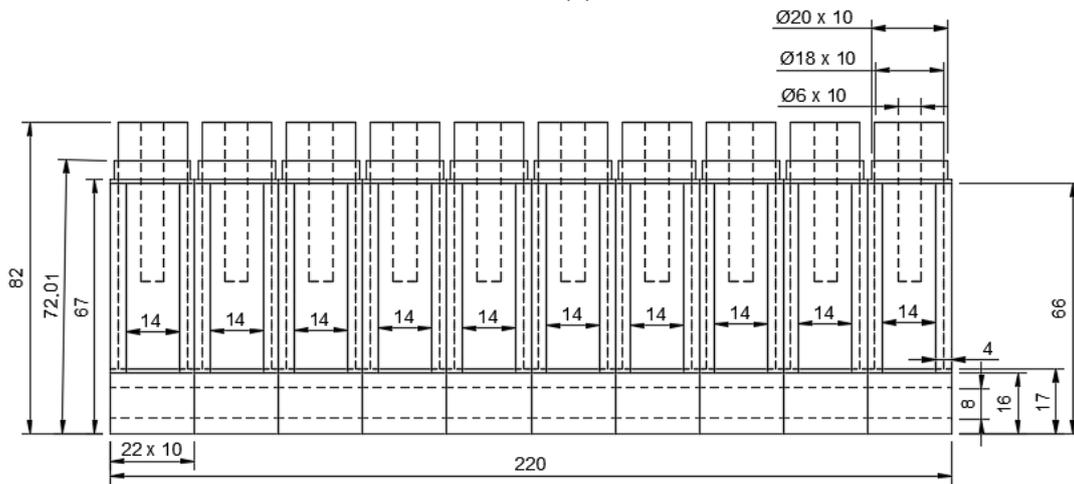
Proses pembuatan model geometri dilakukan dengan menggunakan *software* Solidworks. Model geometri yang digunakan pada penelitian ini mengambil referensi dari model geometri yang dibuat oleh Song dkk (2019). Pemilihan geometri Song dkk (2019) sebagai referensi dikarenakan bentuk desain yang sederhana dan dapat menunjukkan pengaruh perubahan area dan kecepatan terhadap temperatur baterai secara jelas. Pada penelitian ini, model geometri dari Song dkk (2019) diberikan modifikasi berupa dimensi *cold column*-nya. Dimensi *cold column* yang digunakan mengikuti variasi yang digunakan pada penelitian ini. Pada penelitian ini, desain model baterai yang digunakan mengacu pada data pasaran baterai lithium-ion tipe 18650, dengan diameter baterai sebesar 18 mm dan ketinggian baterai 65 mm. Adapun pada penelitian ini terdapat empat geometri yang dibuat, yakni geometri untuk pendinginan dengan metode *hybrid* yang memiliki tiga variasi dan geometri untuk metode pendinginan hanya PCM.

Tabel 3. 4 Data Geometri Model Baterai 1 X 10 (Song dkk, 2019)

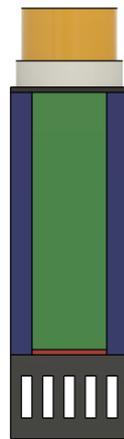
Parameter	Nilai	Satuan
Ketinggian Baterai	65	mm
Dimater Baterai	18	mm
Jarak antar Pusat Baterai	22	mm
Ketinggian <i>Bushing</i>	5	mm
Ketebalan <i>Spreading Plate</i>	1	mm
Lebar <i>Channel</i>	2	mm
Ketinggian <i>Channel</i>	8	mm
Jarak antar Pusat <i>Channel</i>	4	mm



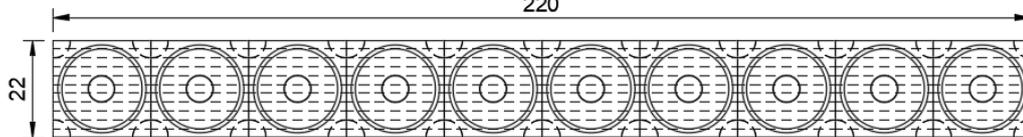
(a)



(b)

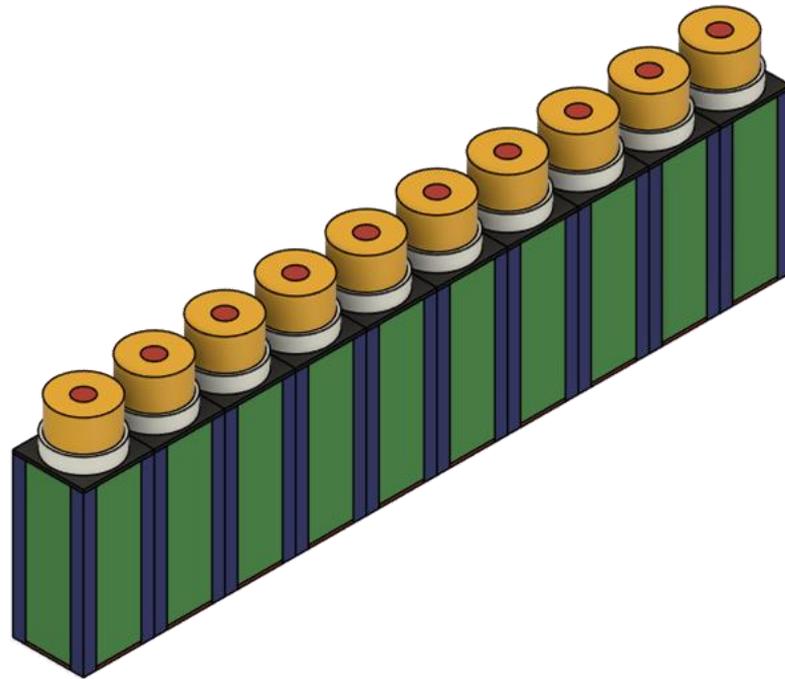


(c)
220

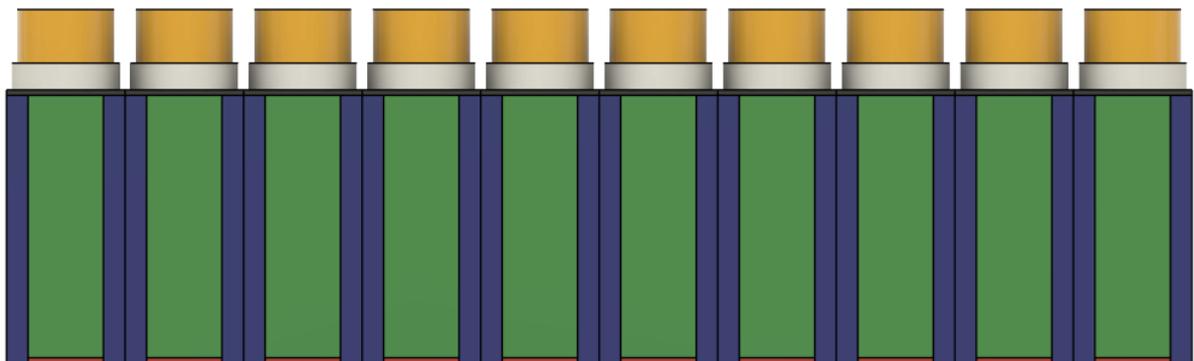


(d)

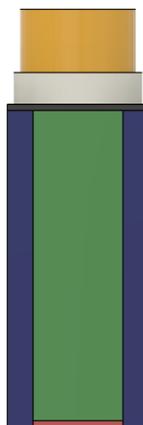
Gambar 3. 2 Geometri Baterai Pack untuk Pendinginan Hybrid (a) *Isometric view* (b) *Side view* (c) *Front view* (d) *Top view*



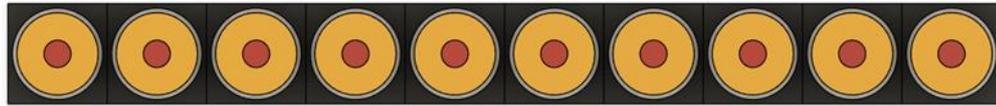
(a)



(b)



(c)

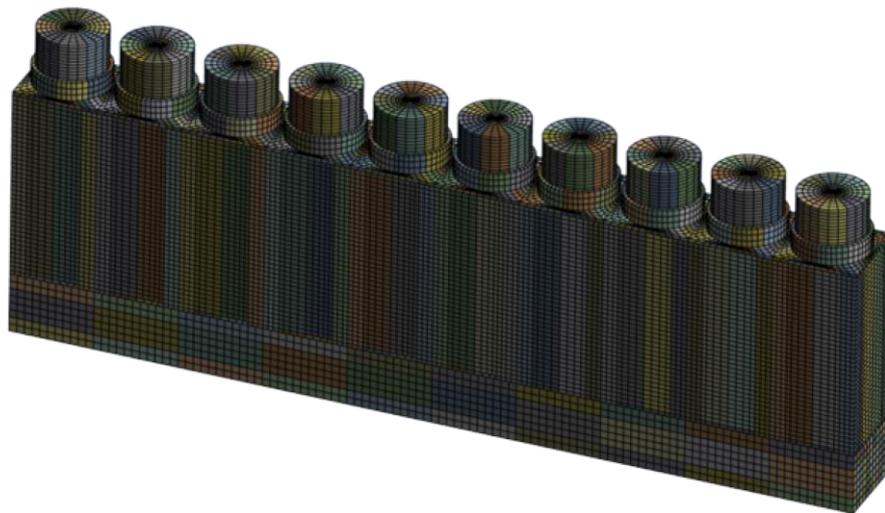


(d)

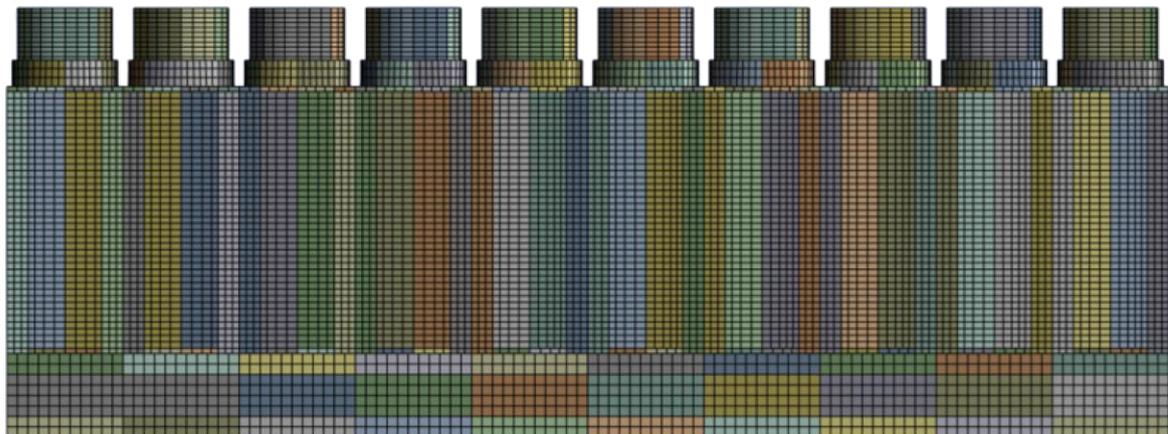
Gambar 3. 3 Geometri Baterai *Pack* untuk Pendinginan PCM (a) *Isometric view* (b) *Side view* (c) *Front view* (d) *Top view*

3.6.2 Meshing

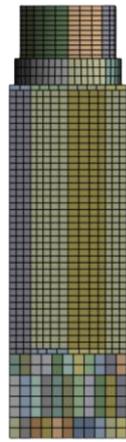
Proses *meshing* dilakukan menggunakan aplikasi Ansys R1 2023. Sebelum proses *meshing* dilakukan, geometri baterai dibagi menjadi beberapa bagian. Pembagian bagian geometri dilakukan menggunakan *software* Space Claim yang merupakan *software* bawaan dari Ansys Workbench. Tujuan dari pembagian geometri menjadi beberapa bagian adalah untuk menghasilkan *meshing* yang baik sehingga hasil simulasi yang dilakukan juga menjadi lebih akurat. Pada penelitian ini, *meshing* menggunakan metode *multizone*. Pada metode ini, *meshing* akan dipaksa untuk membentuk bentuk *hexahedral* sehingga memberikan hasil yang lebih rapi, tergantung dari cara *meshing*. Pada sub bab ini, hasil *meshing* yang ditampilkan hanya untuk pendinginan PCM dan satu pendinginan *hybrid*. Pendinginan *hybrid* hanya menampilkan satu hasil dikarenakan hasil *meshing* dari setiap variasi desain relatif sama karena di desain dan dibagi dengan metode yang sama.



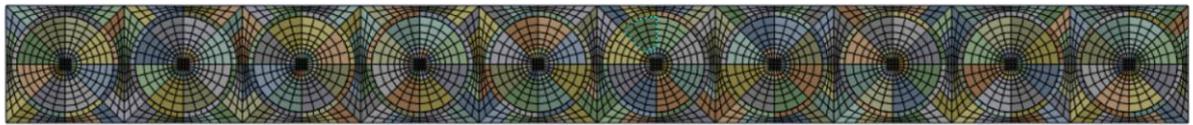
(a)



(b)



(c)



(d)

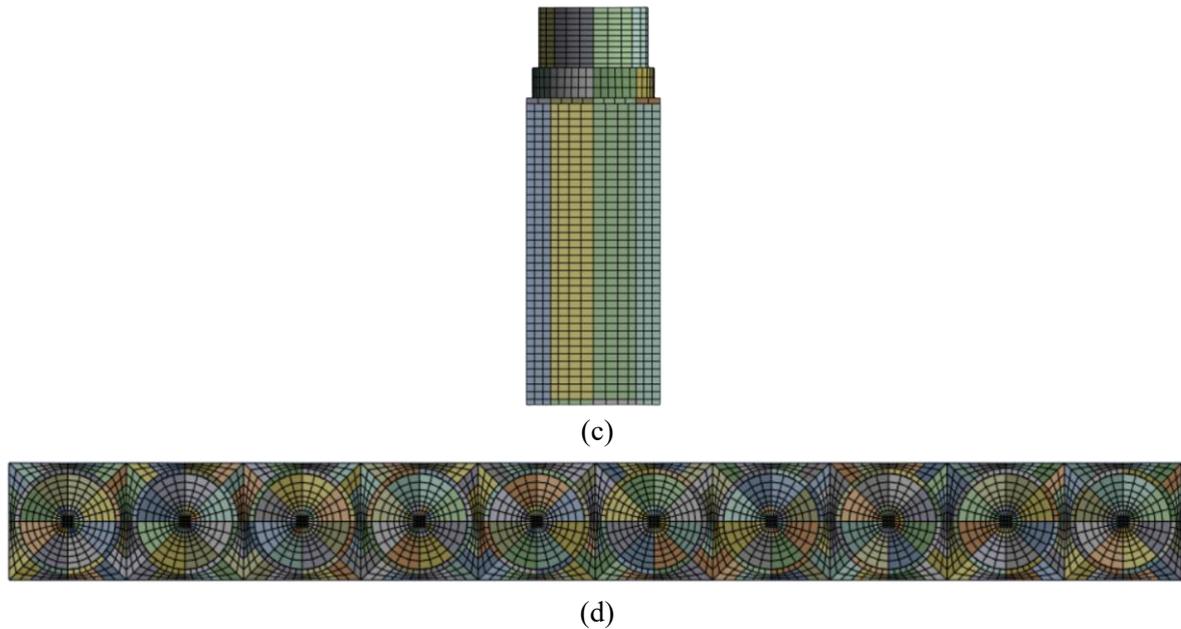
Gambar 3. 4 *Meshing Battery Pack untuk Pendinginan Hybrid (a) Isometric view (b) Side View (c) Front view (d) Top view*



(a)



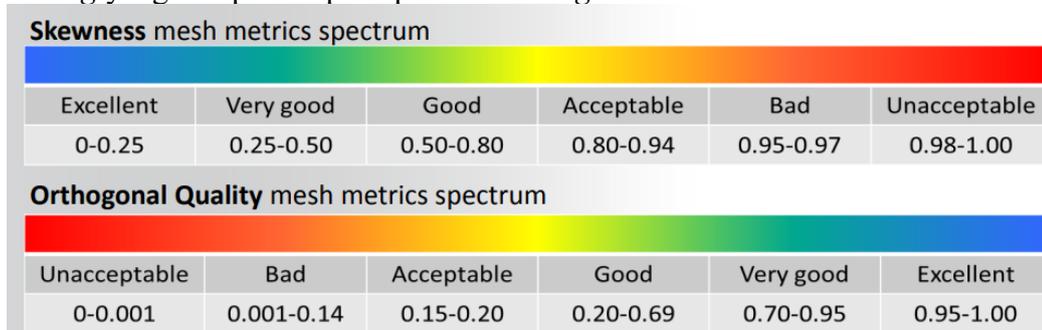
(b)



Gambar 3. 5 Meshing Battery Pack untuk Pendinginan PCM (a) Isometric view (b) Side View (c) Front view (d) Top view

3.6.3 Meshing Quality Check

Setelah proses *meshing* dilakukan maka dilakukan pengecekan hasil *meshing* yang telah dilakukan. Hasil *meshing* akan di nilai dengan menggunakan dua parameter, yakni *skewness* dan *orthogonal quality*. Pada *skewness*, nilai *meshing* akan dikategorikan bagus apabila nilai yang didapatkan mendekati nol, sedangkan pada *orthogonal quality*, nilai *meshing* dikategorikan bagus apabila nilai yang didapatkan mendekati nilai satu. Berikut merupakan hasil *meshing* yang didapatkan pada proses *meshing*.



Gambar 3. 6 Meshing Quality Parameter

Dari hasil *meshing* beberapa geometri yang terdapat pada sub-bab 3.6.2, diperoleh nilai dari parameter kemiringan (*skewness*) dan *orthogonal quality* yang dapat dilihat pada tabel 3.5. Berdasarkan data tabel tersebut, nilai maksimum *skewness* dan minimum *orthogonal quality* yang diperoleh termasuk dalam kategori *acceptable* untuk *skewness* dan *good* untuk *orthogonal quality*, sehingga *meshing* yang dilakukan sudah memenuhi ketentuan minimum yang disarankan oleh Ansys.

Tabel 3. 5 Parameter Hasil Meshing

VARIASI	Max. Skewness	Min. Orthogonal Quality
PCM	0,8419	0,43823
HYBRID		
DESAIN	Max. Skewness	Min. Orthogonal Quality
1	0,87706	0,35491

VARIASI	Max. Skewness	Min. Orthogonal Quality
2	0,84185	0,43836
3	0,84177	0,43502

3.6.4 Setup Fluent

Setup merupakan proses memasukan batasan dan nilai-nilai yang akan disimulasikan pada *software*. Berikut merupakan *setup* yang digunakan pada proses simulasi di penelitian ini.

a. Solver

Tipe *solver* yang digunakan pada proses simulasi di penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 6 Setup Solver pada Fluent

Pengaturan	Kondisi
Type	Pressure Based
Velocity Formulation	Absolute
Time	Transient

b. Model

Model *setup* yang digunakan pada penelitian ini berfokus pada proses pendinginan baterai menggunakan metode *hybrid*. Model yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

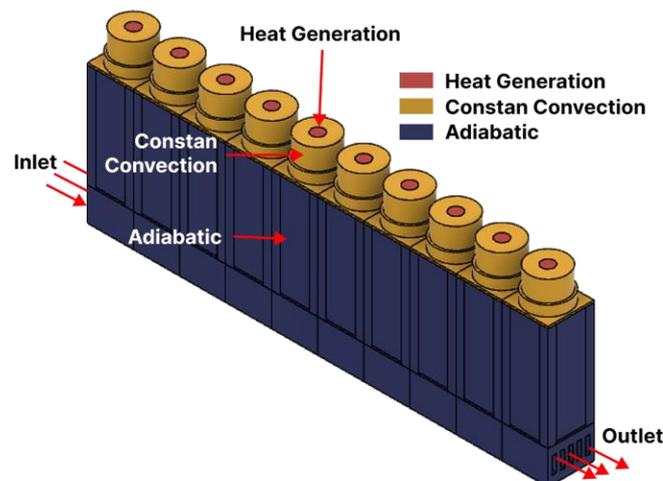
Tabel 3. 7 Setup Model pada Fluent

Pengaturan	Kondisi
Energy	On
Viscous	Laminar, k-omega
Solidification & Melting	On
Mushy Zone Parameter	100000

Pada model geometri dengan pendinginan PCM, pengaturan *viscosity* diasumsikan sebagai laimanan untuk aliran dengan $Re < 2300$ dan k-epsilon untuk $Re > 2300$.

c. Boundary Condition

Pada simulasi ini terdapat beberapa *boundary condition* yang harus diterapkan. *Boundary condition* tersebut dapat dilihat pada tabel 3.8 dengan penempatannya ditunjukkan oleh gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Boundary Condition pada Model Baterai

Pada tabel 3.9, terdapat *boundary condition* pada beberapa bagian baterai yang tidak dituliskan. Semua bagian-bagian tersebut dikondisikan sebagai *wall*. Pada model geometri dengan pendinginan PCM, pengaturan yang diaktifkan hanya konveksi natural pada bagian atas baterai.

Tabel 3. 8 *Setup Boundary Condition* pada *Fluent*

Pengaturan	Kondisi	Nilai
Inlet	Velocity Inlet	T = 298 K
		V = Sesuai variasi
Outlet	Outflow	
Wall	Symetry	
Top Side of Battery	Constant Convection	h = 5 W/m.K
		T = 298 K

d. Solution Methods

Pada proses simulasi ini digunakan *solution methods second order*. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi iterasi yang dihasilkan walaupun beban yang diperlukan lebih besar dibandingkan dengan *first order*. Berikut merupakan rangkuman *setup solution methods* yang digunakan pada proses simulasi ini.

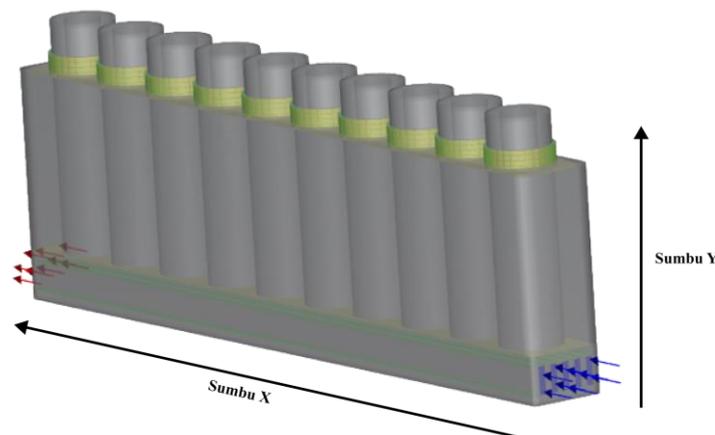
Tabel 3. 9 *Setup Solution Methods* pada *Fluent*

Pengaturan	Kondisi
Pressure-Velocity Coupling	
Scheme	Coupled
Spatial Discretization	
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Energy	Second Order Upwind

e. Initialization dan Run Calculation

Setup untuk *initialization* dan *run calculation* pada simulasi ini ditunjukkan oleh tabel 3.11. Pada model pendinginan baterai dengan metode PCM, *initial values* untuk kecepatan dikondisikan nol.

Gambar 3. 8 Arah Aliran Terhadap Sumbu



Tabel 3. 10 *Setup Initialization dan Run Calculation* pada *Fluent*

Pengaturan	Kondisi
Initialization Methods	Standard Initialization
Initial Values	
X Velocity	0,15 m/s
Temperature	298 K
Run Calculation	
Number of Time Steps	900
Time Step Size	1 s
Max Iterations/ Time Step	20

3.6.5 Grid Independency Test

Proses *Grid Independency Test* (GIT) merupakan proses untuk mencari nilai kondisi *grid* yang optimal. *Grid* atau *mesh* yang optimal adalah *grid* yang memberikan hasil simulasi yang stabil ketika kondisi *grid* dirubah. Nilai yang stabil pada kondisi *grid* yang berbeda-beda akan menunjukkan bahwa hasil simulasi yang dilakukan tidak dipengaruhi oleh jumlah mesh sehingga dapat menghindari hasil simulasi yang buruk akibat buruknya kondisi *grid*. Berikut merupakan hasil GIT yang penulis dapatkan pada setiap desain.



Gambar 3. 9 Grafik Hasil *Grid Independency Test*

Bedasarkan gambar 3.9 nilai persentase deviasi yang terjadi pada saat perubahan kondisi *grid* sangat rendah dibawah 0,16%. Hal tersebut menunjukkan bahwa kestabilan *grid* yang dimiliki sudah sangat stabil sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa hasil simulasi yang dilakukan tidak akan dipengaruhi oleh kondisi *grid*. Adapun untuk nilai persentase deviasi pada setiap desain dirangkum pada tabel 3.11.

Tabel 3. 11 Hasil *Grid Independency Test*

DESAIN	Nodes	Elements	Temperature (deg C)	Nilai Deviasi
1	2.021.341	1.523.145	44,13	0,00%
	1.000.781	884.040	44,08	0,11%
	591.719	506.719	44,2	-0,16%
	294.246	250.023	44,16	-0,07%

DESAIN	Nodes	Elements	Temperature (deg C)	Nilai Deviasi
2	1.542.345	1.408.793	44,46	0,00%
	1.064.311	937.680	44,43	0,07%
	554.234	506.719	44,53	-0,16%
	371.282	323.464	44,5	-0,09%
3	2.061.231	1.589.340	46,3	0,00%
	1.082.349	933.790	46,31	-0,02%
	602.314	542.312	46,24	0,13%
	308.234	270.324	46,25	0,11%
PCM Only	1.898.234	1.342.865	90,21	0,00%
	816.947	707.400	90,26	-0,06%
	505.151	429.279	90,17	0,04%
	295.950	253.840	90,22	-0,01%

3.6.6 Post processing

Post processing merupakan tahapan setelah simulasi yang bertujuan untuk menganalisa dan mengambil data-data yang diperlukan. Pada tahap ini akan diambil data berupa kontur temperatur baterai. Selain itu, akan dilakukan pengambilan data temperatur maksimum yang akan digunakan pada proses perhitungan *battery capacity loss*.

3.7 Validasi Simulasi

Proses validasi pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kebenaran dari *setup* yang digunakan. Pada penelitian ini, proses validasi untuk pendinginan dengan metode *hybrid* dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen baterai *hybrid* yang dilakukan oleh Song dkk (2019). Proses validasi akan menggunakan data dari gambar 3.10 untuk pembebanan baterai sebesar 6 Watt.

Pada proses validasi, baterai yang digunakan pada simulasi dan eksperimen akan menggunakan baterai dengan spesifikasi yang sama dan disimulasikan pada temperatur lingkungan 25 derajat celsius.

Tabel 3. 12 Data Spesifikasi Baterai pada Proses Validasi

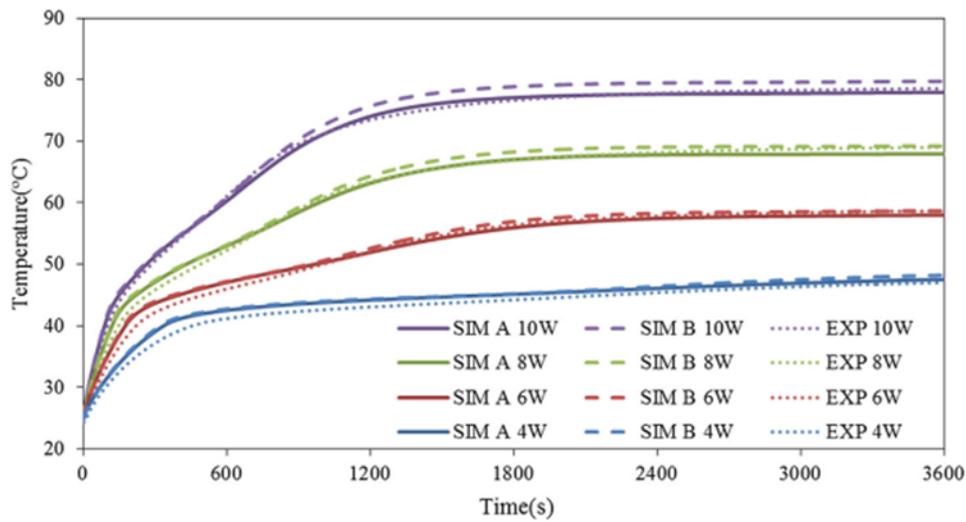
Parameter	Nilai	Satuan
Kapasitas	2.5	Ah
<i>Density</i>	2510	kg/m ³
<i>Specific Heat</i>	1028	J/kg K
<i>Dimensi</i>	18 x 65	Mm
C-rate	4	C

Tabel 3. 13 Data Spesifikasi Material

Parameter	<i>Density</i>	<i>Specific heat</i>	Thermal conductivity
Water	998.2	4182	0.6
Alumminum	2719	871	155
Heater	7930	500	16
Insulation	1000	1200	0.19

Tabel 3. 14 Data Spesifikasi PCM Paraffin OP44E

Parameter	Nilai	Satuan
<i>Specific Heat</i>	2000	J/kg K
<i>Latent Heat</i>	255000	kJ/kg K
Konduktivitas Termal	0.13	W/m K
<i>Solidus Temperature</i>	314	K
<i>Liquidus Temperature</i>	317	K
<i>Density</i>	880	kg/m ³
<i>Viscosity</i>	0.01	kg/m s



Gambar 3. 10 Grafik Validasi untuk Metode Pendinginan *Hybrid* (Song dkk, 2019)

3.8 Variasi pada Penelitian

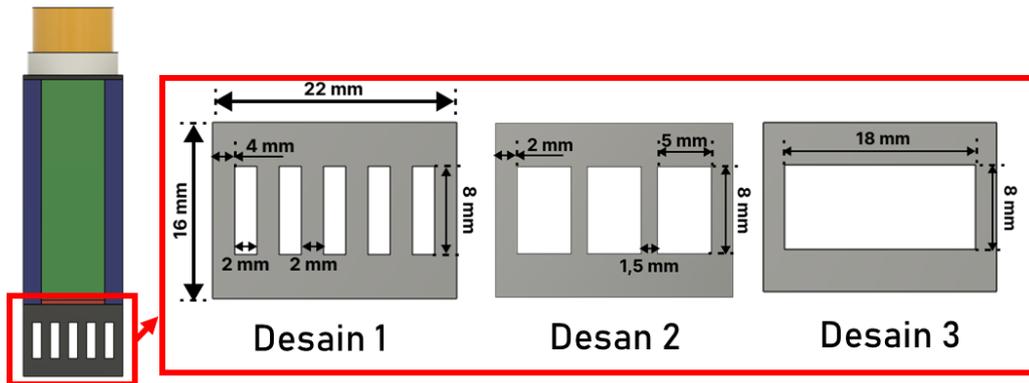
Pada penelitian ini dilakukan beberapa percobaan untuk melihat bagaimana pengaruh dari penambahan fluida pada pendinginan PCM dan juga untuk melihat bagaimana pengaruh kecepatan aliran dan bentuk *cold column* terhadap temperatur baterai. Pada penelitian ini, terdapat dua variasi metode pendinginan, yakni hanya dengan PCM dan dengan metode *hybrid*. Pada metode *hybrid* terdapat tiga variasi desain *cold column* dan tiga variasi kecepatan aliran pada masing-masing desain. Adapun kecepatan aliran yang digunakan, yakni 0,5 m/s; 0,15 m/s; dan 0,05 m/s.

Tabel 3. 15 Variasi Penelitian

Metode Pendinginan	<i>Cold Column</i>	Kecepatan (m/s)		
Hanya PCM				
Hybrid	Desain 1	0,5	0,15	0,05
	Desain 2	0,5	0,15	0,05
	Desain 3	0,5	0,15	0,05

Pada penelitian ini, desain *cold column* memiliki perbedaan di bagian jumlah *channel* yang ada. *Channel* pada *cold column* merupakan tempat mengalirnya aliran. Bentuk desain dari *cold column* pada setiap variasi dapat dilihat pada gambar 3.11.

Gambar 3. 11 Variasi Desain Cold Column

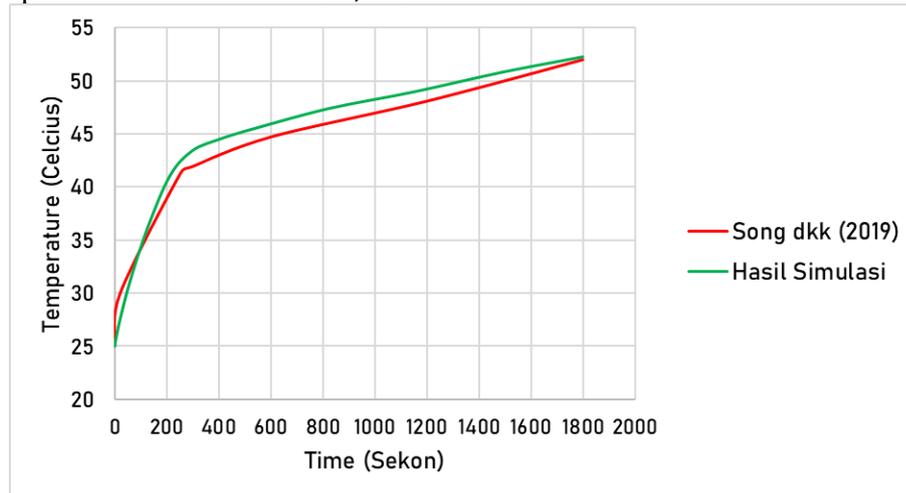


(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Simulasi

Hasil simulasi yang dilakukan di validasi dengan cara membandingkan *trendline* temperatur rata-rata baterai hasil simulasi dengan hasil penelitian dari Song dkk (2019). Simulasi yang dilakukan mengikuti nilai-nilai yang terdapat pada sub bab 3.7 dengan pembebanan 6W. Penelitian Song dkk (2019) pada pembebanan baterai 6 W memiliki nilai rata-rata temperatur baterai sebesar 52°C sedangkan hasil simulasi yang dilakukan memiliki nilai rata-rata temperatur baterai sebesar 52,3°C.



Gambar 4. 1 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Song dkk (2019)

Bedasarkan perbandingan yang dilakukan, nilai temperatur hasil simulasi dengan hasil dari Song dkk (2019) memiliki perbedaan sebesar 0,3 derajat dengan nilai deviasi sekitar 0,09%. Selain nilai deviasi yang rendah, tren temperatur yang terjadi pada baterai juga memiliki bentuk yang sama. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwasanya pengaturan simulasi yang dilakukan sudah valid.

Tabel 4. 1 Rangkuman Hasil Simulasi dan Hasil Song dkk (2019)

Song dkk (2019)	Hasil Simulasi	Nilai Deviasi
52 °C	52,3 °C	0,09%

4.2 Analisa Pengaruh Penambahan Fluida Terhadap Pendinginan PCM

4.2.1 Analisa Kontur Temperatur Baterai dan Liquid Fraction PCM pada Sistem Pendinginan Hanya PCM dan Sistem Pendinginan Hybrid

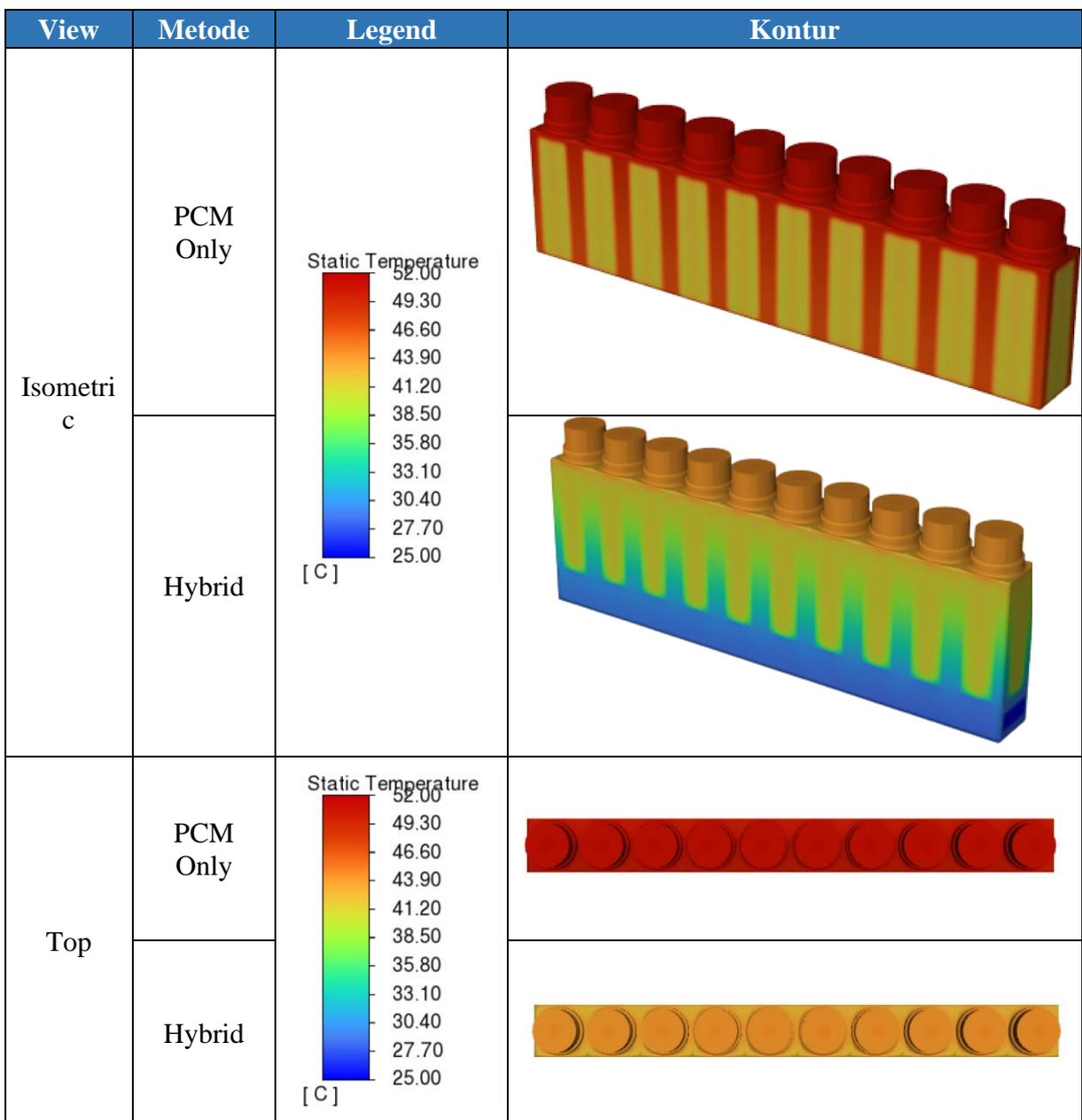
Bedasarkan gambar 4.2 yang telah dilakukan, baterai dengan sistem pendinginan hanya PCM dan *hybrid* memiliki kontur temperatur yang sangat berbeda. Pada gambar 4.2 terlihat bahwa pendinginan dengan PCM memiliki kontur yang lebih berwarna merah dibandingkan dengan pendinginan *hybrid*. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada pendinginan hanya PCM memiliki temperatur baterai yang lebih tinggi dibandingkan dengan pendinginan *hybrid*. Hal tersebut juga menunjukkan bahwasanya penambahan air pada pendinginan PCM akan menurunkan temperatur baterai secara signifikan.

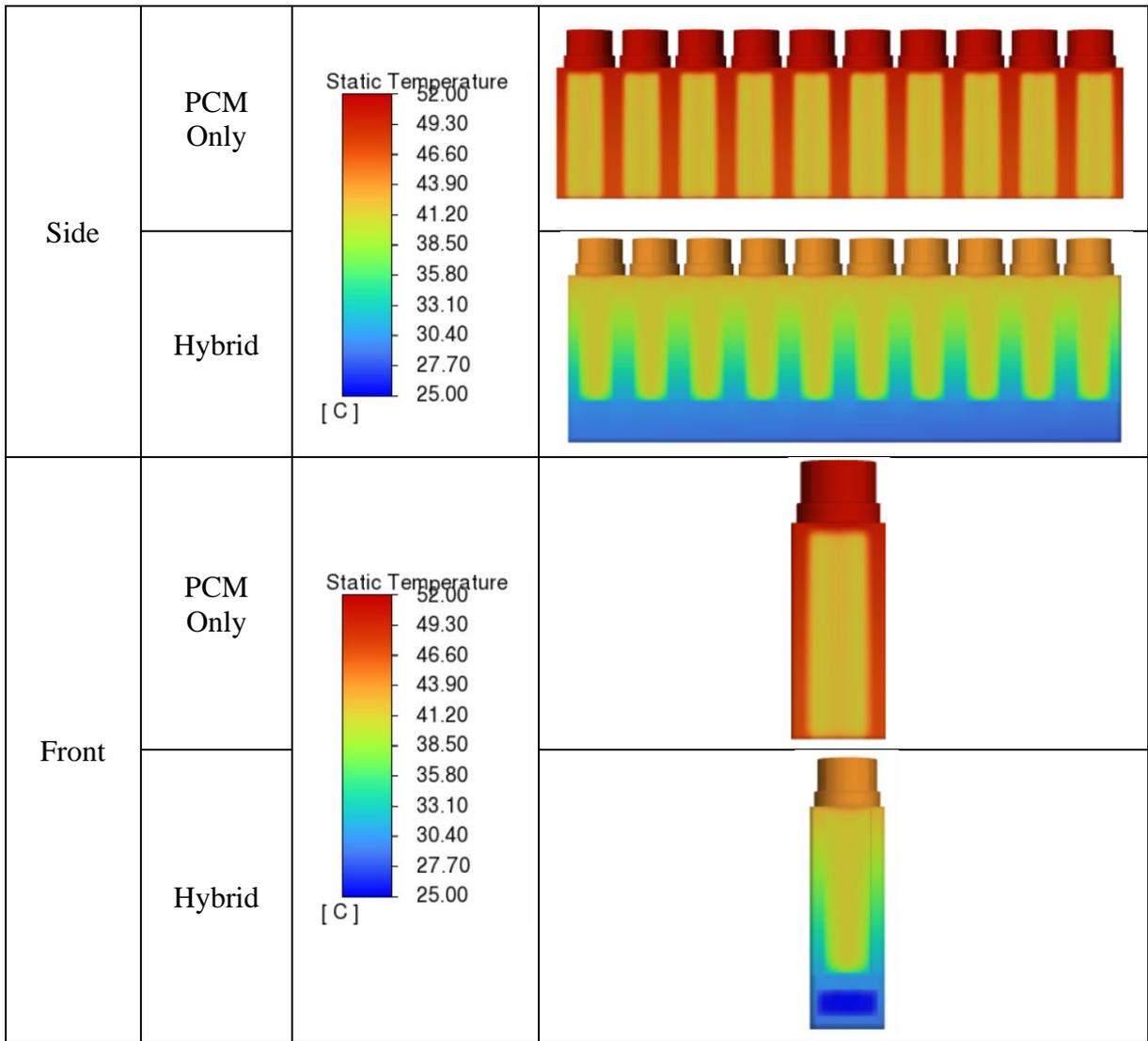
Bedasarkan tabel 4.2 dapat diketahui bahwa penggunaan air pada metode pendinginan *hybrid* dapat mendinginkan PCM secara baik. Pada tabel 4.2, metode pendinginan *hybrid* dapat menurunkan temperatur PCM sebesar 7,417°C. Hal tersebut menyebabkan PCM pada pendinginan *hybrid* memiliki laju pelelehan yang lebih lambat sebesar 132 sekon dibandingkan dengan pendinginan hanya PCM. Selain itu, nilai *liquid fraction* pada pendinginan *hybrid* juga

jauh lebih rendah dibandingkan dengan pendinginan hanya PCM, yakni 0,156 untuk pendinginan *hybrid* dan 0,741 untuk pendinginan hanya PCM.

Tabel 4. 2 Rangkuman Hasil Simulasi Sistem Pendinginan Hanya PCM dan *Hybrid*

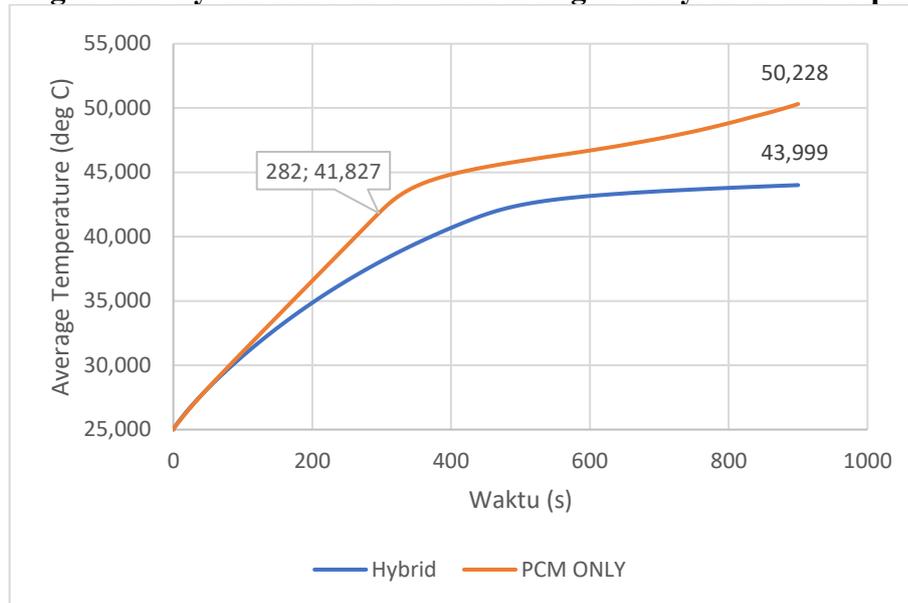
Nilai	Hanya PCM	Hybrid (PCM + Air)
Baterai		
Temperatur Maksimum (deg C)	51,419	44,803
Temperatur Rata-Rata (deg C)	50,315	44,009
PCM		
Temperatur Maksimum (deg C)	50,264	43,117
Liquid Fraction	0,741	0,156
Waktu Mulai Meleleh (s)	282	414





Gambar 4. 2 Kontur Temperatur untuk Sistem Pendinginan Hanya PCM dan *Hybrid*

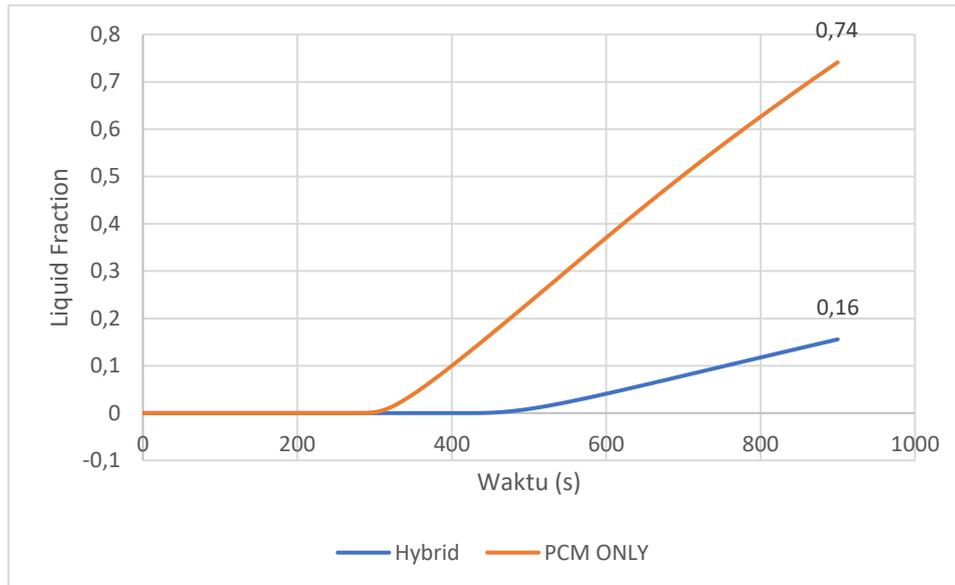
4.2.2 Grafik Temperatur Rata-Rata Baterai dan Liquid Fraction PCM pada Sistem Pendinginan Hanya PCM dan Sistem Pendinginan Hybrid terhadap Waktu



Gambar 4. 3 Grafik Temperatur Rata-Rata Terhadap Waktu pada Sistem Pendinginan Hanya PCM dan *Hybrid*

PCM memiliki kemampuan pendinginan yang baik dikarenakan memiliki nilai *latent heat* yang besar. Pada saat PCM mulai meleleh, PCM akan mulai menyerap panas yang dihasilkan baterai. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.3 pada waktu 282 sekon ketika PCM mulai meleleh. Ketika PCM meleleh terlihat bahwa temperatur baterai mulai melandai. Namun, pada pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa pendinginan hanya PCM tidak dapat menjaga temperatur baterai tetap landari. Pada akhir simulasi, temperatur rata-rata pada baterai dengan metode pendinginan hanya PCM adalah 50,228°C.

Namun, hal tersebut dapat diatasi dengan menggunakan metode pendinginan *hybrid*. Pada gambar 4.3 terlihat bahwasanya penggunaan metode *hybrid* dapat menurunkan temperatur baterai dan menjaganya dibawah 44°C. Efek penggunaan metode pendinginan *hybrid* juga dapat dilihat pada gambar 4.4 yang menunjukkan nilai *liquid fraction* pada PCM. Pada gambar 4.4 terlihat bahwa dengan penggunaan metode pendinginan *hybrid* dapat menurunkan nilai *liquid fraction* PCM sebesar 0,585. Peningkatan performa pada pendinginan *hybrid* dikarenakan fungsi air pada pendinginan *hyrbid* adalah untuk mendinginkan baterai dan PCM. Pendinginan pada PCM menjaga PCM untuk tidak meleleh secara sempurna dan menjaga PCM tetap berada di rentang temperatur operasi sehingga PCM dapat menyerap panas lebih baik.



Gambar 4. 4 Grafik *Liquid Fraction* Terhadap Waktu pada Sistem Pendinginan Hanya PCM dan *Hybrid*

4.3 Analisa Pengaruh Perubahan Kecepatan Terhadap Temperatur Baterai

4.3.1 Desain 1

4.3.1.1 Analisa Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction*

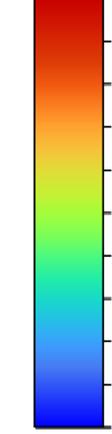
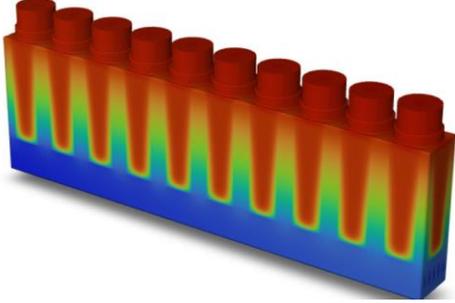
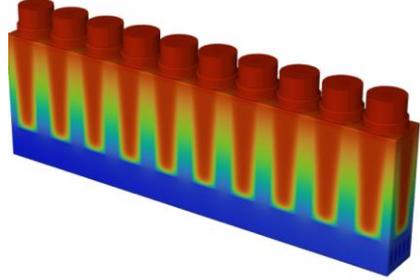
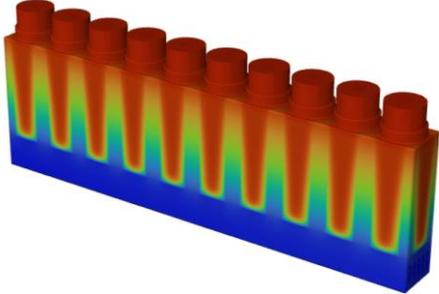
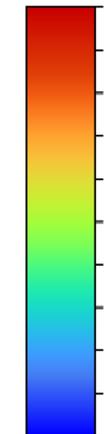
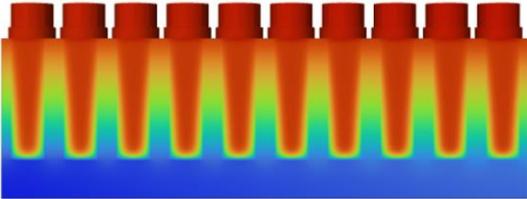
Bedasarkan simulasi yang telah dilakukan, baterai memiliki temperatur tertinggi pada bagian tengah baterai dan pada sisi *blanket* relatif sama pada seluruh bagian seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.5. Nilai temperatur yang tinggi pada bagian tengah baterai dikarenakan bagian tengah baterai merupakan sumber panas yang terdapat pada baterai. Dari variasi yang dilakukan, kontur temperatur pada masing-masing variasi tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Perbedaan pada kontur temperatur hanya terdapat pada nilai temperatur maksimum pada masing-masing variasi seperti yang dapat dilihat pada tabel 4.3.

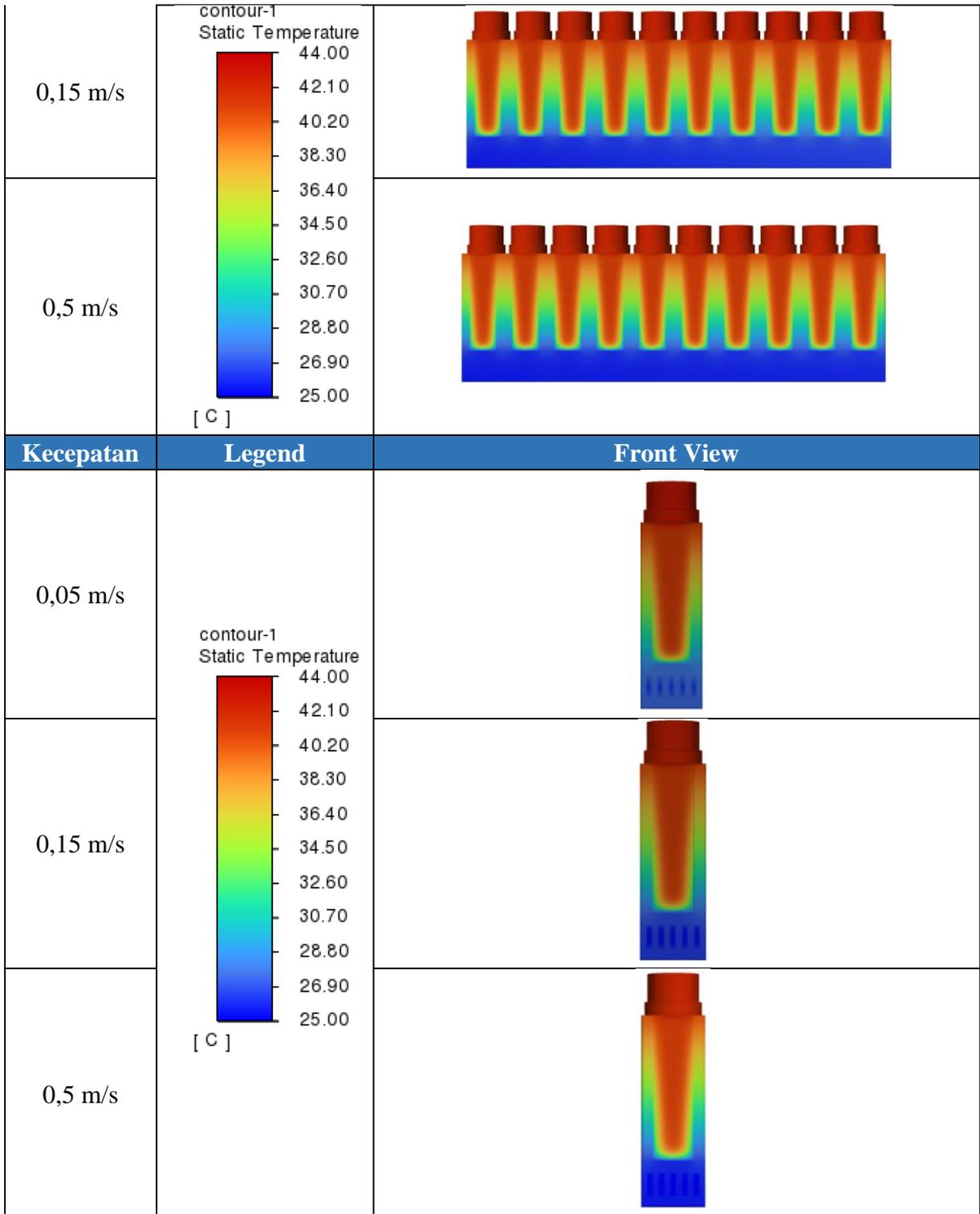
Selain nilai temperatur pada baterai, pada hasil simulasi didapatkan pula nilai temperatur dan *liquid fraction* pada PCM yang terangkum pada tabel 4.3. Bedasarkann tabel 4.3 diketahui bahwa kecepatan 0,05 m/s memiliki temperatur PCM yang paling tinggi dibandingkan dengan variasi kecepatan lainnya, yakni sebesar 42,311°C. Temperatur yang lebih tinggi pada kecepatan 0,05 m/s mengakibatkan PCM pada variasi kecepatan ini memiliki *liquid fraction* yang lebih besar daripada kecepatan lainnya, yakni sebesar 0,048.

Tabel 4. 3 Rangkuman Hasil Simulasi Desain 1

Nilai	0,05 m/s	0,15 m/s	0,5 m/s
Baterai			
Temperatur Maksimum (deg C)	43,321	42,895	42,654
Temperatur Rata-Rata (deg C)	41,874	41,741	41,687
PCM			
Temperatur Maksimum (deg C)	42,311	41,893	41,672
Liquid Fraction	0,048	0,027	0,020
Waktu Mulai Meleleh (s)	507	578	595

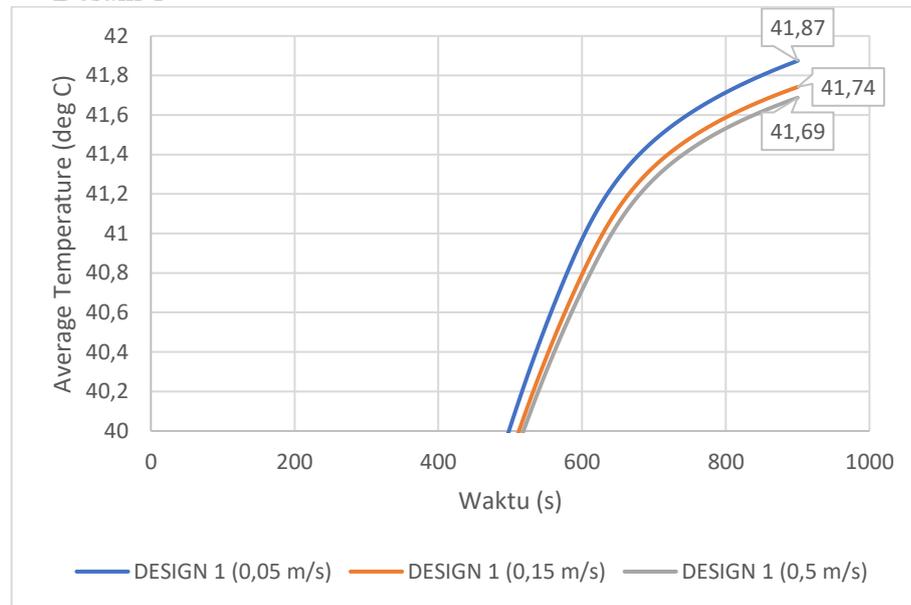
Kecepatan	Legend	Isometric View
-----------	--------	----------------

0,05 m/s	<p>contour-1 Static Temperature</p>  <p>[°C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Top View
0,05 m/s	<p>contour-1 Static Temperature</p>  <p>[°C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Side View
0,05 m/s		



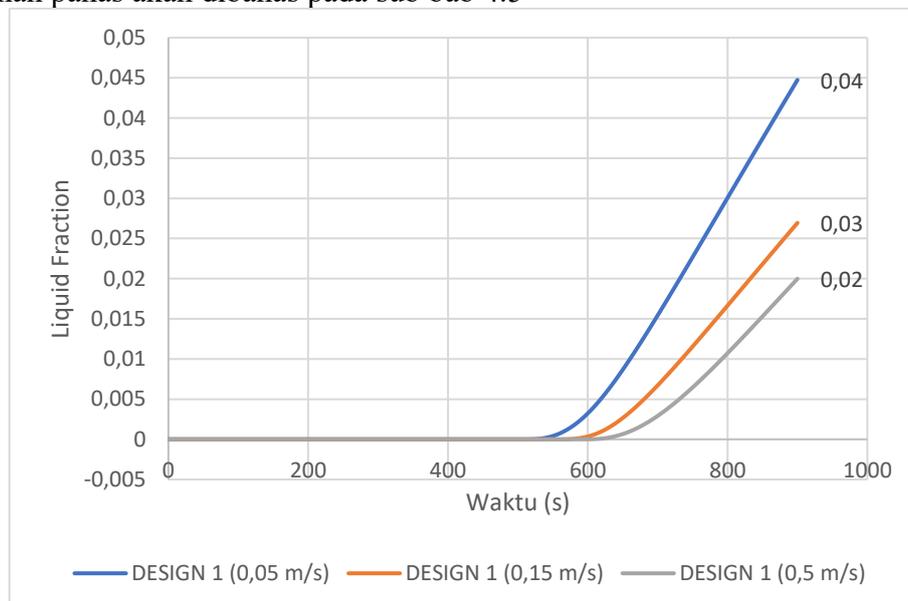
Gambar 4. 5 Kontur Temperatur Baterai pada Desain 1

4.3.1.2 Grafik Temperatur Rata-Rata dan *Liquid Fraction* Setiap Variasi Kecepatan di Desain 1



Gambar 4. 6 Grafik Temperatur Rata-Rata Terhadap Waktu Pada Desain 1

Bedasarkan gambar 4.6 dapat dilihat bahwa nilai temperatur pada setiap variasi tidak mengalami perbedaan yang signifikan. Pada gambar 4.6 terlihat bahwasanya peningkatan kecepatan aliran air akan menurunkan sedikit temperatur pada baterai. Temperatur baterai paling rendah terjadi pada saat aliran mengalir dengan kecepatan 0,5 m/s dan memiliki perbedaan sebesar 0,187°C dari temperatur tertinggi yang terdapat pada kecepatan 0,05 m/s. Peningkatan performa pendinginan ini dapat disebabkan karena pengaruh dari perpindahan panas yang terjadi pada aliran. Penjelasan lebih lanjut terkait dengan pengaruh kecepatan perpindahan panas akan dibahas pada sub bab 4.5



Gambar 4. 7 Grafik *Liquid Fraction* Terhadap Waktu Pada Desain 1

Selain itu, kecepatan aliran yang semakin tinggi juga semakin memperlambat waktu mulai leleh dan durasi leleh dari PCM. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.7, dimana pada gambar tersebut terlihat bahwasanya kecepatan 0,5 m/s memiliki waktu mulai leleh terlambat, yakni pada waktu 595 sekon. Selain itu, pada kecepatan aliran 0,5 m/s PCM hanya meleleh

sebesar 2% selama waktu 900 sekon. Berbeda halnya dengan kecepatan aliran 0,15 m/s dan 0,05 m/s yang sudah meleleh sebesar 2,7% dan 4,8% selama waktu 900 sekon.

4.3.2 Desain 2

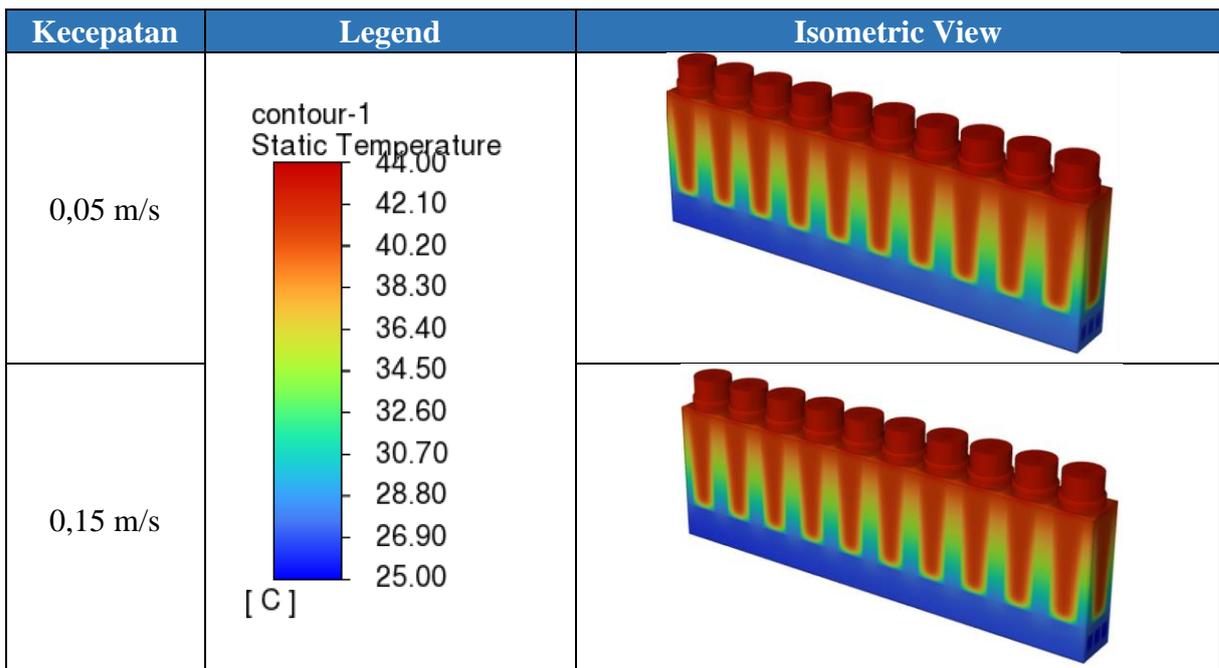
4.3.2.1 Analisa Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction*

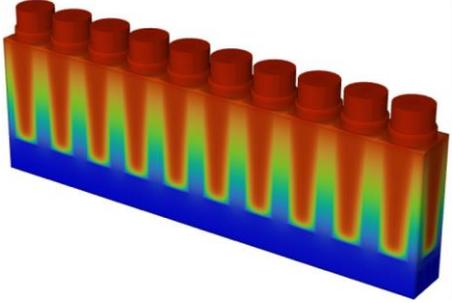
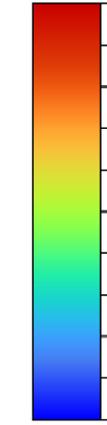
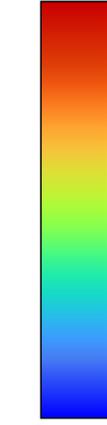
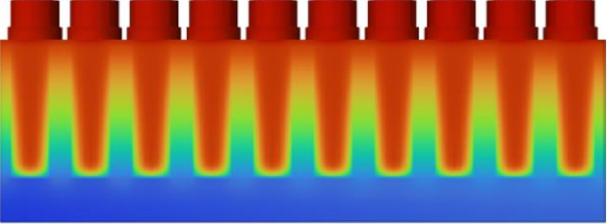
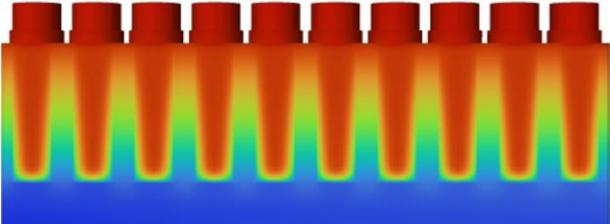
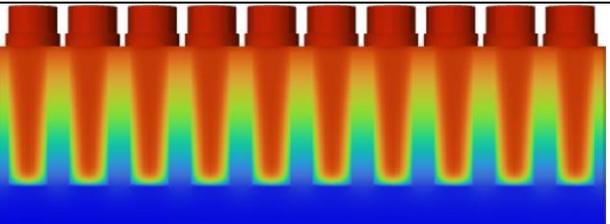
Bedasarkan simulasi yang telah dilakukan, kontur temperatur baterai pada gambar 4.8 tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan antar variasi kecepatan, kecuali pada bagian *cold column*. Pada gambar 4.8 terlihat bahwa bagian *cold column* pada kecepatan yang semakin tinggi cenderung memiliki kontur yang berwarna biru tua. Hal tersebut menunjukkan bahwasanya semakin tinggi kecepatan aliran maka akan semakin baik pendinginan yang diberikan. Pendinginan yang semakin baik menyebabkan temperatur baterai pada kecepatan 0,5 m/s memiliki temperatur yang paling rendah.

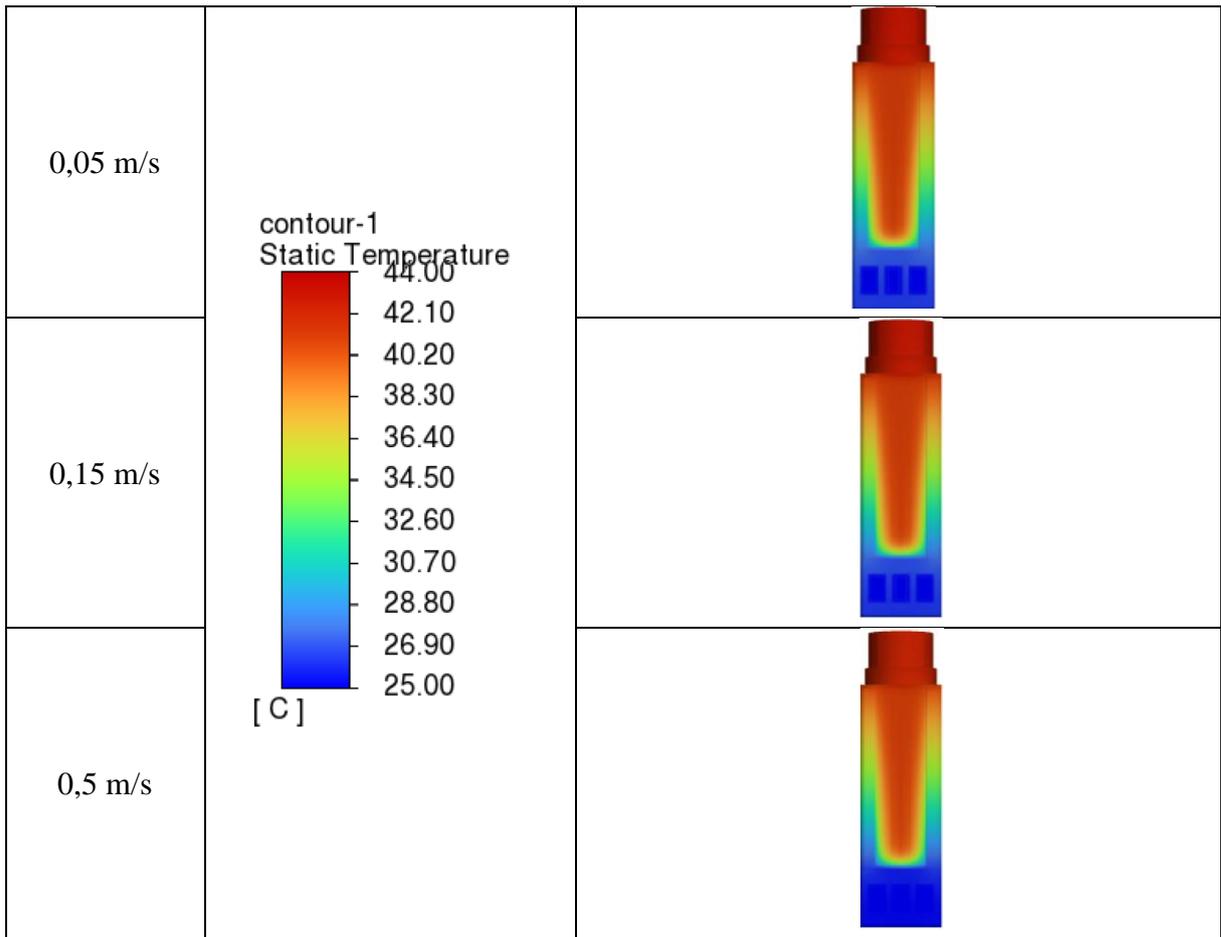
Pada tabel 4.4 dapat juga diketahui bahwasanya variasi kecepatan aliran 0,5 m/s memiliki temperatur PCM yang paling rendah diikuti secara berurutan oleh 0,15 m/s dan 0,05 m/s. Temperatur PCM yang paling rendah pada 0,5 m/s menyebabkan PCM pada kecepatan tersebut memiliki laju *liquid fraction* paling rendah, yakni sebesar 0,019. Nilai tersebut lebih kecil sebesar 0,0452 dibandingkan dengan nilai *liquid fraction* terbesar pada kecepatan 0,05 m/s.

Tabel 4. 4 Rangkuman Hasil Simulasi pada Desain 2

Nilai	0,05 m/s	0,15 m/s	0,5 m/s
Baterai			
Temperatur Maksimum (deg C)	43,672	43,405	42,776
Temperatur Rata-Rata (deg C)	42,512	42,394	41,863
PCM			
Temperatur Maksimum (deg C)	42,229	42,026	41,58
Liquid Fraction	0,064	0,048	0,0190
Waktu Mulai Meleleh (s)	512	533	595

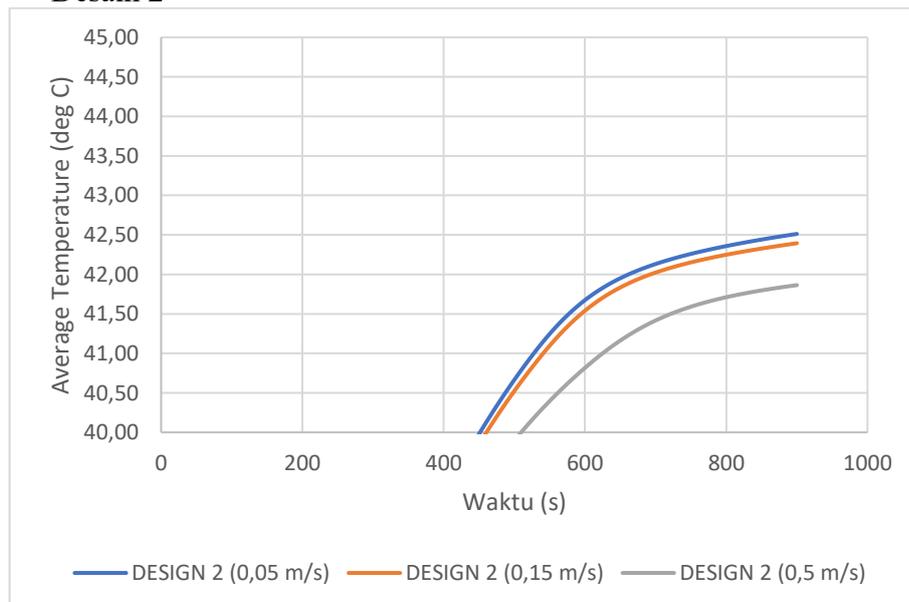


0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Top View
0,05 m/s	<p>contour-1 Static Temperature</p>  <p>[C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Side View
0,05 m/s	<p>contour-1 Static Temperature</p>  <p>[C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Front View



Gambar 4. 8 Gambar Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction* Pada Desain 2

4.3.2.2 Grafik Temperatur Rata-Rata dan *Liquid Fraction* Setiap Variasi Kecepatan di Desain 2

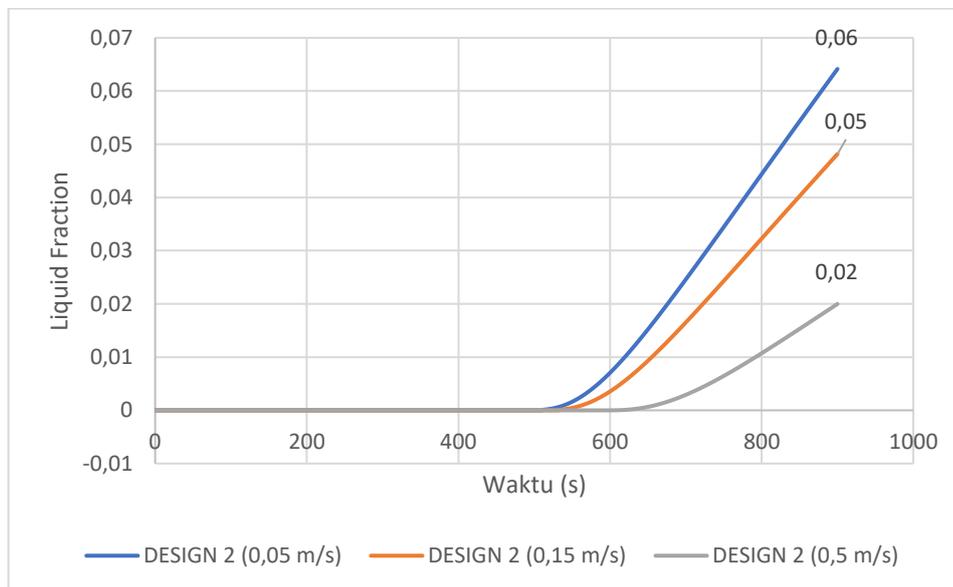


Gambar 4. 9 Grafik Temperatur Rata-Rata Terhadap Waktu Pada Desain 2

Bedasarkan grafik 4.9 dapat dilihat bahwa peningkatan kecepatan aliran tidak memberikan efek yang signifikan terhadap temperatur rata-rata baterai. Hal ini dapat disebabkan karena PCM pada semua variasi kecepatan aliran belum mencair sempurna sehingga menyebabkan temperatur baterai berada di nilai yang relatif sama. Selain itu, PCM yang digunakan juga memiliki nilai *latent heat* yang sama, sehingga apabila PCM belum mencair secara sempurna maka PCM akan terus dapat mendinginkan baterai dan menjaga suhunya. Temperatur baru akan mengalami perbedaan signifikan ketika PCM mulai mencair sempurna.

Namun, peningkatan kecepatan pendinginan aliran terhadap aliran memberikan efek positif pada temperatur rata-rata baterai terutama pada saat kecepatan aliran 0,5 m/s. Pada saat kecepatan aliran 0,5 m/s, temperatur pada baterai 0,531°C lebih dingin dibandingkan dengan kecepatan 0,15 m/s dan 0,649°C dibandingkan dengan kecepatan 0,05 m/s. Penurunan temperatur baterai tersebut dapat dimungkinkan karena pengaruh kecepatan aliran terhadap nilai perpindahan panasnya. Peningkatan kecepatan aliran akan meningkatkan perpindahan panas yang terjadi pada aliran. Penjelasan lebih lanjut terkait dengan pengaruh kecepatan terhadap perpindahan panas pada aliran akan dibahas pada sub bab 4.5

Efek perpindahan panas yang lebih tinggi tersebut juga dapat dilihat pada nilai *liquid fraction* pada PCM. Bedasarkan gambar 4.10 dapat dilihat bahwa variasi kecepatan aliran 0,5 m/s memiliki nilai *liquid fraction* yang paling rendah dengan nilai 0,019 dengan diikuti oleh kecepatan aliran 0,15 dengan nilai *liquid fraction* sebesar 0,048 dan kecepatan aliran 0,05 m/s memiliki *liquid fraction* sebesar 0,064. Selain itu, peningkatan perpindahan panas juga menyebabkan PCM meleleh lebih lambat. Dengan kecepatan aliran 0,5 m/s, PCM mulai meleleh setelah 595 sekon dimana nilai tersebut 62 sekon lebih lama dibandingkan dengan kecepatan aliran 0,15 m/s dan 83 sekon lebih lama dibandingkan dengan kecepatan aliran 0,05 m/s.



Gambar 4. 10 Grafik *Liquid Fraction* Terhadap Waktu Pada Desain 2

4.3.3 Desain 3

4.4.3.1 Analisa Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction*

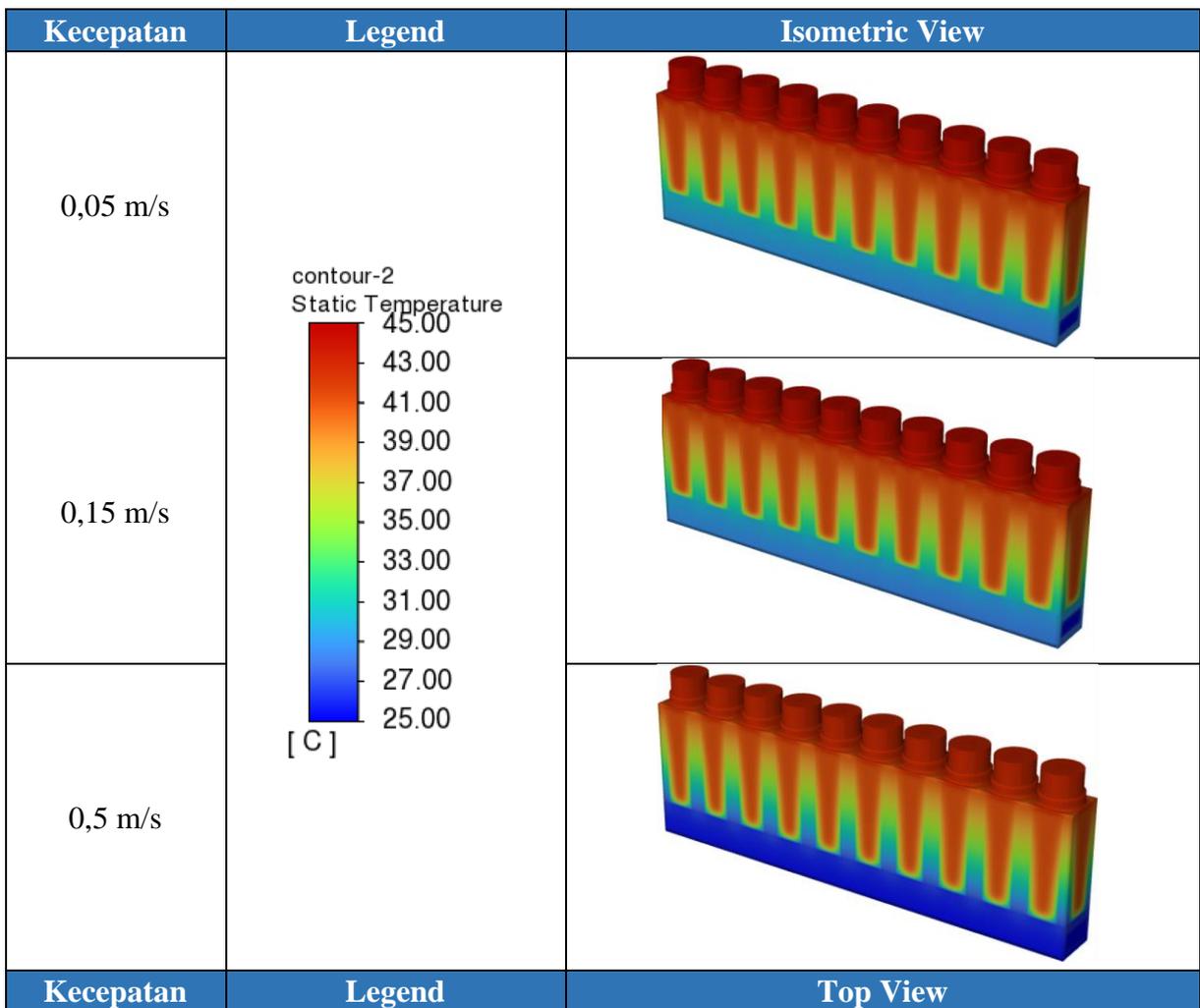
Bedasarkan simulasi yang telah dilakukan, kontur temperatur yang tertera pada gambar 4.9 tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, kecuali pada kecepatan aliran air 0,5 m/s. Pada gambar 4.9 terlihat bahwa kecepatan aliran 0,5 m/s memiliki kontur *cold column* yang lebih gelap dibandingkan dengan kecepatan lainnya. Selain itu, pada gambar 4.9 dapat dilihat bahwa kecepatan aliran 0,5 m/s memiliki nilai kontur yang lebih kehijauan pada bagian PCM.

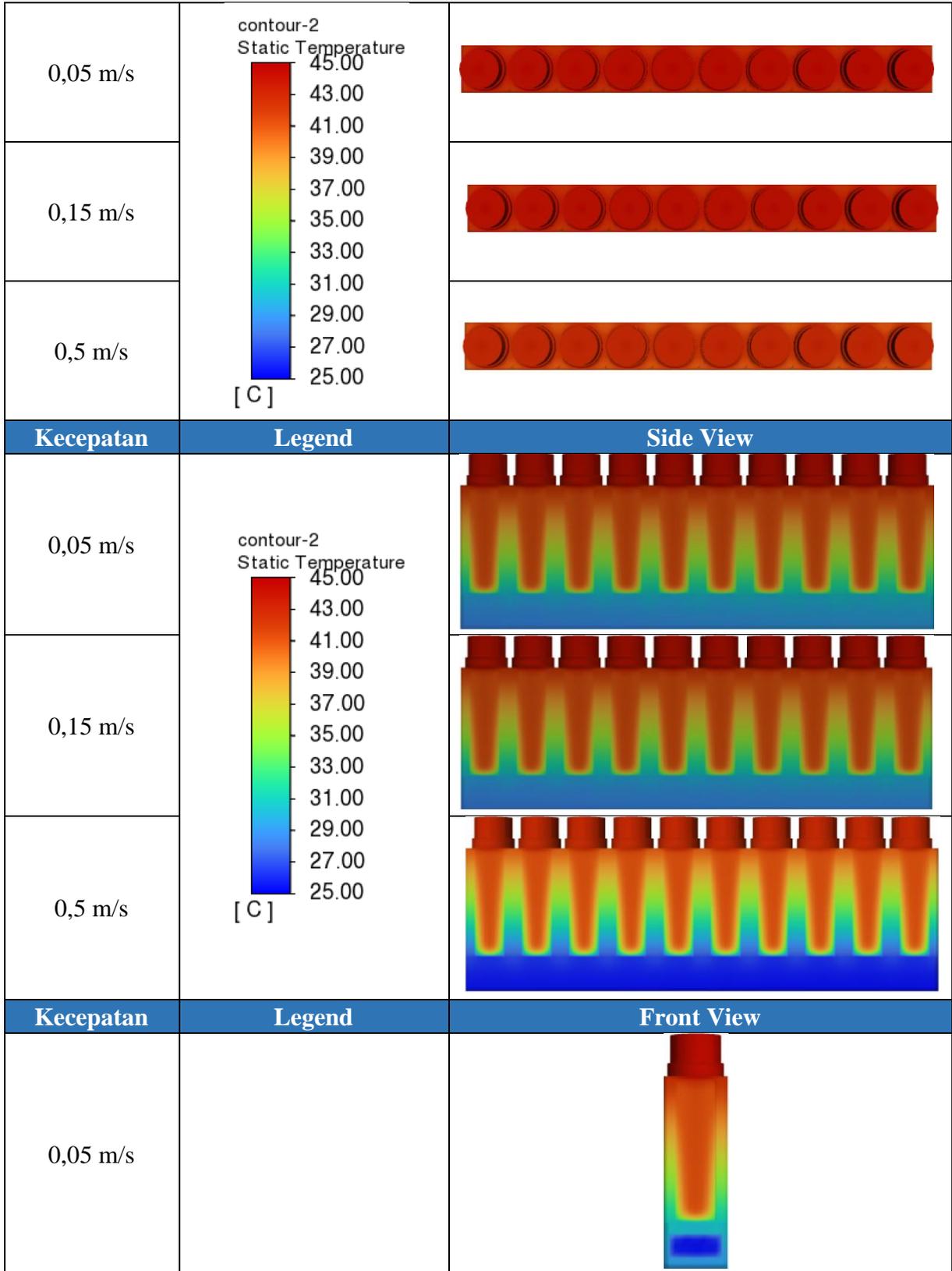
Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan pada kecepatan 0,5 m/s lebih baik dibandingkan dengan kecepatan lainnya.

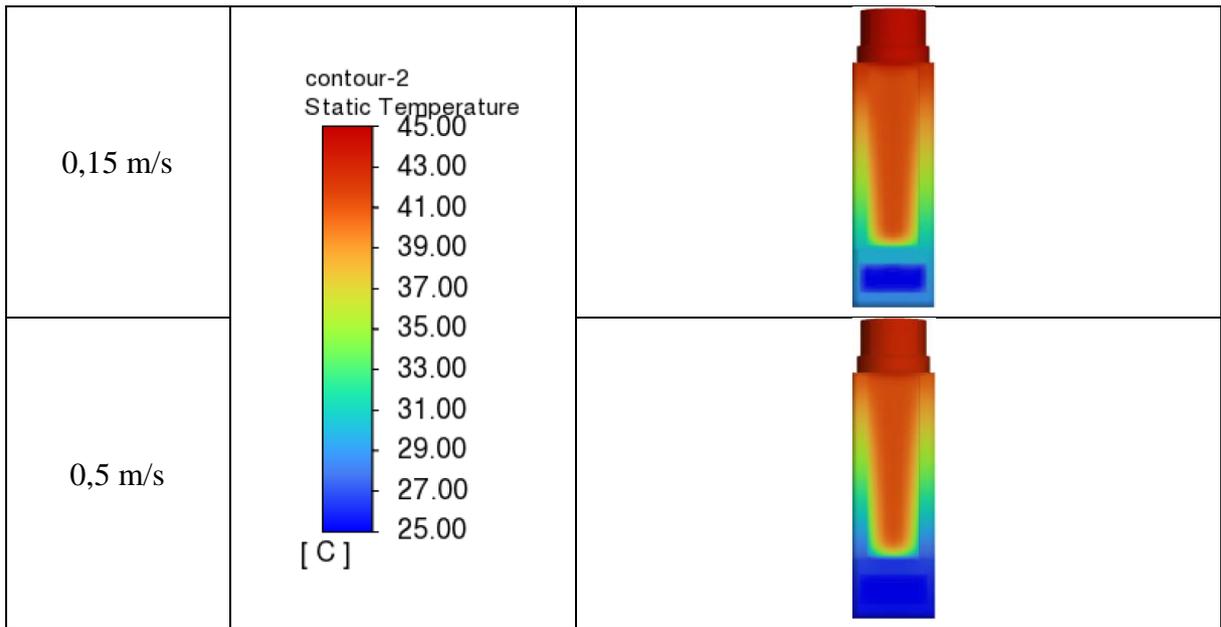
Pada tabel 4.5 juga dapat diketahui bahawasanya variasi kecepatan aliran 0,5 m/s memiliki temperatur PCM yang paling rendah diikuti secara berurutan oleh 0,15 m/s dan 0,5 m/s. Temperatur PCM yang paling rendah pada 0,5 m/s menyebabkan PCM pada kecepatan tersebut memiliki laju *liquid fraction* paling rendah, yakni sebesar 0,047. Nilai tersebut lebih rendah sebesar 0,085 dibandingkan kecepatan 0,15 m/s dan 0,108 lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan 0,05 m/s.

Tabel 4. 5 Rangkuman Hasil Simulasi pada Desain 3

Nilai	0,05 m/s	0,15 m/s	0,5 m/s
Baterai			
Temperatur Maksimum (deg C)	44,803	44,601	43,317
Temperatur Rata-Rata (deg C)	44,009	43,813	42,551
PCM			
Temperatur Maksimum (deg C)	43,117	42,897	41,99
Liquid Fraction	0,156	0,133	0,047
Waktu Mulai Meleleh (s)	414	423	521

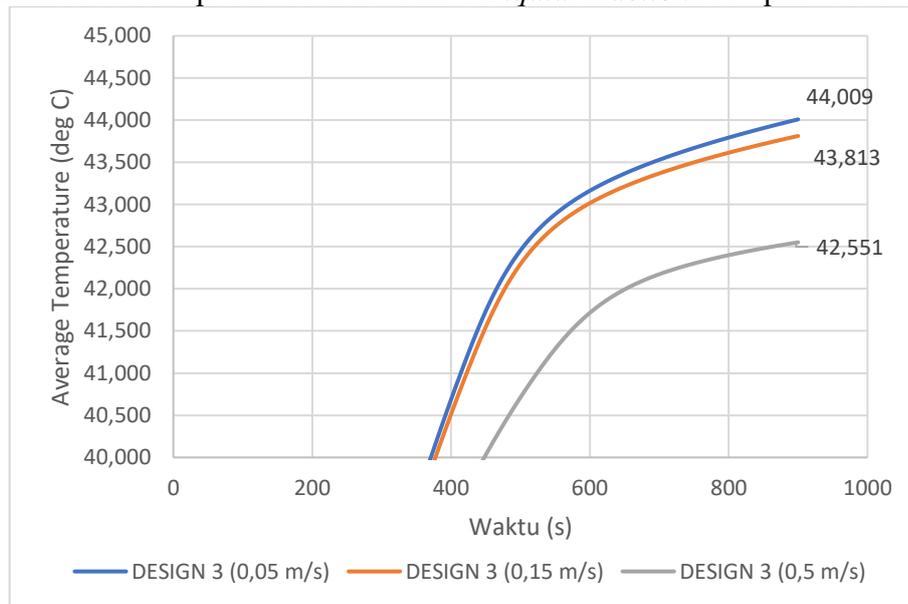






Gambar 4. 11 Gambar Kontur Temperatur dan *Liquid Fraction* Pada Desain 3

4.4.3.2 Grafik Temperatur Rata-Rata dan *Liquid Fraction* Setiap Variasi di Desain 3

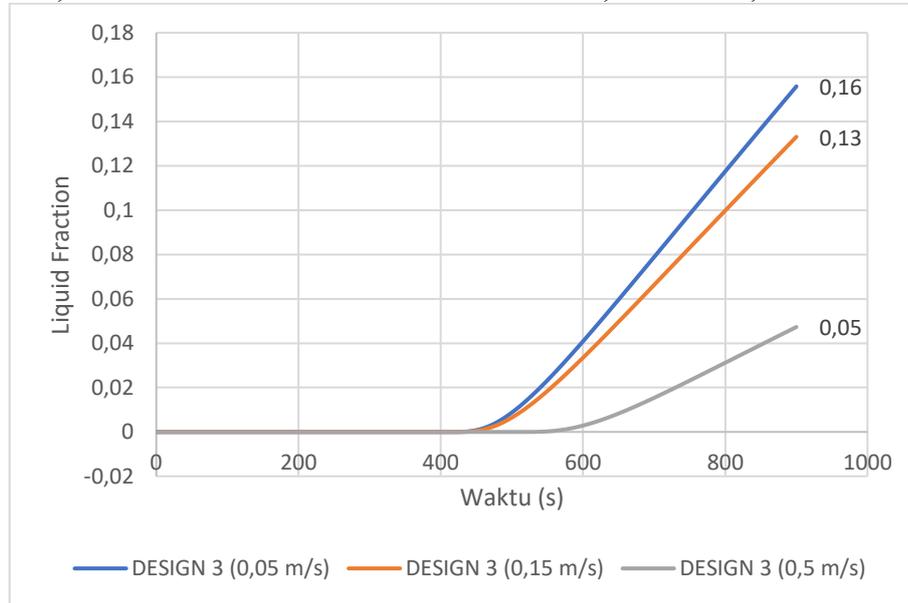


Gambar 4. 12 Grafik Temperatur Rata-Rata Terhadap Waktu Pada Desain 3

Pada gambar 4.12 dapat diketahui bahwasanya temperatur rata-rata pada baterai tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Berdasarkan gambar 4.12, kecepatan aliran yang semakin tinggi memiliki nilai temperatur baterai yang semakin rendah. Pada kecepatan 0,5 m/s, nilai temperatur rata-rata baterai adalah 42,551°C. Nilai temperatur tersebut lebih rendah 1,284°C dibandingkan dengan nilai temperatur pada kecepatan 0,15 m/s dan lebih rendah 1,486°C dibandingkan dengan nilai temperatur pada kecepatan 0,05 m/s. Hal ini menunjukkan bahwasanya perpindahan panas pada kecepatan 0,5 m/s merupakan yang paling besar dibandingkan dengan kecepatan lainnya. Penjelasan lebih lanjut terkait dengan pengaruh kecepatan perpindahan panas akan dibahas pada sub bab 4.5

Selain hal itu, kecepatan aliran yang semakin tinggi juga dapat menurunkan temperatur pada PCM sehingga memperlambat laju pelelehan PCM. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar

4.13. Dimana pada grafik tersebut terlihat bahwasanya kecepatan 0,5 m/s memiliki nilai *liquid fraction* terkecil dengan nilai 0,0473. Nilai tersebut lebih rendah 0,085 dibandingkan dengan nilai *liquid fraction* pada kecepatan 0,15 m/s dan lebih rendah 0,108 dibandingkan dengan nilai *liquid fraction* pada kecepatan 0,5 m/s. Selain itu, kecepatan aliran yang semakin tinggi juga menyebabkan PCM mulai meleleh lebih lambat. Adapun waktu mulai leleh kecepatan 0,5 m/s; 0,15 m/s; dan 0,05 m/s secara berurutan adalah 521 sekon, 423 sekon, 414 sekon.



Gambar 4. 13 Grafik *Liquid Fraction* Terhadap Waktu Pada Desain 3

4.3.4 Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Nilai Koefisien Konveksi

Nilai koefisien konveksi dihitung untuk membuktikan alasan yang terdapat pada beberapa sub bab sebelumnya. Dalam menghitung koefisien konveksi perlu diketahui terlebih dahulu jenis aliran yang dimiliki. Kemudian, dilanjutkan dengan perhitungan *nusselt number* dan nilai koefisien konveksinya. Berikut proses perhitungan nilai koefisien konveksi pada seluruh variasi desain dan kecepatan.

4.3.4.1 Contoh Perhitungan Koefisien Konveksi

Dalam contoh perhitungan, data yang digunakan adalah data desain 3 dengan kecepatan 0,5 m/s untuk contoh aliran turbulen dan desain 3 dengan kecepatan 0,15 m/s untuk contoh aliran laminar.

1. *Reynold Numbers*

Contoh perhitungan *reynold number* menggunakan data desain 3 dengan kecepatan aliran 0,5 m/s. Berikut merupakan parameter input yang digunakan dalam perhitungan.

Tabel 4. 6 Parameter Input pada Perhitungan *Reynold Number*

Parameter	Nilai	Satuan
Lebar <i>Column</i>	0,018	m
Tinggi <i>Column</i>	0,008	m
Kecepatan aliran	0,5	m/s
<i>Dynamic Viscosity</i>	0,00089	Kg.m/s
Panjang <i>Cold Column</i>	0,22	m

i. Menghitung *hydraulic diameter*

Pada aliran *non-circular*, nilai diameter pada pipa dapat didekati dengan *characteristic length* yang bernama *hydraulic diameter*.

$$D_h = \frac{4 \times A_c}{P}$$

$$D_h = \frac{4 \times (p \times l)}{2(p + l)}$$

$$D_h = \frac{4 \times (0,018 \text{ m} \times 0,008 \text{ m})}{2(0,018 \text{ m} + 0,008 \text{ m})}$$

$$D_h = 0,0111 \text{ m}$$

ii. Menghitung *reynold number*

Jenis aliran dapat ditentukan dengan menggunakan *reynold numbers*. Aliran dikategorikan laminar apabila aliran bernilai kurang dari 2300 dan dikategorikan turbulen apabila aliran bernilai lebih dari 2300.

$$Re_D = \frac{\rho v_m D_h}{\mu}$$

$$Re = \frac{998,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,0111 \text{ m}}{0,00089 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}}$$

$$Re = 6211,79 > 2300 \text{ (turbulen)}$$

2. *Entrance Length* pada Aliran Turbulen

Bedasarkan sub bab 2.5 tentang perpindahan panas pada aliran dalam pipa dijelaskan bahwa apabila $\left(\frac{x}{D}\right) > 10$ maka aliran tersebut akan dianggap sebagai *fully developed turbulent flow*. Adapun pada desain 3 nilai dari rasio tersebut adalah sebagai berikut.

$$\left(\frac{x}{D_h}\right) > 10$$

$$\left(\frac{0,22}{0,0111}\right) > 10$$

$$(19,81) > 10$$

Bedasarkan perhitungan tersebut, nilai yang dihitung lebih dari 10 sehingga aliran akan diasumsikan sebagai *fully developed turbulent flow*.

3. *Nusselt Number* pada Aliran Turbulen

i. Menghitung *fraction number*

$$f = (0,790 \ln Re_D - 1,64)^{-2}$$

$$f = (0,790 \ln 6211,79 - 1,64)^{-2}$$

$$f = 0,03614$$

ii. Menghitung *nusselt number*

$$Nu = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$$

$$Nu = \frac{(0,03614/8)(6211,79 - 1000)6,13}{1 + 12,7(0,03614/8)^{1/2}(6,13^{2/3} - 1)}$$

$$Nu = 48,02$$

4. Koefisien Konveksi

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k}$$

$$h = \frac{k \cdot Nu}{D_h}$$

$$h = \frac{0,6 \cdot 48,024}{0,0111}$$

$$h = 2601,28 \frac{W}{m^2K}$$

Bedasarkan perhitungan yang dilakukan didapatkan nilai koefisien konveksi pada desain 3 dengan kecepatan 0,5 m/s adalah 2601,28 W/m^2K .

5. Entrance Length pada Aliran Laminar

Aliran pada *internal flow* dapat dibagi menjadi dua bagian, yakni area *entrance* dan area *fully developed*. Aliran dikatakan di area *fully developed* pada saat kecepatan dan thermal melewati *entry length*-nya masing-masing.

i. Menghitung Hydrodynamic Entry Length

$$x_{fd,h} = 0,05 Re_D$$

$$x_{fd,h} = 0,05 \cdot 1863,53.$$

$$x_{fd,h} = 1,032 \text{ m}$$

$$x_{fd,h} = 103,2 \text{ cm}$$

ii. Menghitung Thermal Entry Length

$$x_{fd,t} = 0,05 Re_D Pr$$

$$x_{fd,t} = 0,05 \cdot 1863,53 \cdot 6,13$$

$$x_{fd,t} = 6,326 \text{ m}$$

$$x_{fd,t} = 632,6 \text{ cm}$$

Bedasarkan perhitungan tersebut, aliran masih berada pada *entrance region* di sepanjang *cold column*.

6. Nusselt Number pada Aliran Laminar

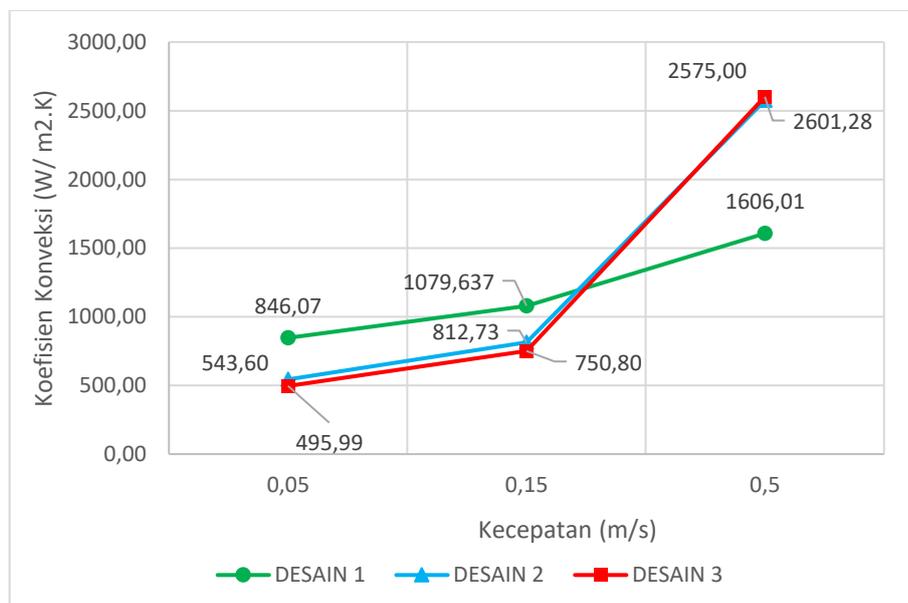
$$\overline{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,0668(D_h/L)Re_D Pr}{1 + 0,04[(D_h/L)Re_D Pr]^{2/3}}$$

$$\overline{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,0668 \cdot (0,0111/0,22) \cdot 1863,53 \cdot 6,13}{1 + 0,04[(0,0111/0,22) \cdot 1863,53 \cdot 6,13]^{2/3}}$$

$$\overline{Nu}_D = 13,86$$

Perhitungan untuk nilai koefisien konveksi pada aliran dapat dilakukan seperti pada tahapan yang ada di *point* ke-4.

4.3.4.2 Analisa Pengaruh Kecepatan Aliran Terhadap Nilai Koefisien Konveksi



Gambar 4. 14 Grafik Koefisien Konveksi pada Masing-Masing Variasi Kecepatan dan Desain

Bedasarkan perhitungan yang dilakukan pada masing-masing variasi desain dan kecepatan, didapatkan grafik hubungan koefisien konveksi dan kecepatan seperti pada gambar 4.14. Berdasarkan gambar 4.14, dapat dilihat bahwa dengan meningkatnya kecepatan aliran maka nilai koefisien konveksi yang dimiliki juga semakin meningkat. Hal tersebut menunjukkan bahwa dengan semakin tinggi kecepatan aliran maka akan semakin besar perpindahan panas yang terjadi antara baterai dan aliran sehingga temperatur yang terdapat pada baterai juga akan semakin rendah. Hubungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.7 dan gambar 4.15. Pada tabel 4.7 dan gambar 4.15 terlihat bahwasanya aliran dengan koefisien konveksi yang semakin tinggi cenderung memiliki nilai temperatur baterai yang semakin rendah.

Namun, pada gambar 4.15 terlihat bahwasanya desain 1 memiliki nilai temperatur yang lebih rendah dari desain 2 dan 3 walaupun nilai koefisien konveksinya pada tabe 4.7 lebih rendah dibandingkan desain 2 dan 3. Hal tersebut dapat disebabkan oleh luasan penampang pada desain 1 yang lebih besar dibandingkan dengan desain 2 dan 3. Luas penampang pada desain juga sangat mempengaruhi nilai perpindahan panas yang terjadi. Hal tersebut dikarenakan dalam menghitung perpindahan panas dipengaruhi oleh luas penamampang, seperti pada persamaan berikut.

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (4. 1)$$

Selain itu, pada gambar 4.14 terlihat bahwasanya nilai keofisien koveksi pada desain 2 dan 3 memiliki nilai yang mirip. Hal tersebut dikarenakan adanya pengaruh besar *hydraulic diameter* pada proses perhitungan koefisien konveksi, seperti pada persamaan berikut.

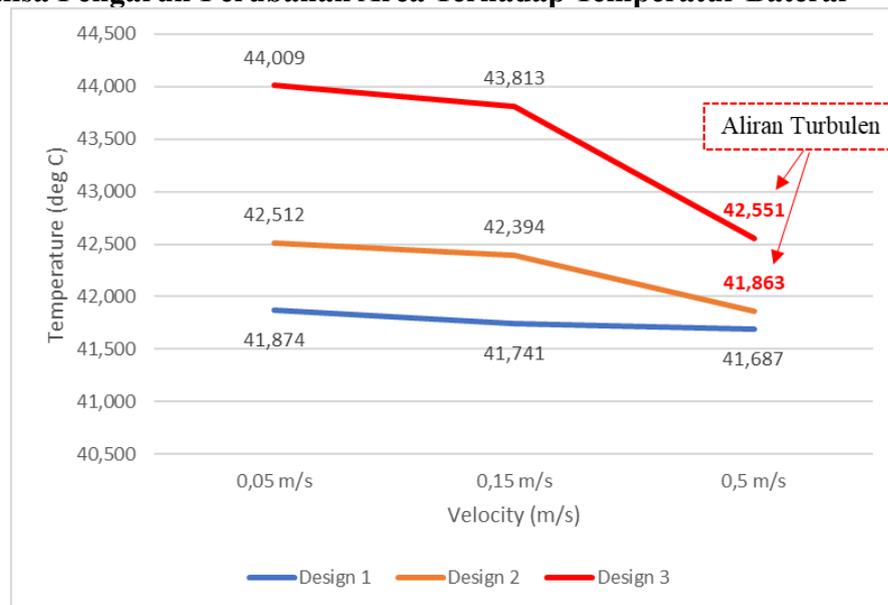
$$h = \frac{k \cdot Nu}{D_h} \quad (4. 2)$$

Bedasarkan persamaan 4.2 terlihat bahwa dengan semakin besar nilai *hydraulic diameter* maka koefisien konveksi yang dimiliki oleh aliran semakin kecil. Dimana bedasarkan data desain yang ada, *hydraulic diameter* dari desain 2 adalah 0,008 meter dan desain 3 adalah 0,011 meter dengan perbedaan sebesar 0,003 m. Oleh karenanya, hal tersebut dapat menjadi alasan kenapa nilai koefisien konveksi pada desain 2 dan desain 3 relatif sama satu sama lainnya.

Tabel 4. 7 Rangkuman Nilai Keofisien Konveksi pada Seluruh Variasi

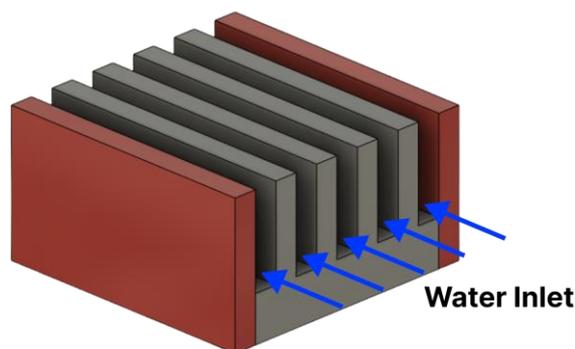
Desain	Velocity (m/s)	Average Temperatur (deg C)	Koefisien Konveksi (W/m ² K)
DESAIN 1	0,05	41,874	846,066
	0,15	41,741	1079,637
	0,5	41,687	1606,005
DESAIN 2	0,05	42,512	543,605
	0,15	42,394	812,726
	0,5	41,863	2574,996
DESAIN 3	0,05	44,009	495,986
	0,15	43,813	750,799
	0,5	42,551	2601,284

4.4 Analisa Pengaruh Perubahan Area Terhadap Temperatur Baterai



Gambar 4. 15 Temperatur Rata-Rata Baterai pada Masing-Masing Desain *Cold Column*

Simulasi kecepatan aliran dilakukan pada tiga bentuk desain *cold column* yang berbeda. Dari simulasi yang dilakukan dapat diketahui desain dengan kemampuan pendinginan paling baik adalah desain 1. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.15, dimana pada gambar tersebut terlihat bahwa pada berbagai variasi kecepatan desain 1 tetap memiliki nilai temperatur yang paling rendah. Kemampuan pendinginan yang baik pada desain 1 dapat terjadi karena adanya lima *channel* persegi. *Channel-channel* tersebut berperan sebagai area tambahan atau *fins* yang berguna untuk meningkatkan area yang kontak dengan aliran. Semakin besar area yang kontak dengan aliran maka perpindahan panas yang terjadi antara aliran dan baterai juga akan semakin besar seperti yang dituliskan pada persamaan 2.5 atau 4.1. Apabila dilihat secara jumlah *fins*, desain 1 memiliki 4 buah *fins*, desain 2 memiliki 2 buah *fins*, dan desain 3 memiliki desain tanpa *fins*. Hal inilah yang menyebabkan desain 1 memiliki kemampuan pendinginan yang paling baik dikarenakan memiliki area perpindahan panas yang paling besar.

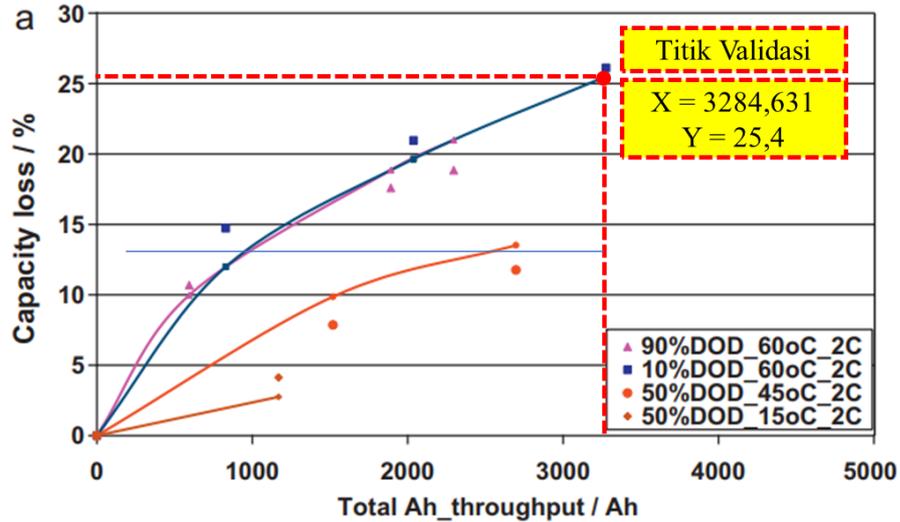


Gambar 4. 16 Bentuk Channel Berperan Sebagai *Fins*

4.5 Analisa Pengaruh Area dan Kecepatan Aliran Terhadap Jumlah Siklus Hidup Baterai

Setelah simulasi dilakukan maka akan didapatkan nilai temperatur baterai pada masing-masing variasi. Selanjutnya, data tersebut akan dihitung dan dianalisa jumlah siklus hidupnya. Berikut merupakan hasil perhitungan dan analisa yang dilakukan.

4.5.1 Validasi Perhitungan



Gambar 4. 17 Grafik *Capacity Loss* Terhadap *Total Ah* (Wang dkk, 2019)

Pada proses validasi, perhitungan yang dilakukan akan menggunakan persamaan 2.23 dan dibandingkan dengan hasil eksperimen yang ditunjukkan oleh gambar 4.17. Berdasarkan pada gambar 4.17, grafik validasi yang digunakan adalah grafik dengan kondisi 90% DOD, 60°C, 2C dengan data yang dibandingkan adalah data total Ah. Perbandingan dengan data total Ah dipilih dikarenakan pada gambar titik dari *capacity loss* memiliki posisi yang lebih pasti dan memiliki rentang yang lebih sempit dibandingkan dengan total Ah. Berikut merupakan tahapan perhitungan yang dilakukan.

Tabel 4. 8 Parameter Input pada Proses Validasi

Data	Nilai	Satuan
Q cycle	25,4	%
R	8,314	J/k mol
B	21681	
C-rate	2	C
DOD	0,1	fraksi
Temperatur Baterai	60	C
	333	K

Tabel 4. 9 Konstanta Perhitungan Siklus Hidup

Parameter	Nilai			
	0,5C	2C	6C	10 C
B	31.630	21.681	12.934	15.512

$$\theta^{cyc} = B \cdot \exp \left[\frac{-31700 + 370,3 \times C_{rate}}{RT} \right] \cdot (A_h)^{0,55}$$

$$A_h = \left(\frac{\theta^{cyc}}{B \cdot \exp \left[\frac{-31700 + 370,3 \times C_{rate}}{RT} \right]} \right)^{1/0,55}$$

$$A_h = \left(\frac{25,4}{21681 \cdot \exp \left[\frac{-31700 + 370,3 \times 2}{8,314 \times 333} \right]} \right)^{1/0,55}$$

$$A_h = 3165,529$$

Bedasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai untuk total Ah pada *capacity loss* 25,4 persen adalah sebesar 3165,529. Apabila nilai pada grafik didekati dengan menggunakan skala maka didapatkan nilai total Ah pada *capacity loss* 25,4 persen adalah 3284,631. Selanjutnya, kedua nilai tersebut dibandingkan dan didapatkan nilai deviasi dari perhitungan yang dimiliki adalah sebesar 3,62%. Hal tersebut menunjukkan perbedaan yang tidak terlampau jauh dan dapat dijadikan acuan dalam perhitungan jumlah siklus hidup baterai.

4.5.2 Contoh Perhitungan Jumlah Siklus Hidup Baterai

Contoh perhitungan jumlah siklus hidup pada baterai menggunakan data temperatur rata-rata dari desain 1 pada kecepatan aliran 0,15 m/s. Berikut merupakan parameter input yang digunakan dalam perhitungan jumlah siklus hidup pada baterai.

Tabel 4. 10 Parameter Input pada Perhitungan Jumlah Siklus Hidup Baterai

Data	Nilai	Satuan
Q cycle	20	%
R	8,314	J/k mol
B	17307,5	
C-rate	4	C
DOD	1	fraksi
Temperature Baterai Input	41,741	C
	314,741	K

Pada tabel 4.10, nilai konstanta B untuk keadaan 4 C didapatkan dengan cara melakukan interpolasi dengan menggunakan data pada tabel 2.2. Interpolasi dapat dilakukan karena nilai konstanta B yang terdapat pada tabel 2.2 merupakan hasil dari regresi linear sehingga untuk mendapatkan nilai pada rentang tertentu dapat menggunakan metode interpolasi.

Pada perhitungan siklus hidup baterai perlu diketahui terlebih dahulu nilai dari variabel A_h . Berikut merupakan proses perhitungan variabel A_h .

$$\theta^{CYC} = B \cdot \exp \left[\frac{-31700 + 370,3 \times C_{rate}}{RT} \right] \cdot (A_h)^{0,55}$$

$$A_h = \left(\frac{\theta^{CYC}}{B \cdot \exp \left[\frac{-31700 + 370,3 \times C_{rate}}{RT} \right]} \right)^{1/0,55}$$

$$A_h = \left(\frac{20}{17307,5 \cdot \exp \left[\frac{-31700 + 370,3 \times 6}{8,314 \times 315,3} \right]} \right)^{1/0,55}$$

$$A_h = 6003,194$$

Setelah mendapatkan nilai A_h dilanjutkan dengan perhitungan jumlah siklus hidup pada baterai.

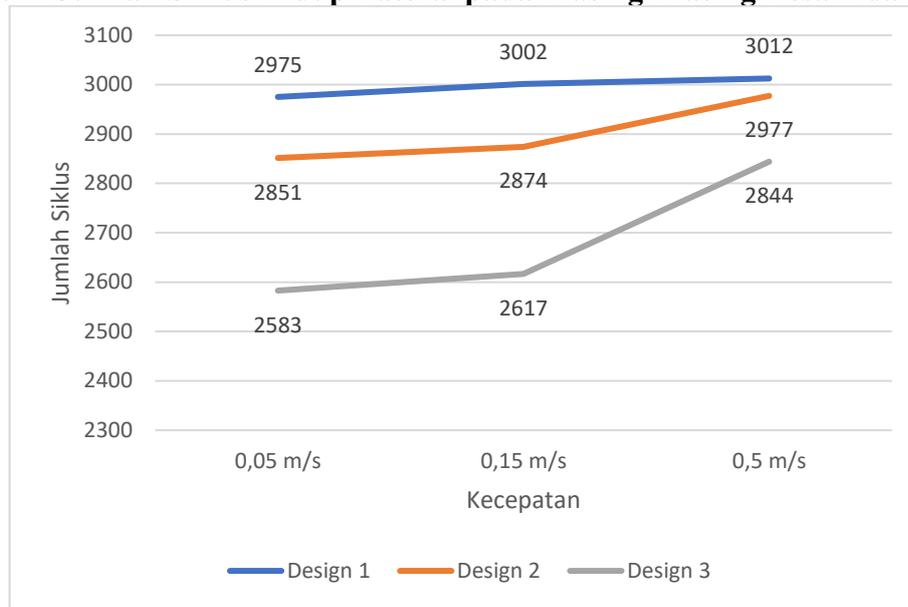
$$\text{Jumlah siklus} = \frac{A_h}{DOD \times 2}$$

$$\text{Jumlah siklus} = \frac{6003,194}{1 \times 2}$$

$$\text{Jumlah siklus} = 3001,597$$

$$\text{Jumlah siklus} \approx 3002$$

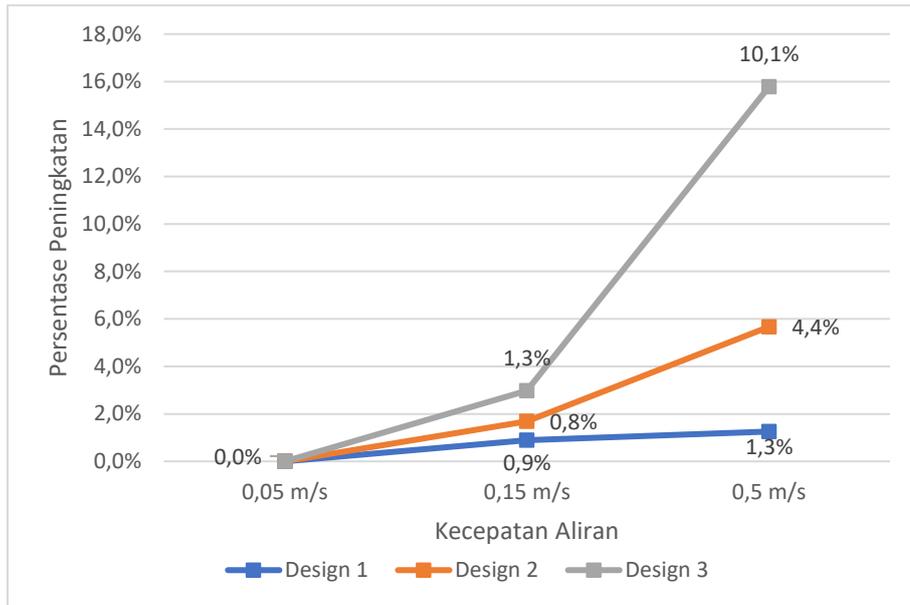
4.5.3 Grafik Jumlah Siklus Hidup Baterai pada Masing-Masing Desain dan Kecepatan



Gambar 4. 18 Grafik Jumlah Siklus Hidup Baterai pada Masing-Masing Desain dan Kecepatan

Bedasarkan perhitungan yang dilakukan sebelumnya didapatkan nilai jumlah siklus hidup pada masing-masing variasi seperti yang terlihat pada gambar 4.18. Pada gambar tersebut terlihat bahwasanya desain 1 memiliki jumlah siklus hidup yang paling tinggi pada setiap variasi kecepatan aliran. Namun, pada desain 1 terlihat bahwasanya kecepatan aliran kurang mempengaruhi jumlah siklus hidup yang dimiliki oleh baterai. Hal tersebut berbeda dengan desain 2 dan 3, dimana pada desain tersebut kecepatan aliran memiliki pengaruh yang sangat signifikan terutama pada kecepatan aliran 0,5 m/s. Persentase peningkatan siklus hidup pada masing-masing variasi kecepatan dan desain dapat dilihat pada gambar 4.19. Peningkatan jumlah siklus hidup pada kecepatan tersebut dapat dikarenakan adanya peningkatan performa pendinginan sehingga temperatur yang terdapat pada baterai mengalami penurunan.

Bedasarkan persamaan 2.23 dan 2.24, jumlah siklus hidup pada baterai merupakan fungsi dari temperatur. Temperatur baterai yang semakin tinggi pada baterai akan meningkatkan laju reaksi pada baterai. Dengan meningkatnya laju reaksi pada baterai maka laju degradasi yang terjadi pada elektroda juga akan semakin meningkat. Hal tersebut menyebabkan baterai dengan temperatur yang semakin rendah cenderung memiliki jumlah siklus hidup yang semakin besar.



Gambar 4. 19 Grafik Persentase Peningkatan Siklus Hidup pada Masing-Masing Desain dan Kecepatan

Tabel 4. 11 Rangkuman Nilai Jumlah Siklus Hidup dan Temperatur pada Masing-Masing Desain dan Kecepatan

Variasi	Nilai	0,05 m/s	0,15 m/s	0,5 m/s
Design 1	Temp. Rata-Rata	41,87	41,74	41,69
	Jumlah Siklus Hidup	2975	3002	3012
Design 2	Temp. Rata-Rata	42,51	42,39	41,86
	Jumlah Siklus Hidup	2851	2874	2977
Design 3	Temp. Rata-Rata	44,01	43,81	42,55
	2582,898003	2617	2844	2767

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Bedasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan air pada pendinginan *hybrid* dapat menurunkan temperatur baterai dan *liquid fraction* PCM secara signifikan. Hal tersebut dikarenakan air dapat mendinginkan PCM sehingga memperlambat waktu leleh PCM yang menyebabkan PCM dapat menyerap panas lebih banyak. Pada pendinginan *hybrid* didapatkan nilai temperatur rata-rata baterai sebesar 44,009 °C dan *liquid fraction* 0,156. Pada pendinginan hanya PCM didapatkan nilai temperatur sebesar 50,264 °C dan *liquid fraction* 0,741.
2. Semakin cepat aliran pada *cold column* menyebabkan aliran memiliki nilai koefisien konveksi yang semakin tinggi sehingga temperatur rata-rata pada baterai akan semakin rendah. Peningkatan koefisien konveksi terbesar terjadi pada saat aliran mengalami turbulensi, yakni pada kecepatan 0,5 m/s di desain 2 dan 3. Hal tersebut menyebabkan kecepatan 0,5 m/s memiliki temperatur baterai yang paling rendah di setiap desain. Sedangkan, nilai koefisien konveksi terendah terdapat pada kecepatan 0,05 m/s di setiap desain. Hal tersebut menyebabkan kecepatan 0,05 m/s memiliki temperatur yang paling tinggi di setiap desain. Pada desain 1, nilai temperatur pada kecepatan aliran 0,05 m/s; 0,15 m/s; dan 0,5 m/s secara berurutan adalah 41,874°C; 41,741 °C; dan 41,687 °C. Pada desain 2, nilai temperatur pada kecepatan aliran 0,05 m/s; 0,15 m/s; dan 0,5 m/s secara berurutan adalah 42,512 °C; 42,394 °C; dan 41,863 °C. Pada desain 3, nilai temperatur pada kecepatan aliran 0,05 m/s; 0,15 m/s; dan 0,5 m/s secara berurutan adalah 44,009°C; 43,813 °C; dan 42,551 °C.
3. Semakin besar area yang kontak dengan aliran menyebabkan perpindahan panas yang terjadi dari struktur baterai ke aliran semakin besar sehingga temperatur rata-rata pada baterai akan semakin rendah. Dari ketiga desain yang disimulasikan pada kecepatan yang sama, nilai temperatur terendah secara berurutan terdapat pada desain 1, desain 2, dan desain 3. Pada kecepatan 0,5 m/s, nilai temperatur pada desain 1, 2, dan 3 secara berurutan adalah 41,687 °C; 41,863 °C; dan 42,551 °C. Pada kecepatan 0,15 m/s, nilai temperatur pada desain 1, 2, dan 3 secara berurutan adalah 41,741 °C; 42,394 °C; dan 43,813 °C. Pada kecepatan 0,05 m/s, nilai temperatur pada desain 1,2, dan 3 secara berurutan adalah 41,874 °C; 42,512 °C; dan 44,009 °C.
4. Semakin besar perpindahan panas pada *cold column* menyebabkan temperatur pada baterai akan semakin rendah sehingga degradasi kapasitas yang terjadi semakin rendah dan meningkatkan jumlah siklus hidup yang dimiliki oleh baterai. Dari ketiga desain dan kecepatan yang dimiliki, desain dengan area dan kecepatan aliran terbesar memiliki siklus hidup baterai yang paling besar. Pada desain 1, jumlah siklus hidup pada kecepatan aliran 0,05 m/s; 0,15 m/s; dan 0,5 m/s secara berurutan adalah 2975, 3002, dan 3012. Pada desain 2, jumlah siklus hidup pada kecepatan aliran 0,05 m/s; 0,15 m/s; dan 0,5 m/s secara berurutan adalah 2851, 2874, dan 2977. Pada desain 3, jumlah siklus hidup pada kecepatan aliran 0,05 m/s; 0,15 m/s; dan 0,5 m/s secara berurutan adalah 2583, 2617, dan 2844.

5.2 Saran

Saran dan beberapa rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan kajian lebih lanjut terkait dengan bentuk desain *channel* yang dapat menciptakan turbulensi pada aliran sehingga dapat mengetahui bagaimana efektivitasnya terhadap *pendinginan baterai*.

2. Melakukan kajian lebih lanjut terkait dengan kemungkinan kebocoran sistem akibat perubahan kecepatan aliran air.

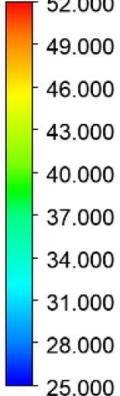
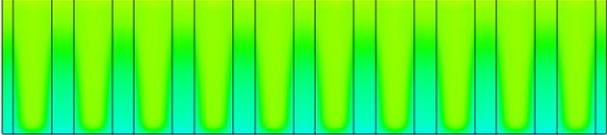
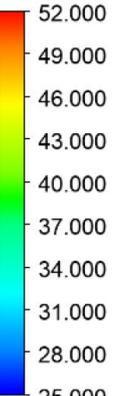
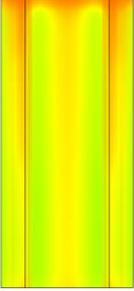
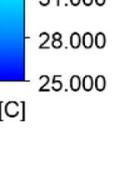
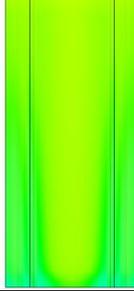
DAFTAR PUSTAKA

- Chen, F., Huang, R., Wang, C., Yu, X., Liu, H., Wu, Q., . . . Bhagat, R. (2020). Air and PCM cooling for battery thermal management considering battery cycle life. *Applied Thermal Engineering*.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Head and Mass Transfer*. New York: McGraw-Hill Education.
- Chen, J., Kang, S., E, J., Huang, Z., Wei, K., Zhang, B., . . . Liao, G. (2019). Effects of different phase change material thermal management strategies on the cooling performance of the power lithium ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*.
- Choudhari, V., Dhoble, D., & Sathe, T. (2020). A review on effect of heat generation and various thermal management systems for lithium ion battery used for electric vehicle. *Journal of Energy Storage*.
- Dieng, J., Bae, C., Denliger, A., & Miller, T. (2020). Electric Vehicles Batteries: Requirements and Challenges. *Joule cell press*.
- Incropera, D. B. (2006). *Fundamental of Heat Transfer 6 th Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
- Kim, J., Oh, J., & Lee, H. (2018). Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles. *Applied Thermal Engineering*.
- Perdana, F. (2020). BATERAI LITHIUM. *INKUIRI: Jurnal Pendidikan IPA*.
- Pinto, R. N., Afzal, A., D'Souza, L. V., Ansari, Z., & Samee, A. (2016). Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery: A Review of State of the Art. *Cross Mark*.
- Skovajsa, J., & Zalesak, M. (2018). The Use of the Photovoltaic System in Combination With a Thermal Energy Storage for Heating and Thermoelectric Cooling. *Applied sciences*.
- Song, L., Zhang, H., & Yang, C. (2019). Thermal analysis of conjugated cooling configurations using phase change material and liquid cooling techniques for a battery module. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Tu, J., Yeoh, G. H., Liu, C., & Tao, Y. (2021). *Computational Fluid Dynamics 4th Edition : A Practical Approach*. Elsevier.
- Vidyanandan, K. (2019). Batteries for Electric Vehicles. *ResearchGate*.
- Wang, J., Liu, P., Garner, J. H., Sherman, E., Soukiazian, S., Verbrugge, M., . . . Finamore, P. (2011). Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells. *Journal of Power Sources*.
- Wazeer, A., Das, A., Abeykoon, C., Sinha, A., & Karmakar, A. (2022). Phase change materials for battery thermal management of electric and hybrid vehicles: A review. *Energy Nexus*.
- Zhang, H., Wu, X., Wu, Q., & Xu, S. (2019). Experimental Investigation of Thermal Performance of Large-Sized Battery Module Using Hybrid PCM and Bottom Liquid Cooling Configuration. *Applied Thermal Engineering*.

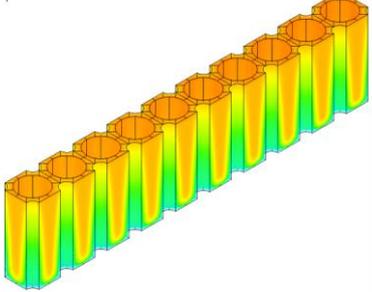
LAMPIRAN

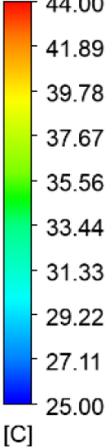
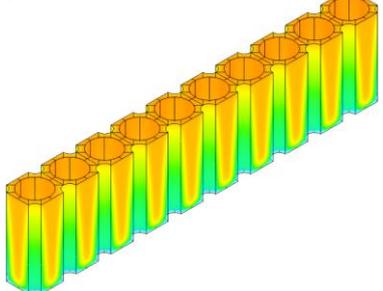
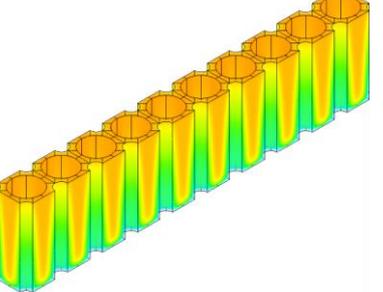
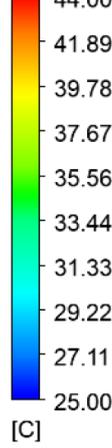
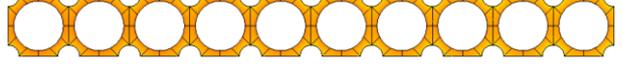
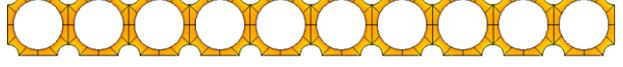
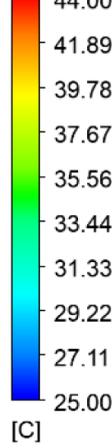
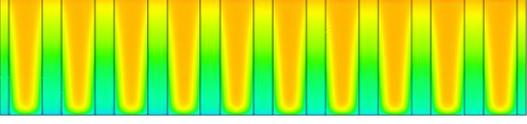
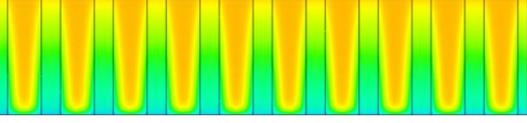
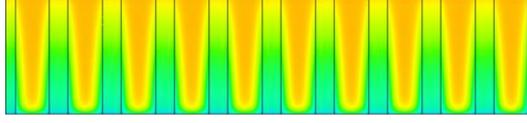
Kontur Temperatur PCM pada Pendinginan Hanya PCM dan Pendinginan *Hybrid*

Kecepatan	Legend	Isometric View
Hanya PCM	<p style="text-align: center;">Temperature Volume Rendering 1</p> <p style="text-align: center;">52.000 49.000 46.000 43.000 40.000 37.000 34.000 31.000 28.000 25.000 [C]</p>	
<i>Hybrid</i>		
Kecepatan	Legend	Top View
Hanya PCM	<p style="text-align: center;">Temperature Volume Rendering 1</p> <p style="text-align: center;">52.000 49.000 46.000 43.000 40.000 37.000 34.000 31.000 28.000 25.000 [C]</p>	
<i>Hybrid</i>		
Kecepatan	Legend	Side View
Hanya PCM		

<i>Hybrid</i>	<p>Temperature Volume Rendering 1</p>  <p>[C]</p>	
Kecepatan	Legend	Front View
Hanya PCM	<p>Temperature Volume Rendering 1</p>  <p>[C]</p>	
<i>Hybrid</i>	<p>Temperature Volume Rendering 1</p>  <p>[C]</p>	

Kontur Temperatur PCM pada Desain 1

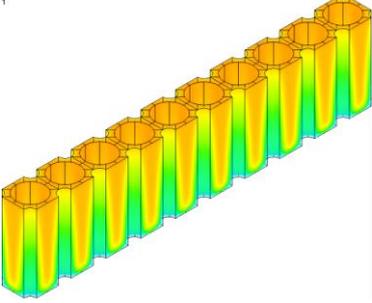
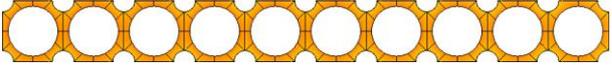
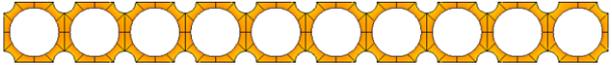
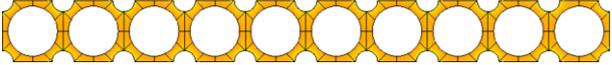
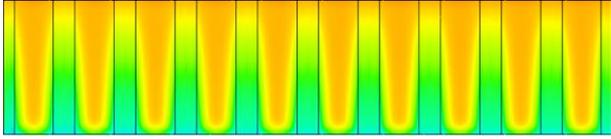
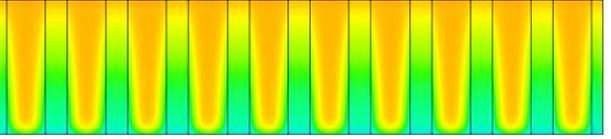
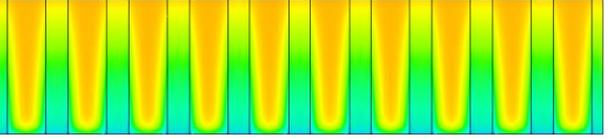
Kecepatan	Legend	Isometric View
0,05 m/s		

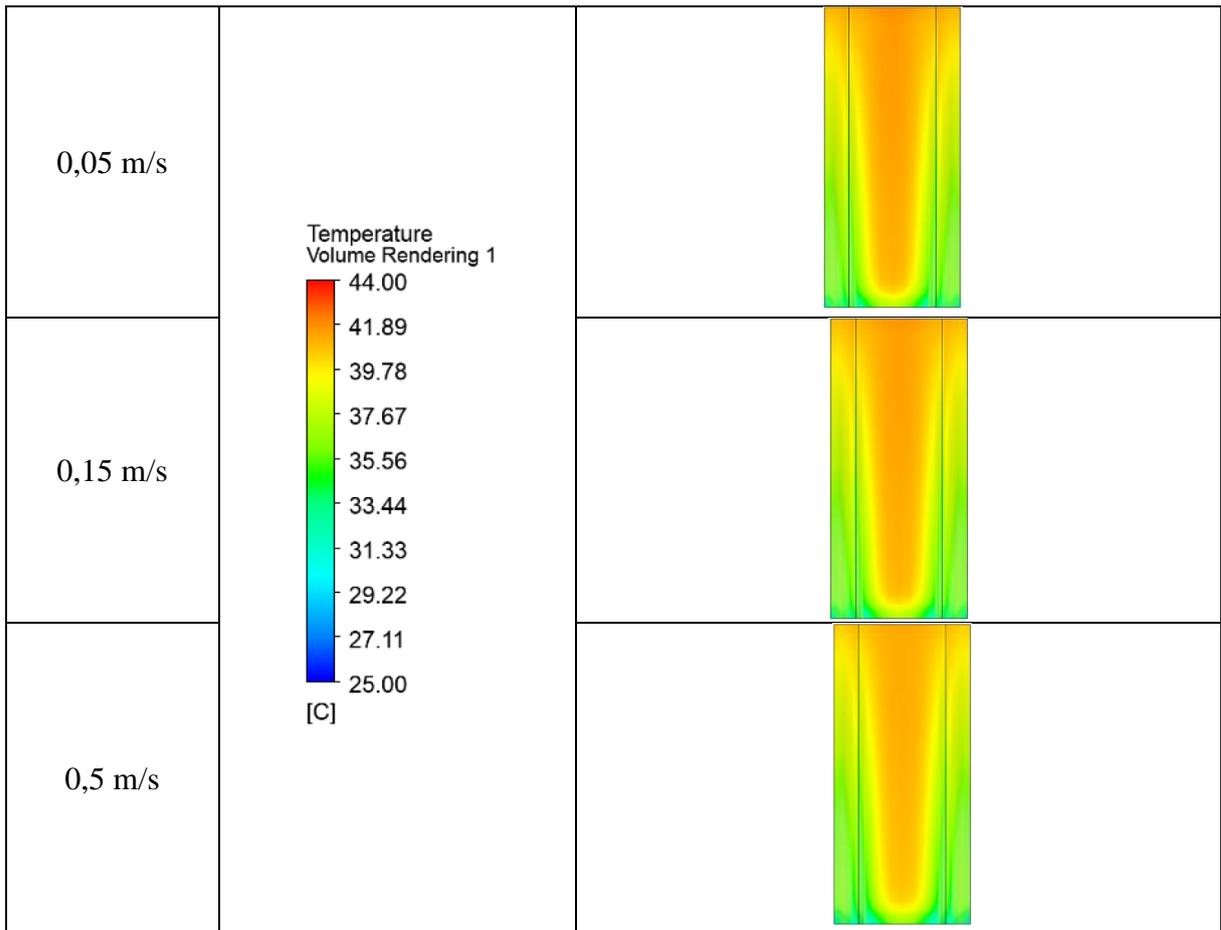
0,15 m/s	<p>Temperature Volume Rendering 1</p>  <p>[C]</p>	
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Top View
0,05 m/s	<p>Temperature Volume Rendering 1</p>  <p>[C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Side View
0,05 m/s	<p>Temperature Volume Rendering 1</p>  <p>[C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		

Kecepatan	Legend	Front View
0,05 m/s	<p>Temperature Volume Rendering 1</p> <p>44.00 41.89 39.78 37.67 35.56 33.44 31.33 29.22 27.11 25.00 [C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		

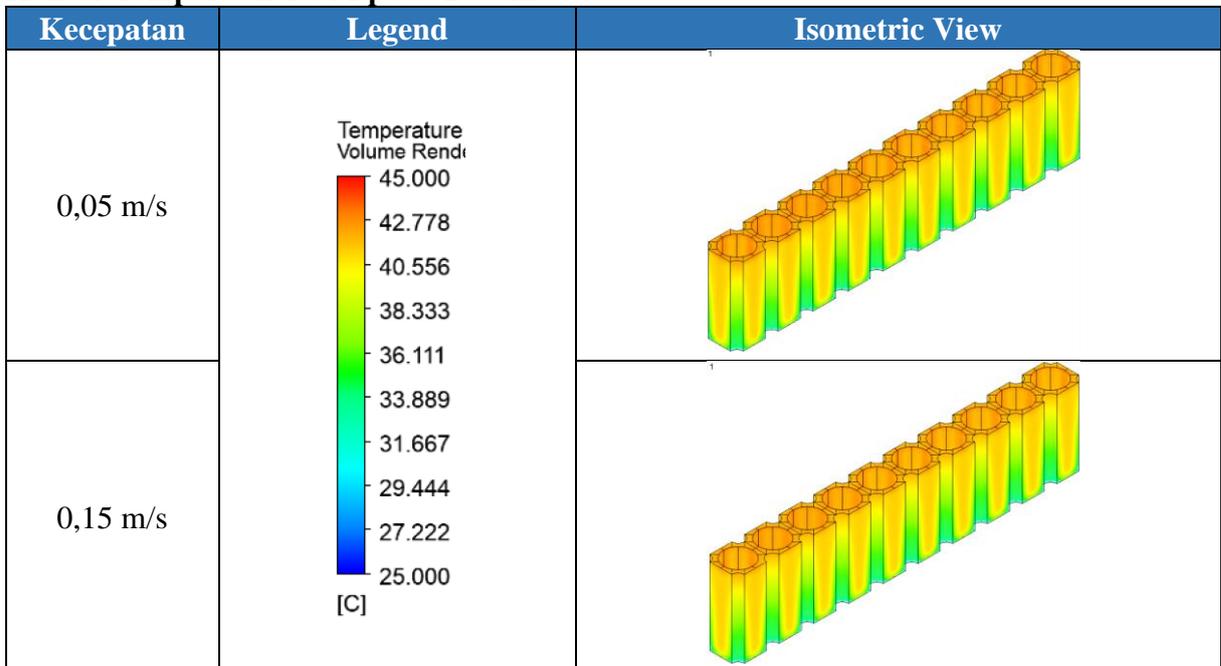
Kontur Temperatur PCM pada Desain 2

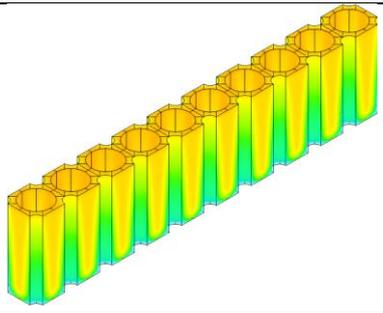
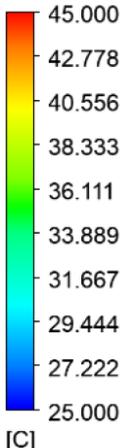
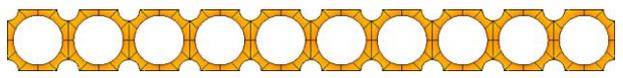
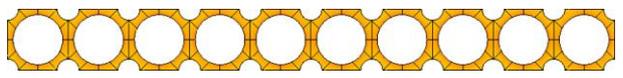
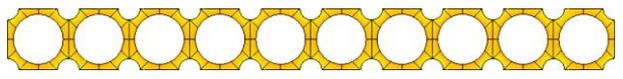
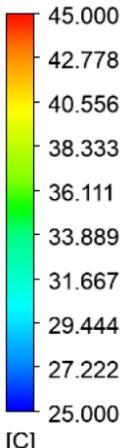
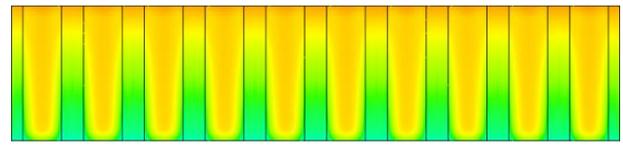
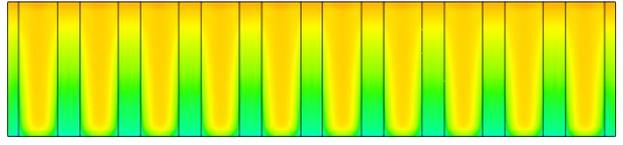
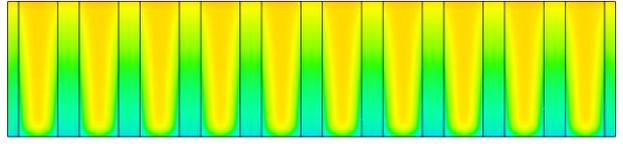
Kecepatan	Legend	Isometric View
0,05 m/s	<p>Temperature Volume Rendering 1</p> <p>44.00 41.89 39.78 37.67 35.56 33.44 31.33 29.22 27.11 25.00 [C]</p>	
0,15 m/s		

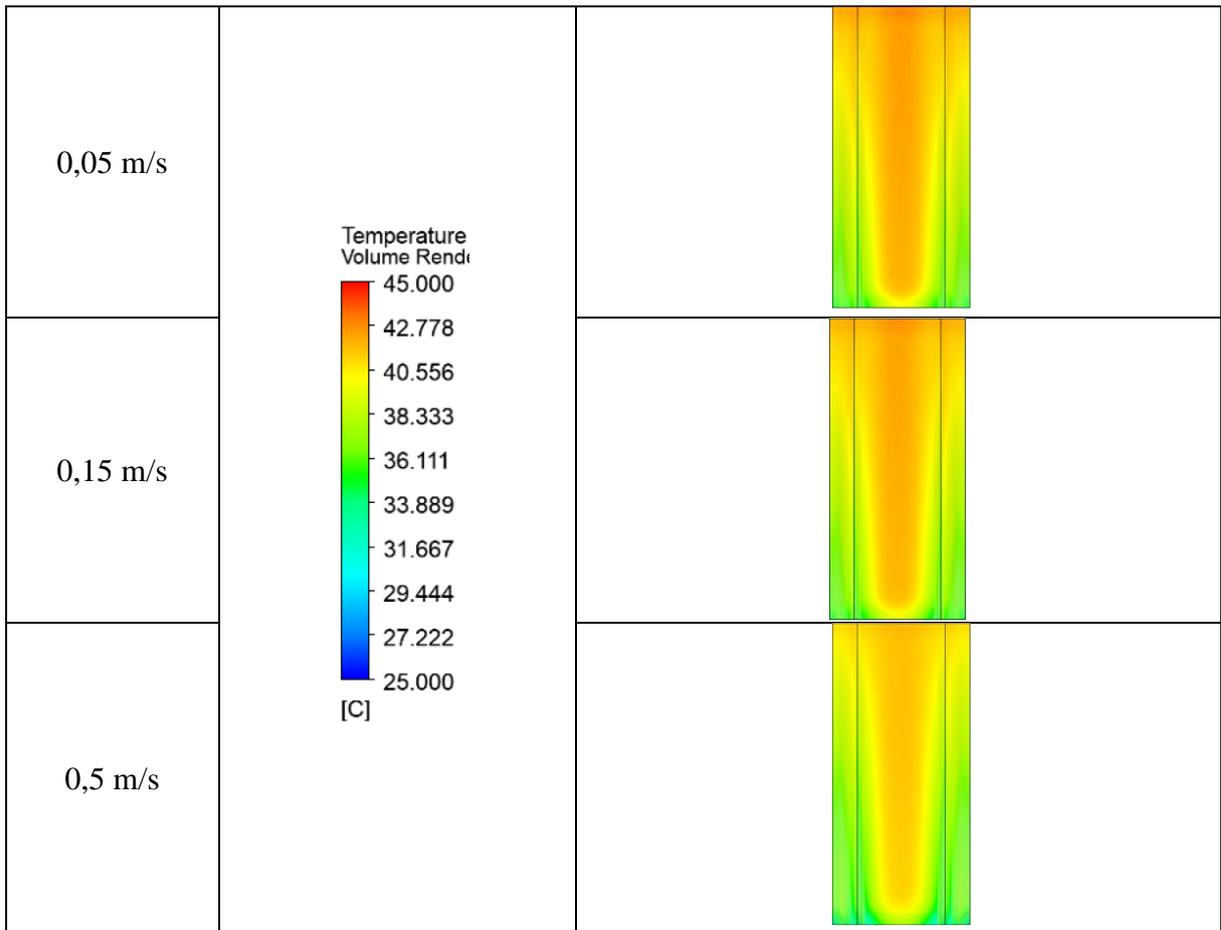
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Top View
0,05 m/s	<p>Temperature Volume Rendering 1</p>  <p>44.00 41.89 39.78 37.67 35.56 33.44 31.33 29.22 27.11 25.00 [C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Side View
0,05 m/s	<p>Temperature Volume Rendering 1</p>  <p>44.00 41.89 39.78 37.67 35.56 33.44 31.33 29.22 27.11 25.00 [C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Front View



Kontur Temperatur PCM pada Desain 3



0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Top View
0,05 m/s	<p data-bbox="550 593 686 649">Temperature Volume Rend:</p>  <p data-bbox="550 1075 582 1108">[C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Side View
0,05 m/s	<p data-bbox="550 1171 686 1227">Temperature Volume Rend:</p>  <p data-bbox="550 1653 582 1686">[C]</p>	
0,15 m/s		
0,5 m/s		
Kecepatan	Legend	Front View



Reynold Number Aliran Air pada Cold Column

Desain	Kecepatan	Reynold Number
1	0,5	1794,52
	0,15	538,36
	0,05	179,45
2	0,5	4486,29
	0,15	1345,89
	0,05	448,63
3	0,5	6211,79
	0,15	1863,54
	0,05	621,18

Hydrodynamic Entry Length Aliran Air pada Cold Column

Desain	Kecepatan	Xfd (cm)
1	0,5	28,71
	0,15	8,61
	0,05	2,87
2	0,5	179,45
	0,15	53,84
	0,05	17,95

3	0,5	344,04
	0,15	103,21
	0,05	34,40

Thermal Entry Length Aliran Air pada Cold Column

Desain	Kecepatan	Xft (cm)
1	0,5	176,01
	0,15	52,80
	0,05	17,60
2	0,5	1100,04
	0,15	330,01
	0,05	110,00
3	0,5	2108,95
	0,15	632,69
	0,05	210,90

Nusselt Number Aliran Air pada Cold Column

Desain	Kecepatan	Nusselt Number
1	0,5	8,57
	0,15	5,76
	0,05	4,51
2	0,5	34,33
	0,15	10,84
	0,05	7,25
3	0,5	48,02
	0,15	13,86
	0,05	9,16

Koefisien Konveksi Aliran Air pada Cold Column

Desain	Kecepatan	Coefficient Convection (W/m ² K)
1	0,5	1606,01
	0,15	1079,64
	0,05	846,07
2	0,5	2575,00
	0,15	812,73
	0,05	543,60
3	0,5	2601,28
	0,15	750,80
	0,05	495,99

BIOGRAFI PENULIS



I Putu Harry Arya Bagiada lahir di Tabanan, 23 Januari 2003. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Riwayat pendidikan penulis adalah SDN 1 Baha, SMPN 1 Mengwi SMAN 1 Kuta Utara , dan ke jenjang sarjana di Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS pada tahun 2020 dengan NRP 5007201202. Selama menempuh pendidikan sarjana, penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi atau kepanitian. Adapun organisasi dan kepanitian yang diikuti adalah TPKH ITS sebagai ketua departemen internal pada tahun 2023, Ini Lho ITS! Forda Bali sebagai ketua, dan Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin sebagai staff deparement kewirausahaan pada tahun 2022. Dalam kegiatan akademik, penulis sempat menjadi asisten praktikum mata kuliah perpindahan panas. Apabila terdapat saran dan masukan untuk penulis terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email harryarya75@gmail.com