



TUGAS AKHIR - TF 141581

**ANALISIS MANAJEMEN TERMAL PADA
SISTEM PENDINGIN SEL BATERAI LI-ION
BENTUK PRISMATIK DENGAN VARIASI LAJU
ALIRAN MASSA DAN LEBAR CHANNEL
MENGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL
FLUID DYNAMICS (CFD)**

**LAURIEN MERINDA
NRP. 2413 100 046**

**Dosen Pembimbing :
Ir. Roekmono, M.T.
Nur Laila Hamidah, S.T.,M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

“Halaman ini memang dikosongkan”



FINAL PROJECT - TF 141581

**ANALYSIS OF THERMAL MANAGEMENT IN
LITIUM ION BATTERY BY APPLYING
COOLING SYSTEM WITH MASS FLOW RATE
AND CHANNEL WIDTH VARIATION USING
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)**

**LAURIEN MERINDA
NRP. 2413 100 046**

Supervisors :
Ir. Roekmono, M.T.
Nur Laila Hamidah, S.T.,M.Sc.

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017**

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

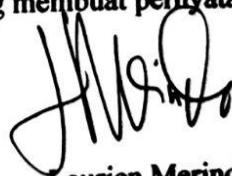
Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Laurien Merinda
NRP : 2413100046
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Manajemen Termal pada Sistem Pendingin Sel Baterai Li-ion Bentuk Prismatik dengan Variasi Laju Aliran Massa dan Lebar *Channel* Menggunakan Metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD)” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 20 Juni 2017
Yang membuat pernyataan,



Laurien Merinda
NRP. 2413100046

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

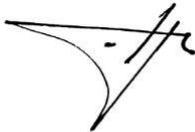
**ANALISIS MANAJEMEN TERMAL PADA SISTEM
PENDINGIN SEL BATERAI LI-ION BENTUK
PRISMATIK DENGAN VARIASI LAJU ALIRAN MASSA
DAN LEBAR CHANNEL MENGGUNAKAN METODE
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)**

Oleh:

Laurien Merinda
NRP. 2413 100 046

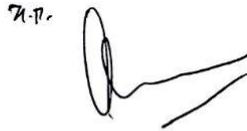
Surabaya, 20 Juni 2017

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I



Ir. Roekmono, M.T.
NIPN. 195809081986011001

Menyetujui,
Dosen Pembimbing II



Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.
NIPN. 19880710201504001

Mengetahui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 197809022003121002

“Halaman ini memang dikosongkan”

**ANALISIS MANAJEMEN TERMAL PADA SISTEM
PENDINGIN SEL BATERAI LI-ION BENTUK
PRISMATIK DENGAN VARIASI LAJU ALIRAN MASSA
DAN LEBAR CHANNEL MENGGUNAKAN METODE
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)**

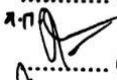
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Pengkondisian Lingkungan dan Konservasi Energi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

LAURIEN MERINDA
NRP. 2413 100 046

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Ir. Roekmono, M.T.  (Pembimbing I)
2. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.  (Pembimbing II)
3. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D  (Penguji I)
4. Ir. Sarwono, M.M.  (Penguji II)
5. Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng. (Penguji III)

SURABAYA
JUNI, 2017

“Halaman ini memang dikosongkan”

**ANALISIS MANAJEMEN TERMAL PADA SISTEM
PENDINGIN SEL BATERAI LI-ION BENTUK
PRISMATIK DENGAN VARIASI LAJU ALIRAN MASSA
DAN LEBAR CHANNEL MENGGUNAKAN METODE
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)**

Nama : Laurien Merinda
NRP : 2413 100 046
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Roekmono, M.T.
2. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

Abstrak

Baterai Litium Ion sebagai sistem penyimpanan energi memegang peranan kunci dalam pengembangan kendaraan listrik. Hal ini dikarenakan untuk menciptakan kendaraan listrik yang memiliki efisiensi tinggi, dibutuhkan baterai dengan *specific power density* dan *specific energy density* yang tinggi. Diantara banyak kelebihan yang dimiliki, Litium Ion sangat sensitif terhadap temperatur. Sehingga untuk menjaga keamanan dan performansi dari baterai Litium Ion, dibutuhkan sistem manajemen termal berupa pendingin berbentuk *mini channel cold plate* menggunakan fluida pendingin berupa air. Pengaruh inlet laju aliran massa air dan lebar dari *channel* dianalisa dalam penelitian ini. Hasil menunjukkan bahwa sistem pendingin berbentuk *mini channel cold plate* menggunakan fluida pendingin air memiliki performansi pendinginan yang efisien dalam menjaga temperatur baterai di bawah temperatur operasi. Performansi pendinginan meningkat seiring dengan semakin besarnya inlet laju aliran massa air, namun laju aliran massa air lebih dari 1×10^{-3} kg/s tidak berpengaruh terhadap pola penurunan temperatur baterai sehingga inlet laju aliran massa air yang terlalu besar dinilai tidak efisien. Selain itu, variasi perubahan lebar *channel* hanya berdampak kecil terhadap performansi pendinginan baterai namun berdampak besar terhadap *pressure drop* aliran air dalam *channel*. Lebar *channel* yang semakin besar membuat *pressure drop* turun menjadi setengahnya

dan lebar *channel* yang paling efektif adalah 8 mm. Peningkatan laju aliran massa air merupakan metode efektif untuk menurunkan temperatur maksimum sel baterai Litium Ion, namun harus diimbangi dengan memperlebar *channel* plat pendingin agar dapat menurunkan *pressure drop* dan mengurangi konsumsi energi di sistem pendingin baterai.

Kata Kunci: Baterai Litium Ion, Mini Channel Cold Plate, Sistem Manajemen Termal Baterai

ANALYSIS OF THERMAL MANAGEMENT IN LITHIUM ION BATTERY BY APPLYING COOLING SYSTEM WITH MASS FLOW RATE AND CHANNEL WIDTH VARIATION USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

Name : Laurien Merinda
NRP : 2413 100 046
Departement : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisor : 1. Ir. Roekmono, M.T.
2. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

Abstract

Lithium Ion Battery as energy storage system is the key to electric vehicle development. In order to develop high efficiency electric vehicle, the need of battery with a high specific power density and energy density is a must. Despite of many advantage, lithium ion batteries are very sensitive to temperature. Hence, to guarantee the safety and performance of battery, mini channel cold plate based battery thermal management system is necessary. The effect of water mass flowrate and width channel were investigated. The results showed that the mini channel cold plate thermal management system provided good cooling performance to keep the battery below operational temperature. Cooling performance improved with the increase of inlet mass flow rate but increasing the the value over 1×10^{-3} kg/s did not impact in decreasing the battery temperature. Additionally, the width of channel only has small impact to cooling performance but has a big different to pressure drop inside the channel. the wider channel decrease the pressure drop inside the channel and 8 mm is the most efective width channel among others. Increasing inlet mass flow rate is the effective method to decrease the maximum temperature of battery and also increasing the width channel need to be considered because it has effect on pressure drop and energy consumption on battery cooling system

***Keywords : Lithium Ion Battery, Mini Channel Cold Plate,
Battery Thermal Management System***

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **ANALISIS MANAJEMEN TERMAL PADA SISTEM PENDINGIN SEL BATERAI LI-ION BENTUK PRISMATIK DENGAN VARIASI LAJU ALIRAN MASSA DAN LEBAR CHANNEL MENGGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)**.

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Bapak Ir. Roekmono, M.T. dan Ibu Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc., selaku pembimbing tugas akhir yang senantiasa memberikan bimbingan, motivasi, dan arahan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D., selaku kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah mendukung kegiatan simulasi.
4. Bapak Sarwono, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng selaku penguji tugas akhir yang telah memberikan banyak masukan untuk perbaikan isi tugas akhir ini.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc. selaku dosen wali yang selalu memberikan motivasi dan bimbingan kepada penulis selama perkuliahan.
6. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah banyak memberikan ilmunya sehingga penulis dapat menyelesaikan jenjang kuliah hingga tugas akhir ini.

7. Bapak Kustiarto, Ibu Fatimah, Ariko dan seluruh keluarga tercinta yang selalu memberi doa serta dukungan kepada penulis.
8. Thalita Maysha, Fardan Sentosa dan Miftakh Hanifan yang telah banyak menyempatkan waktu untuk berdiskusi tentang simulasi dan topik penelitian ini.
9. Teman – teman KSE Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan atas segala dukungan dan bantuannya.
10. Teman – teman angkatan 2013, 2014, 2015, lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu.
11. Semua Pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, 20 Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	I
Lembar Pengesahan.....	VII
Abstrak	XI
Abstract	XIII
Kata Pengantar	XV
Daftar Isi.....	XVII
Daftar Gambar.....	XIX
Daftar Tabel.....	XXI
Daftar Notasi	XXIII
Bab I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Laporan.....	4
Bab II Tinjauan Pustaka	7
2.1 Baterai.....	7
2.2 Baterai Litium Ion	8
2.3 Sistem Manajemen Termal pada Baterai.....	11
2.4 Sistem Manajemen Termal pada Baterai Litium Ion	12
2.5 Metode Pendinginan pada Baterai Litium Ion	12
2.6 Perhitungan Heat Generation Pada Baterai	14
2.7 Perpindahan Panas pada Sistem Pendingin Liquid.....	15
2.8 Computational Fluid Dynamics	19
Bab III Metodologi Penelitian.....	21
3.1 Pengumpulan Data.....	22
3.2 Simulasi Sistem Manajemen Termal Baterai	24
3.3 Pengambilan Data.....	30
3.4 Analisa Data	30
3.5 Penarikan Kesimpulan	30
3.6 Penutup	30
Bab IV Analisa Hasil Dan Pembahasan	31

4.1 Validasi.....	31
4.2 Analisis Pengaruh Laju aliran massa.....	31
4.3 Analisis Pengaruh Lebar Channel.....	37
4.4 Pembahasan	42
Bab V Penutup	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran	50
Daftar Pustaka	51
Lampiran I.....	53
Lampiran II.....	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prinsip Kerja Baterai.....	8
Gambar 2.2 Aliran Ion Litium dalam Sel Baterai.....	9
Gambar 2.3 Komponen Baterai Litium Ion	9
Gambar 2.4 Hydraulic Diameter (D_h) dalam Berbagai Geometri Tube	16
Gambar 2.5 Bilangan Nusselt dan Friction Factor Untuk Beragam Jenis Pipa / Duct	18
Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir	21
Gambar 3.2 Geometri Sel Baterai (atas) Beserta Plat Pendingin (Bawah).....	25
Gambar 3.3 Hasil Pembuatan Geometri pada Software	26
Gambar 3.4 Hasil Meshing Salah Satu Variasi Geometri.....	26
Gambar 4.1 Kontur Plat Pendingin Baterai Litium Ion dengan Laju Aliran Massa Air (a) 10^{-3} kg/s, (b) 10^{-4} kg/s dan (c) 10^{-5} kg/s	32
Gambar 4.2 Kontur Baterai Litium Ion Ketika Dengan Pendingin dengan Laju Aliran Massa Air Sebesar (a) 10^{-3} kg/s , (b) 10^{-4} kg/s dan (c) 10^{-5} kg/s	34
Gambar 4.3 Kontur Temperatur Fluida Pendingin dalam Channel dengan Variasi Laju Aliran Massa (a) 10^{-3} kg/s , (b) 10^{-4} kg/s dan (c) 10^{-5} kg/s.....	35
Gambar 4.4 Kontur Kecepatan Air dalam Channel dengan Variasi Mass Flowrate (a) 1.10^{-3} kg/s ,(b) 1.10^{-4} kg/s, dan (c) 1.10^{-5} kg/s	36
Gambar 4.5 Kontur Plat Pendingin dengan Variasi Lebar Channel (a) 3mm, (b) 6mm, dan (c) 8 mm	37
Gambar 4.6 Kontur temperatur Baterai Saat Lebar Channel (s) 3 mm, (b) 6 mm dan (c) 8 mm	38
Gambar 4.7 Kontur Kecepatan Aliran Air dalam Channel dengan Variasi Lebar Channel (a) 3 mm, (b) 6 mm, dan (c) 8 mm	39
Gambar 4.8 Kontur Tekanan Air dalam Channel dengan Variasi Lebar Channel (a) 3 mm, (b) 6 mm dan (c) 8 mm.....	40

- Gambar 4.9** Kontur Temperatur Air dengan Lebar Channel (a) 3 mm, (b) 6 mm dan (c) 8 mm41
- Gambar 4.10** Grafik Temperatur Maksimum (a) dan Delta Temperatur (b) Sel Baterai dengan Lebar channel 8 mm dan Mass Flow Rate yang Divariasikan43
- Gambar 4.11** Grafik Temperatur Maksimum (a) dan Delta Temperatur (b) Sel Baterai dengan mass flowrate 0,001 kg/s dan Lebar Channel yang Divariasikan44

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Litium Ion chemistries (Warner, 2015)	10
Tabel 3.1	Tabel Spesifikasi Baterai Litium Ion(Seifert, 2012).....	22
Tabel 3.2	Tabel Spesifikasi Air	23
Tabel 3.3	Tabel Spesifikasi Plat Pendingin Alumunium	23
Tabel 3.4	Tabel Hasil Meshing.....	26
Tabel 3.5	Tabel Kondisi Batas pada Simulasi dengan Metode CFD	27
Tabel 4.1	Pengaruh Variasi Lebar Channel terhadap Kecepatan Aliran Air dan Laju Transfer Panas	46
Tabel 4.2	Pengaruh Variasi Laju Aliran Massa Air terhadap Kecepatan Aliran Air dan Laju Transfer Panas....	46
Tabel 4.3	Pengaruh Variasi Laju Aliran Massa Air terhadap Pressure Drop Aliran dan Kecepatan Aliran	46
Tabel 4.4	Pengaruh Variasi Lebar Channel terhadap Pressure Drop Aliran dan Kecepatan Aliran.....	47

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR NOTASI

ΔS	: perubahan entropi per satuan waktu ($J s^{-1} K^{-1}$)
T_b	: temperatur baterai (K)
F	: konstanta faraday ($965,85 C mol^{-1}$)
I	: arus discharge (A)
R_t	: total resistansi saat proses discharge baterai (Ω)
R_e	: resistansi saat $I=0$ (Ω)
ρ_b	: densitas baterai ($kg m^{-3}$)
c_{pb}	: kapasitas panas baterai ($J kg^{-1} K^{-1}$)
k_b	: konduktivitas material baterai ($W m^{-1} K^{-1}$)
\vec{v}	: vektor kecepatan air ($m s^{-1}$)
Q	: laju perpindahan panas (Watt)
h	: koefisien perpindahan panas ($W/m^2 \cdot K$)
T_s	: temperatur permukaan
T_∞	: temperatur lingkungan
D	: diameter pipa (m)
V_m	: kecepatan aliran fluida (m/s)
ν	: viskositas kinematik (m^2/s)
R	: resistansi termal (K/W)
A	: luas area (m^2)
r_2	: diameter luar lingkaran (m)
r_1	: diameter dalam lingkaran (m)
k	: konduktivitas termal ($W/m \cdot K$)
L	: panjang pipa (m)
P	: daya pompa (Watt)
V_{in}	: kecepatan <i>inlet</i> (m/s)
A_{in}	: luasan <i>inlet</i> (m^2)
ΔP	: <i>pressure drop</i> (Pa)

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berkembangnya isu tentang kelangkaan energi yang berasal dari alam dan pencemaran lingkungan akibat polusi mendorong perusahaan – perusahaan yang bergerak di bidang manufaktur mobil untuk menciptakan kendaraan yang *green energy* (Rao & Wang, 2011). Salah satu kendaraan yang sedang dikembangkan adalah *pure electric vehicle* (EVs) dan *hybrid electric vehicle* (HEVs) (Qian, Li, & Rao, 2016). EVs dan HEVs memiliki efisiensi energi yang tinggi, mengurangi kebisingan dan lebih bersih dibanding kendaraan konvensional (Mahamud & Park, 2011). Daya pada baterai memegang peranan kunci dalam pengembangan kendaraan listrik. Hal ini dikarenakan untuk menciptakan kendaraan listrik yang memiliki efisiensi tinggi, dibutuhkan baterai dengan *specific power density* dan *specific energy density* yang tinggi. Beragam jenis baterai seperti lead acid, zinc/halogen, metal/air, sodium-beta, nickel metal hydride (Ni-MH) dan litium-ion (Li-ion) dapat digunakan untuk menyuplai daya ke kendaraan listrik. Namun dari beragam jenis baterai yang telah ada, Li-ion menjadi yang paling menjanjikan untuk digunakan sebagai penyimpanan energi kendaraan listrik dikarenakan *energy density* yang tinggi, lebih ringan, tidak memiliki *memory effect*, *self discharge* yang rendah dibanding dengan baterai sekunder jenis lain, *long driving range* dan *fast acceleration capability* (J. Zhao, Rao dkk, 2015; R. Zhao, Zhang dkk, 2015).

Beragam kelebihan dari baterai Li-ion ini menjadikan penelitian tentang Li-ion yang telah dilakukan sebelumnya banyak berfokus kepada aspek pengembangan material baterai untuk meningkatkan *specific energy*, daya, dan *cycle life* dibanding masalah yang berhubungan dengan termalnya. Salah satu hal yang berkaitan dengan termal pada Baterai Li ion adalah sifatnya yang sangat sensitif terhadap suhu (Greco, Cao, Jiang, & Yang, 2014). Hal ini merupakan permasalahan penting karena suhu operasi pada

baterai Li-ion sangat erat kaitannya dengan performansi baterai, *cycle life*, dan *safety* baterai. Selama proses charge dan discharge terjadi peningkatan temperature baterai yang disebabkan oleh energi panas yang terbentuk ketika reaksi elektrokimia terjadi (Qian, 2016). Pada umumnya suhu operasional pada Li-ion berkisar antara 25° – 40° C namun jika kenaikan temperatur terlalu tinggi dapat membuat baterai *overheating* dan berpotensi meledak. Hal ini membuat sistem manajemen termal sangat dibutuhkan untuk mengatasi permasalahan pada baterai Li-ion ini.

Menurut Zhao (2015) sistem manajemen termal pada baterai secara umum terbagi menjadi dua yaitu internal dan eksternal. Sistem manajemen termal yang dilakukan secara internal biasanya dengan cara memodifikasi desain elektroda untuk meminimalisir panas yang terjadi selama reaksi elektrokimia. Sedangkan sistem manajemen termal yang dilakukan secara eksternal dengan menambahkan material atau sejenis sistem pendingin tanpa merubah komponen dalam baterai. Sistem manajemen termal eksternal lebih mudah diaplikasikan karena untuk memodifikasi komponen dalam baterai Li-ion tidaklah mudah dan terkadang baterai Li-ion buatan pabrik masih memiliki ketidaksempurnaan dalam manufakturnya sehingga potensi untuk mengalami *overheating* semakin besar. Pertimbangan ini yang menjadikan sistem manajemen termal eksternal lebih banyak digunakan.

Metode dalam sistem manajemen termal secara eksternal yang sering digunakan adalah sistem pendinginan dengan medium udara, sistem pendingin dengan medium liquid dan sistem pendinginan dengan *Phase Change Material* (PCM). Ketiga metode ini memiliki keunggulan masing – masing tergantung penggunaannya. Penelitian tentang sistem pendinginan dengan udara telah dilakukan dengan menganalisis pengaruh jarak antar *channel* dan laju aliran rata – rata pada baterai Li-ion (Peng & Jiang, 2016). Hasil penelitian itu menunjukkan bahwa jarak antar *channel* yang semakin kecil dan laju aliran rata – rata yang tinggi akan menurunkan temperatur maksimum saat proses *discharge*. Hasil penelitian ini tidak menjadikan sistem pendinginan dengan udara menjadi metode unggulan dalam sistem manajemen termal

karena sistem ini tidak dapat diaplikasikan di beberapa kondisi seperti proses *charge* dan *discharge* yang cepat. Sehingga akan sulit jika diaplikasikan untuk mendinginkan baterai skala besar. Penelitian tentang pendinginan dengan material PCM juga telah dilakukan dan mendapatkan hasil bahwa titik leleh yang rendah dari PCM sangat bermanfaat untuk menurunkan temperatur maksimum pada baterai LiFePO₄ (Rao, Wang dkk, 2016). Namun, sama dengan sistem pendinginan dengan udara, PCM juga memiliki kekurangan dalam hal konduktivitas termal yang rendah sehingga pengaplikasiannya terbatas. Penelitian yang dilakukan Zhen dengan membandingkan sistem pendinginan yang berbeda untuk baterai Li-ion mendapatkan hasil bahwa sistem pendingin dengan medium liquid memiliki performansi termal yang lebih efektif karena dapat menurunkan temperatur sebesar 14°C. Selain itu penelitian tentang desain mini *channel cold plate* pada sistem pendingin dengan medium *liquid* mendapatkan hasil bahwa temperatur maksimum baterai akan menurun seiring dengan meningkatnya jumlah *channel* dan inlet *laju aliran massa* (Huo, Rao dkk, 2015). Pengaruh geometri *channel* ternyata juga menjadi faktor penting dalam temperatur *uniformity* dalam baterai dan *pressure drop* fluidanya (Chen, Jiang, Kim, Yang, & Pesaran, 2016). Temperatur *uniformity* sendiri dapat menjadi parameter penting untuk melihat distribusi temperatur dari panas yang digenerasikan oleh baterai sehingga kedepannya sangat berguna untuk optimalisasi sistem pendingin dengan medium liquid.

Dalam penelitian tugas akhir ini penulis akan menganalisa penurunan temperatur maksimum pada baterai Litium Ion dengan adanya pengaruh variasi besarnya laju aliran massa *liquid* yang mengalir dalam plat pendingin dan lebar *channel* pada plat pendingin.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah yang akan diangkat untuk mengarahkan penelitian Tugas Akhir ini yaitu:

- a. Bagaimana pengaruh variasi besarnya laju aliran massa terhadap penurunan temperatur maksimum pada baterai Li-

ion dengan menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD) ?

- b. Bagaimana pengaruh variasi besarnya lebar *channel* terhadap penurunan temperatur maksimum pada baterai Li-ion dengan menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD) ?

1.3 Tujuan

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

- a. Mengetahui pengaruh variasi besarnya laju aliran massa terhadap penurunan temperatur maksimum pada baterai Li-ion dengan menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD)
- b. Mengetahui pengaruh variasi besarnya lebar *channel* terhadap penurunan temperatur maksimum pada baterai Li-ion dengan menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD)

1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah maka batasan masalah dari tugas akhir ini adalah :

1. Geometri yang digunakan berupa satu sel baterai jenis litium ion yang berbentuk prisma.
2. Baterai yang digunakan adalah LiCoO₂ dengan spesifikasi merujuk hasil penelitian Zhen Qian pada tahun 2016 yang berjudul *Thermal Performance Of Litium-Ion Battery Thermal Management System By Using Mini-Channel Cooling*.
3. Simulasi numerik untuk mengetahui profil aliran menggunakan *Computational Fluid Dynamics* dengan persamaan model laminar.
4. Aliran air pada sistem pendingin adalah *incompressible flow*
5. Variasi yang besarnya *laju aliran massa* berkisar antara 1×10^{-5} kg/s - 1×10^{-3} kg/s dan variasi besarnya lebar *channel* berkisar antara 3 - 8 mm.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- a. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika laporan.

b. **BAB II TEORI PENUNJANG**

Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti teori perpindahan panas dan massa serta teori tentang sistem manajemen baterai.

c. **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode dan langkah-langkah dalam penelitian.

d. **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab IV ini berisi tentang data hasil penelitian dari simulasi dengan metode CFD dan analisis termal pada sel baterai dan sistem pendingin.

e. **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baterai

Baterai merupakan media penyimpanan energi secara elektrokimia dimana baterai dapat mengubah energi kimia yang terkandung dalam material aktif baterai secara langsung menjadi energi listrik dengan reaksi elektrokimia reduksi- oksidasi (Linden & Reddy, 2002). Baterai adalah gabungan antara beberapa sel yang disusun sejajar baik secara seri atau paralel bergantung pada kebutuhan output tegangan dan kapasitasnya. Sel adalah bagian elektrokimia yang menyediakan sumber energi listrik dengan konversi energi kimia secara langsung. Satu sel dalam baterai terdiri dari tiga bagian utama yaitu elektroda, separator dan elektrolit.

a. Elektroda

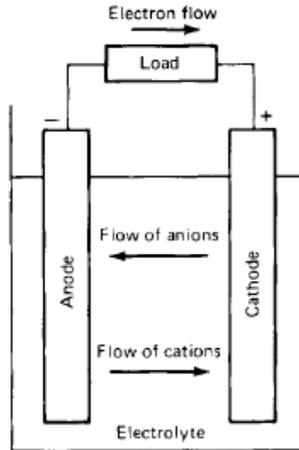
Dalam setiap sel terdapat dua keping elektroda yang merupakan anoda dan katoda. Anoda atau elektroda negatif merupakan tempat terjadinya reaksi reduksi, dimana reaksi reduksi merupakan reaksi pelepasan elektron ke *external* sirkuit dan dioksidasi selama reaksi kimia terjadi. Katoda atau elektroda positif merupakan tempat terjadinya reaksi oksidasi, dimana elektron yang mengalir di *eksternal* sirkuit akan ditangkap dan direduksi selama reaksi kimia terjadi.

b. Elektrolit

Elektrolit adalah konduktor ionik yang merupakan medium untuk transfer muatan seperti ion antara katoda dan anoda. Elektrolit umumnya tersusun oleh liquid seperti air atau alkali, asam, dan jenis solvent lainnya. Beberapa tipe baterai menggunakan elektrolit padat yang merupakan konduktor ionik pada temperatur operasi di sel.

Cara kerja baterai terbagi menjadi dua yaitu proses *discharge* dan *charge*. Proses discharge terjadi saat baterai dihubungkan ke beban listrik luar, sehingga membuat elektron yang teroksidasi mengalir dari anoda melalui eksternal sirkuit tempat beban listrik

luar berada ke dalam katoda. Di katoda, elektron akan ditangkap dan membuat material di katoda tereduksi.

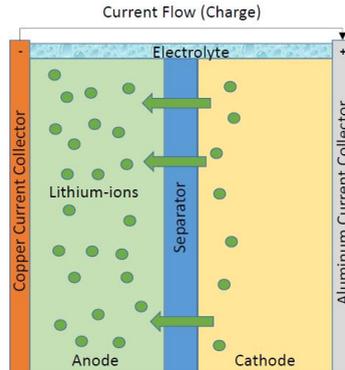


Gambar 2. 1 Prinsip Kerja Baterai (Linden & Reddy, 2002)

2.2 Baterai Litium Ion

Baterai Litium-ion pertama kali diperkenalkan secara umum pada tahun 1990 oleh Dr John Goodenough dari universitas Texas. Trendforce di tahun 2013 menyebutkan bahwa baterai litium-ion menjadi baterai dengan jumlah permintaan manufaktur terbesar mencapai 660 juta untuk sel baterai silinder dan 700 juta untuk baterai tipe *pouch*. Litium-ion menjadi baterai yang paling banyak dipilih untuk digunakan pada peralatan elektronik karena memiliki densitas energi yang lebih besar daripada baterai lain di pasaran. Baterai litium-ion bekerja seperti jenis baterai lainnya dimana proses *charging* diawali dengan berpindahnya ion-ion litium dari katoda ke anoda melalui elektrolit sebagai medium.

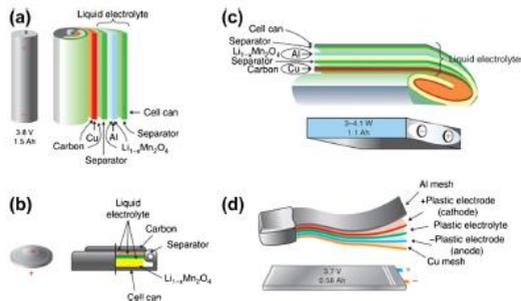
Proses *discharging* ditandai dengan ion-ion litium yang berpindah melalui elektrolit dari anoda ke katoda.



Gambar 2. 2 Aliran Ion litium dalam sel baterai
(Warner, 2015)

a. Komponen Litium ion

Komponen utama dalam baterai litium-ion terdiri dari katoda yang merupakan aluminium foil yang dibungkus dengan material katoda aktif, anoda yang merupakan *copper foil* yang dibungkus dengan material anoda aktif. Kedua *foil* dipisahkan oleh *separator* yang biasanya terbuat dari material *polypropylene* atau *polyethylene*.



Gambar 2. 3 Komponen Baterai Litium Ion
(Kurzweil, 1972)

b. Karakteristik Baterai Litium Ion

Dibandingkan dengan baterai litium-ion yang pertama kali ditemukan tahun 1990, performansi baterai litium-ion telah mengalami peningkatan signifikan yang membuatnya banyak digunakan sebagai teknologi baterai *rechargeable* baru yang memiliki banyak kelebihan.

Tabel 2. 1 Litium Ion *chemistries* (Warner, 2015)

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

Berikut adalah karakteristik dari baterai litium-ion yang membuatnya lebih unggul dibanding jenis baterai lain :

- Densitas energy yang tinggi dengan spesifik densitas energy per volume dan massa mencapai 500Wh/dm^3 dan 230Wh/kg .
- Tegangan keluaran rata-rata yang tinggi yaitu sebesar ($\sim 3,6\text{V}$) dan tiga kali lebih besar dari baterai Ni-Cd atau Ni MH.
- Daya keluaran yang tinggi dan mencapai 2000W/kg untuk waktu yang singkat.

- d. *Self-Discharge* yang lebih rendah dari baterai Ni-Cd atau Ni MH yaitu sebesar 3% perbulan.
- e. Tidak memiliki *memory effect* karena performa *cycling* yang baik membuat *memory effect* untuk baterai litium-ion tidak terlalu berdampak besar.
- f. Proses *charging* dan *discharging* yang cepat hingga mencapai 80% dari kapasitas totalnya.
- g. Efisiensi *Coulombic* yang tinggi dan biasanya masih berada pada kisaran 100% setelah siklus pertama.
- h. Kisaran temperatur operasional yang luas yaitu dari -25°C hingga 45°C.
- i. Umur siklus yang relatif panjang yaitu lebih dari 1000 kali.

2.3 Sistem Manajemen Termal pada Baterai

Sistem Manajemen Termal atau *Battery Management System* (BMS) adalah sistem kendali pada baterai yang tersusun dari satu atau lebih pengontrol elektronik yang berfungsi untuk mengatur agar proses *charging* dan *discharging* terjadi dengan baik, mengawasi suhu dan tegangan pada baterai dan menghubungkannya ke sistem di kendaraan listrik, menyeimbangkan reaksi pada sel, dan sebagai fungsi keamanan pada baterai (Warner, 2015). Dalam baterai Li-ion, BMS bertujuan untuk melindungi baterai dari *overcharging*, *overdischarging*, temperatur rendah maupun tinggi, *short circuiting* dan jenis kerusakan lainnya. Banyak peralatan elektronik seperti laptop dengan baterai Li-ion yang digunakan pada lingkungan dengan temperatur bervariasi, padahal baterai Li-ion memiliki karakteristik sensitif terhadap temperatur sehingga BMS sangatlah penting untuk menjaga temperatur baterai Li-ion agar tidak mengganggu performansi dan memperlambat *lifetime*.

a. Metode BMS

- Mengatur Baterai agar tidak Overcharge

Overcharge adalah fenomena yang terjadi saat proses *charging* tetap berjalan namun *charge voltage* melebihi *specified terminal voltage*. Hal ini mengakibatkan terjadinya reaksi

elektrokimia yang tidak diinginkan sehingga menimbulkan dekomposisi elektrolit. Sehingga BMS dibutuhkan dalam sistem *charging* untuk mengatur tegangan di setiap sel baterai.

- Mengatur baterai agar tidak *overdischarge*

Overcharge adalah fenomena yang terjadi saat tegangan *discharge* berada di bawah *specified terminal voltage* namun proses *discharge* sedang berlangsung. Hal ini dapat mengakibatkan kerusakan pada komponen dalam sel baterai dan berdampak pada umur baterai.

- Monitoring suhu saat proses *discharge* dan *charge* terjadi agar tidak *overheating*.

2.4 Sistem Manajemen Termal pada Baterai Litium Ion

Managemen termal dari sebuah baterai secara sederhana dapat digambarkan sebagai integrasi dari beberapa bentuk alat penukar panas yang dipasang di sistem baterai untuk mengatur agar temperaturnya mendekati konstan. Ada beragam metode yang dapat digunakan, namun yang banyak diaplikasikan adalah metode dengan memindahkan panas dari sel baterai keluar melalui medium tertentu (Warner, 2015).

Kompleksitas dari sistem manajemen termal baterai bergantung pada 3 faktor. Faktor pertama adalah siklus kerja dari baterai tersebut, semakin besar daya yang dibutuhkan maka sel - sel baterai akan menghasilkan panas yang besar pula. Faktor kedua adalah lingkungan dimana baterai dioperasikan. Reaksi kimia dalam baterai menjadi faktor ketiga yang mempengaruhi karena reaksi kimia berbeda akan menghasilkan temperatur operasional yang berbeda pula.

2.5 Metode Pendinginan pada Baterai Litium Ion

a. Air Cooling

Metode pendinginan dengan udara ini diklasifikasikan ke dalam dua jenis yaitu konveksi udara alami dan konveksi udara paksa. Metode pendinginan dengan udara banyak digunakan karena banyaknya keuntungan yang dimiiki seperti viskositas rendah, berat udara yang ringan, konfigurasi yang sederhana biaya

rendah dan mudah dalam hal perbaikan. Dikarenakan sifat udara yang memiliki *specific capacity* lebih rendah dari jenis medium pendingin lainnya, maka metode ini kebanyakan diaplikasikan pada baterai yang menghasilkan *heat generation* rendah. Pendinginan dengan udara ini banyak mengalami pengembangan terutama bagian variasi laju aliran udara, layout dari sel baterai dan *flow path*.

b. *Liquid Cooling*

Metode pendinginan dengan udara masih memiliki beberapa kekurangan diantaranya tidak mampu menjaga temperatur baterai yang memiliki *discharge rate* tinggi sehingga berkembanglah pendinginan dengan liquid. Dibandingkan dengan udara, liquid memiliki *specific heat capacity* yang lebih besar sehingga diharapkan akan lebih efektif dalam mengatasi *overheating* pada baterai.

- Pasif

Cara kerja mode pendinginan liquid ini adalah dengan menggunakan cairan yang memiliki kalor latent tinggi sehingga akan mudah menguap di suhu operasional baterai.

- Aktif

Jenis pendinginan dengan liquid ini menggunakan media liquid yang bergerak terus menerus di dalam *minichannel*. Jenis pendingin ini dinilai lebih efisien daripada mode pasif walaupun dikarenakan teknis susunannya lebih rumit dan membutuhkan banyak peralatan untuk membuat sistem resirkulasi liquid tersebut. Beberapa tahun terakhir terdapat beberapa penelitian tentang *active liquid cooling* dengan membandingkan performansi termal dari beberapa jenis fluida yang nantinya akan digunakan sebagai pendingin baterai. Penelitian yang dilakukan Karimi dan Dehghan telah membandingkan performansi sistem pendinginan dengan minyak silikon dan udara yang mana didapatkan hasil bahwa pendinginan dengan minyak silikon berdampak lebih besar dalam penurunan temperatur baterai saat *discharge*.

Pendinginan dengan liquid tentunya tidak dapat bekerja dengan baik jika tidak dilengkapi dengan *cold plate* atau plat pendingin yang merupakan tempat mengalirnya liquid dalam sistem pendingin dan sekaligus sebagai pemisah antara fluida dan baterai.

2.6 Perhitungan Heat Generation Pada Baterai

Temperatur baterai ditentukan oleh Q_{gen} yang terdiri dari panas hasil reaksi elektrokimia Q_r dan joule heat Q_j . Panas yang dihasilkan dari reaksi elektrokimia dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q_r = T\Delta S \frac{I}{nF} \quad (2.1)$$

dimana :

- I : discharge current (A)
- n : jumlah elektron yang berpindah selama proses elektrokimia
- F : konstanta faraday (9658,5 C mol⁻¹)
- ΔS : perubahan entropi per satuan waktu (Js⁻¹K⁻¹)
- T : temperatur (K)

Penyebab utama joule heat adalah adanya transfer arus dalam resistansi dalam (*internal resistance*) dan dirumuskan dalam persamaan di bawah ini :

$$Q_j = I(E - V) \quad (2.2)$$

dimana :

- E : tegangan sirkuit terbuka (Volt)
- V : tegangan operasi (Volt)
- E dan V bergantung pada suhu dan SOC (*state of charge*)

Sehingga Q_{gen} dapat dirumuskan menjadi :

$$Q_{\text{gen}} = I(E - V) - T\Delta S \frac{I}{nF} \quad (2.3)$$

2.7 Perpindahan Panas pada Sistem Pendingin Liquid

Liquid banyak dipilih sebagai medium pendinginan dikarenakan konduktivitas termalnya yang lebih tinggi dibanding medium gas terlebih nilai koefisien perpindahan panasnya. Prinsip kerja pada sistem pendingin medium liquid menggunakan hukum newton tentang pendinginan atau sering disebut konveksi.

2.7.1 Perpindahan Panas secara Konveksi

Konveksi adalah metode perpindahan panas yang terjadi antara permukaan solid dengan liquid atau gas yang bergerak dan merupakan kombinasi dari perpindahan panas secara konveksi dan pergerakan fluida (Cengel, 2002). Laju Perpindahan panas secara konveksi dapat dirumuskan seperti persamaan berikut :

$$Q_{convection} = h A \Delta T \quad (2.4)$$

dimana :

h : koefisien heat transfer ($W/m^2 \cdot K$)

A : luas permukaan tempat terjadinya pertukaran panas (m^2)

ΔT : Selisih temperatur permukaan dan temperatur ambient (K)

Nilai koefisien heat transfer bukanlah sifat dari fluida melainkan nilai yang dipengaruhi oleh variabel yang mempengaruhi proses perpindahan panas konveksi seperti bentuk permukaan, jenis aliran, dan kecepatan aliran.

2.7.2 Konveksi dalam Aliran Internal

Liquid atau gas yang mengalir melalui pipa atau *duct* pada umumnya digunakan dalam sistem pemanasan atau pendinginan. Aliran fluida dalam pipa atau *duct* diberi dorongan oleh kipas atau pompa agar dapat mengalir di dalam kanal yang panjang sehingga proses perpindahan panas terjadi dengan baik.

Aliran dalam pipa atau *duct* dapat berupa laminar atau turbulen bergantung pada kondisi dari aliran. Aliran laminar terjadi ketika suatu fluida yang memiliki kepekatan tinggi seperti minyak mengalir di dalam diameter yang kecil atau kanal yang sempit.

Cara menentukan suatu aliran laminar atau turbulenta adalah dengan menentukan bilangan Reynolds yang dirumuskan seperti persamaan di bawah ini :

$$Re = \frac{\rho D V_m}{\mu} = \frac{D V_m}{\nu} \quad (2.5)$$

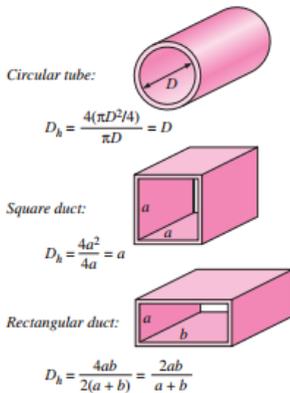
dengan :

- V_m : kecepatan fluida (m/s)
 D : diameter dari pipa (m)
 ν : kinematic viscosity fluida (m²/s)

Jika fluida mengalir di dalam duct, maka nilai D didapat dari hydraulic diameter (D_h) yang dirumuskan sebagai berikut :

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (2.6)$$

Dengan A_c adalah luas area tempat masuknya fluida dan p adalah keliling. Jenis aliran dari fluida pendingin atau pemanasan dapat ditentukan setelah dilakukan perhitungan bilangan Reynolds. Aliran dalam tube disebut laminar untuk $Re < 2300$, turbulenta untuk $Re > 10.000$ dan transisi untuk $2300 \leq Re \leq 10.000$.



Gambar 2. 4 Hydraulic Diameter (D_h) dalam berbagai geometri tube (Cengel, 2002)

Persamaan konservasi energi untuk aliran steady dari fluida yang mengalir dalam tube adalah :

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (2.7)$$

dengan :

- \dot{m} : laju aliran massa fluida
 \dot{Q} : Perpindahan Panas dari atau ke fluida (Watt)

ΔT : Perbedaan temperatur inlet dan outlet dari pipa atau *duct*
(K)

Laju aliran massa dapat dirumuskan seperti persamaan di bawah ini :

$$\dot{m} = \mathcal{V}_m A \rho \quad (2.8)$$

Kondisi termal dari permukaan dapat diketahui melalui pendekatan *constant surface temperature* dan *constant surface heat flux*.

$$\dot{q}_s = h_s (T_s - T_m) \quad (2.9)$$

dengan \dot{q}_s adalah heat flux (W/m^2), T_s adalah temperatur permukaan fluida, T_m adalah temperatur rata-rata fluida serta h_s adalah koefisien perpindahan panas. Saat *constant surface temperature*, nilai $T_s =$ konstan namun heat flux \dot{q}_s akan berubah. Begitupun sebaliknya ketika dan *constant surface heat flux*, nilai $\dot{q}_s =$ konstan namun T_s akan berubah. Laju aliran panas untuk *constant surface heat flux* dapat dirumuskan sebagai berikut :

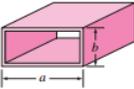
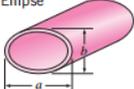
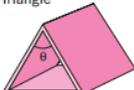
$$\dot{Q} = \dot{q}_s A_s = \dot{m} C_p (T_{outlet} - T_{inlet}) \quad (2.10)$$

$$T_{outlet} = T_{inlet} + \frac{\dot{q}_s A_s}{\dot{m} C_p} \quad (2.11)$$

Nilai bilangan Nusselt pada aliran laminar dalam *duct* untuk *constant surface heat flux* dirumuskan dalam persamaan di bawah ini :

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (2.12)$$

Nilai Nusselt untuk aliran laminar dalam pipa atau *duct* dapat diketahui dari tabel bilangan Nusselt untuk aliran laminar dalam beragam jenis luas lubang pipa.

Tube Geometry	a/b or θ°	Nusselt Number		Friction Factor f
		$T_s = \text{Const.}$	$\dot{q}_s = \text{Const.}$	
Circle 	—	3.66	4.36	64.00/Re
Rectangle 	a/b			
	1	2.98	3.61	56.92/Re
	2	3.39	4.12	62.20/Re
	3	3.96	4.79	68.36/Re
	4	4.44	5.33	72.92/Re
	6	5.14	6.05	78.80/Re
	8	5.60	6.49	82.32/Re
	∞	7.54	8.24	96.00/Re
Ellipse 	a/b			
	1	3.66	4.36	64.00/Re
	2	3.74	4.56	67.28/Re
	4	3.79	4.88	72.96/Re
	8	3.72	5.09	76.60/Re
	16	3.65	5.18	78.16/Re
Triangle 	θ			
	10°	1.61	2.45	50.80/Re
	30°	2.26	2.91	52.28/Re
	60°	2.47	3.11	53.32/Re
	90°	2.34	2.98	52.60/Re
	120°	2.00	2.68	50.96/Re

Gambar 2. 5 Bilangan Nusselt dan *friction factor* untuk beragam jenis pipa / *duct*

Setelah nilai bilangan Nusselt diketahui, maka koefisien perpindahan panas secara konveksi dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut :

$$h = \frac{Nu k}{D_h} \quad (2.13)$$

Analisa yang paling penting di aliran dalam pipa atau *duct* adalah besarnya nilai *pressure drop* yang ditimbulkan agar dapat memperkirakan daya yang dibutuhkan oleh kipas atau pompa untuk mengalirkan fluida dalam pipa atau *duct*. Besarnya nilai *pressure drop* untuk segala jenis aliran internal (laminar atau turbulen, pipa atau *duct*, permukaan halus atau kasar) dirumuskan dalam persamaan berikut :

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\mu \mathcal{V}_m^2}{2} \quad (2.14)$$

dengan :

- ΔP : *pressure drop* (Pa)
 f : *friction factor*
 L : jarak P_{inlet} ke P_{outlet} (m)
 D : Hidraulic Diameter (D_h)

Setelah nilai *pressure drop* didapatkan, maka daya pompa dapat dirumuskan dalam persamaan berikut :

$$W_{pp} = \Delta P \dot{V} \quad (2.15)$$

dengan :

- P : daya pompa (Watt)
 \dot{V} : $\mathcal{V}_m A =$ Volume flow rate (m^3/s)

2.8 *Computational Fluid Dynamics*

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

Ada 3 tahap utama dalam melakukan simulasi CFD yaitu:

- a. *Pre Processor*

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

b. *Solver*

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

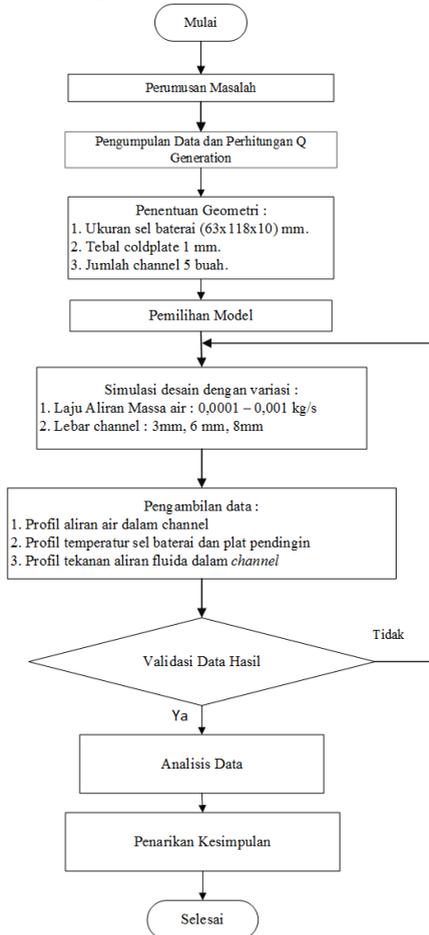
- Aproksimasi dari variabel aliran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi-fungsi sederhana
- Diskritisasi dengan melakukan substitusi dari aproksimasi tersebut ke persamaan persamaan atur aliran dan dilanjutkan dengan manipulasi matematis
- Solusi dari persamaan aljabar dengan metode iteratif

c. *Post Processor*

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

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Langkah-langkah dalam pengerjaan tugas akhir ini ditunjukkan pada diagram alir dibawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir

3.1 Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini berupa spesifikasi baterai litium-ion jenis LiCoO_2 yang meliputi dimensi baterai, kapasitas baterai (Ah), temperatur operasional, *operating cell voltage*, *nominal voltage*, arus baterai, densitas, *specific heat*, dan konduktivitas termal dari baterai maupun fluida pendingin yaitu air.

3.1.1 Data Spesifikasi Baterai Litium-ion

Data Spesifikasi Baterai didapatkan berdasarkan jurnal ilmiah yang dipublikasikan Zhen Qian pada tahun 2016 tentang Performansi Termal dari Manajemen Termal Baterai Litium Ion dengan Pendingin *Mini-channel* dan Buku Litium-ion Rechargeable Batteries yang ditulis oleh Yazami tahun 2010. Data spesifikasi baterai litium-ion yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Tabel Spesifikasi Baterai Litium Ion (Seifert, 2012)

Besaran	Besaran	Data
ρ	Densitas	2500 kg/m ³
c_p	Spesific Heat	1000 J/KgK
k	Thermal Conductivity	3 W/mK
T_b	Temperatur operasional baterai	40°C
I	Arus baterai	26,5 A
I_t	Kapasitas Baterai	5,6 Ah
C-rate	<i>Discharge rate</i>	5C
V	<i>Nominal Voltage</i>	3,7 Volt
E	OCV	4,2 Volt
ΔS	Perubahan Entropi	-35 J/mol/K
F	Konstanta Faraday	96484 C/mol
n	Jumlah elektron	0,5

3.1.2 Data Spesifikasi fluida air

Berdasarkan jurnal ilmiah tentang Performansi Termal dari Manajemen Termal Baterai Litium Ion dengan Pendingin *Mini-channel* didapatkan data spesifikasi fluida air pada sistem pendingin baterai Litium ion (Qian, 2016). Data spesifikasi air yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Tabel Spesifikasi Air

Besaran	Besaran	Data
ρ	Densitas	998,2 kg/m ³
c_p	Spesific Heat	4128 J/KgK
k	Thermal Conductivity	0,6 W/mK
T_f	Temperatur fluida air	26,85°C

3.1.3 Data Spesifikasi Plat Pendingin

Berdasarkan jurnal ilmiah yang dipublikasikan Zhen Qian pada tahun 2016 tentang Performansi Termal dari Manajemen Termal Baterai Litium Ion dengan Pendingin *Mini-channel* didapatkan data spesifikasi plat pendingin yang terbuat dari material aluminium seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Tabel Spesifikasi Plat Pendingin Aluminium

Besaran	Besaran	Data
ρ	Densitas	2719 kg/m ³
c_p	Spesific Heat	817 J/KgK
k	Thermal Conductivity	202,4 W/mK

3.1.4 Perhitungan *Heat Generation* Baterai Litium ion

Panas yang dihasilkan baterai berasal dari panas hasil reaksi elektrokimia Q_r dan joule heat Q_j . Panas yang dihasilkan dari reaksi elektrokimia dapat dihitung dengan persamaan (2.2)

dengan nilai $I = 26,5 \text{ A}$; $n = 0,5$; $F = 96484 \text{ C/mol}$; $\Delta S = -35 \text{ J/mol/K}$; $T = 40^\circ\text{C}$ maka,

$$Q_r = T\Delta S \frac{I}{nF}$$

$$Q_r = (40^\circ\text{C}) (-35 \text{ J/mol/K}) \frac{(26,5 \text{ A})}{(0,5)(96484 \text{ C/mol})}$$

$$Q_r = -6,0177 \text{ W}$$

Penyebab utama joule heat adalah adanya transfer arus dalam resistansi dalam (*internal resistance*) dan dirumuskan dalam persamaan (2.3) dengan nilai $I = 26,5 \text{ A}$; $E = 4,2 \text{ v}$; $V = 3,7 \text{ v}$ maka,

$$Q_j = I(E - V)$$

$$Q_j = (26,5 \text{ A}) \times ((4,2\text{V}) - (3,7\text{V}))$$

$$Q_j = 13,25 \text{ W}$$

Sehingga Panas yang dihasilkan baterai adalah (Q_{gen})

$$Q_{\text{gen}} = I(E - V) + T\Delta S \frac{I}{nF}$$

$$Q_{\text{gen}} = 13,25 \text{ W} - 6,0177 \text{ W}$$

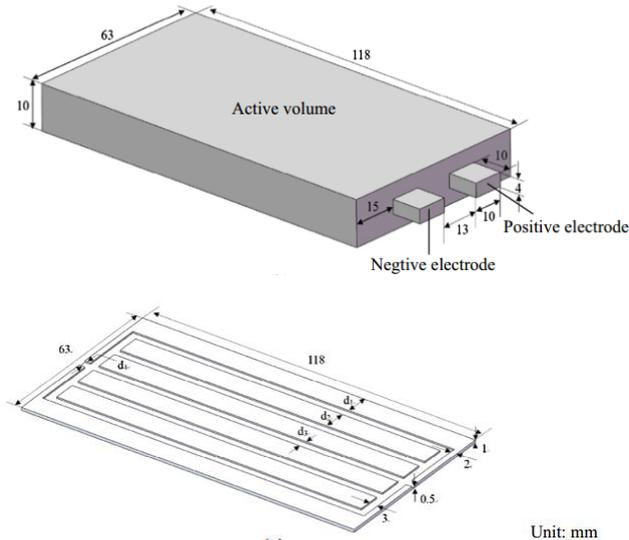
$$Q_{\text{gen}} = 7,232 \text{ W}$$

3.2 Simulasi Sistem Manajemen Termal Baterai Litium Ion

Sebelum melakukan simulasi, terlebih dahulu menentukan geometri baterai yang akan dianalisa.

3.2.1 Geometri

Geometri baterai dibuat dengan dimensi $118 \text{ mm} \times 63 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) dan plat aluminium dengan ketebalan 1 mm yang diletakkan di bagian samping baterai litium-ion (Qian et al., 2016). Jarak antar *channel* di dalam plat pendingin pada gambar 3.2 adalah 3 mm yang selanjutnya divariasikan menjadi 6 mm dan 8 mm . Air masuk melalui inlet dan keluar melalui outlet yang terletak di bagian samping plat pendingin.

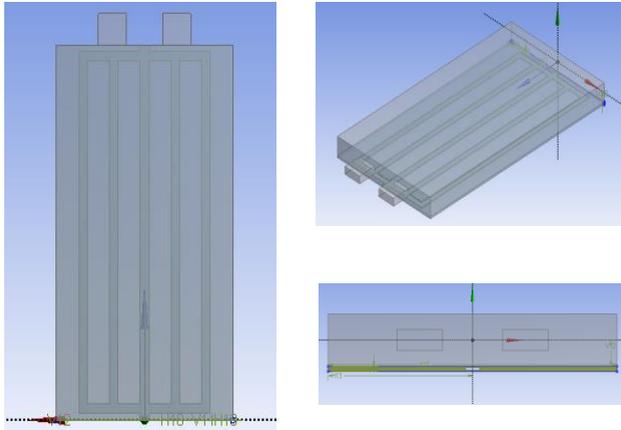


Gambar 3. 2 Geometri Sel Baterai (atas) beserta plat pendingin (bawah). (Qian., 2016)

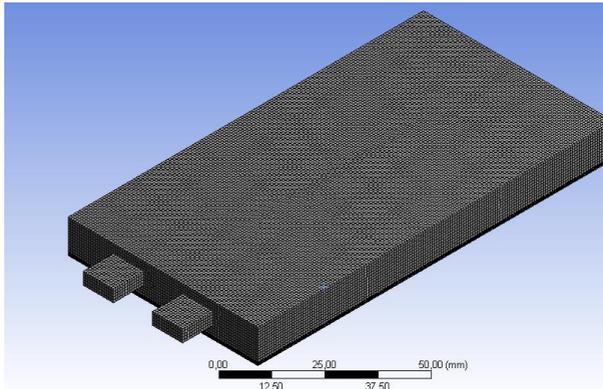
Setelah memasuki inlet, aliran air akan terbagi menjadi 5 sesuai jumlah *channel* dan setelah mengalir di sepanjang *channel* plat pendingin, aliran air akan menjadi satu untuk keluar melalui outlet.

3.2.2 Pre Processing

Tahapan Pre Processing dimulai dengan pembuatan geometri, pembuatan *mesh*, penentuan kondisi batas dan karakteristik fluida. Hasil pembuatan geometri pada software ditunjukkan oleh gambar 3.3. Pada gambar 3.3 digunakan lebar *channel* 3 mm dengan jumlah masing – masing *channel* sebanyak 5. Setelah pembuatan geometri selesai, tahapan selanjutnya adalah *meshing* yang merupakan pembagian geometri dalam bagian-bagian elemen kecil kontrol volume. Pada tiap-tiap elemen ini nantinya akan dilakukan perhitungan berbagai persamaan matematis seperti konservasi massa, energi, dan momentum. Berikut adalah hasil proses *meshing* pada simulasi sistem pendingin baterai Litium ion dengan metode CFD :



Gambar 3. 3 Hasil Pembuatan Geometri pada Software



Gambar 3. 4 Hasil *meshing* Salah Satu Variasi Geometri

Tabel 3. 4 Tabel Hasil Meshing

No	Variasi Lebar channel	Element	Nodes
1	3 mm	1.173.340	434097
2	6 mm	1.213.417	462607
3	8 mm	1.207.822	471185

3.2.3 Processing

Setelah proses *meshing* dilakukan maka ditentukan kondisi batas dan parameter-parameter matematis yang digunakan pada simulasi numerik. Pada tahap ini, semua kondisi batas harus disesuaikan dengan kondisi yang sesuai dengan jurnal referensi. Berikut merupakan kondisi batas yang diinisiasikan pada *software*

Tabel 3. 5 Tabel Kondisi Batas pada Simulasi dengan metode CFD

Kondisi Batas	Keterangan	
Inlet	Temperatur	300K
	Laju Aliran Massa	0,001 kg/s ; 0,0001 kg/s ; 0,00001 kg/s
Outlet	Tipe	Outflow
Dinding luar Baterai dan Plat Pendingin	Konveksi	$h = 5 \text{ W/m}^2$

Karakteristik termal dari material baterai, plat pendingin dan air dapat dilihat pada tabel 3.1, 3.2 dan 3.3 .

Setelah menentukan kondisi batas, tahap selanjutnya adalah pemilihan model. Pemilihan model disesuaikan dengan jenis aliran fluida yang akan disimulasikan. Dalam penyelesaiannya, metode CFD menggunakan persamaan Governing Navier-Stokes yang berasal dari persamaan konservasi massa (3.1), konservasi momentum (3.2) dan konservasi energi (3.3) seperti di bawah ini :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int e \cdot \rho \, dV + \int \left(\tilde{u} + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) \rho \mathbf{V} \cdot \tilde{\mathbf{n}} \, dA = \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} \quad (3.3)$$

Karakteristik aliran fluida yang digunakan adalah laminar sehingga persamaan konservasi massa dari fluida adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.4)$$

dengan,

ρ : Densitas (kg m^{-3})

\vec{v} : vektor aliran

Dikarenakan fluida yang digunakan adalah air, maka densitas dirubah menjadi ρ_w dan S_m bernilai 0 karena tidak ada perubahan fase yang terjadi

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \vec{v}) = 0 \quad (3.5)$$

dengan,

ρ_w : Densitas (kg m^{-3})

Persamaan konservasi momentum dari air berasal dari persamaan 3.2, namun nilai gravitasi dan τ_{ij} dapat diabaikan sehingga persamaannya menjadi :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_w \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P \quad (3.6)$$

dengan,

P : Tekanan Statis (Pa)

Persamaan konservasi energi (3.3) disederhanakan menjadi persamaan energi di dalam material solid sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \vec{v}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3.7)$$

dengan,

Q : Panas yang dihasilkan oleh baterai (Watt/m^3)

k : Konduktivitas termal

T : Temperatur (K)

h : sensible entalphi $\left(\int_{T_{ref}}^T c_p dT \right)$

persamaan di atas menunjukkan bahwa kedua bentuk di sisi kiri adalah transfer energi secara konveksi baik yang pergerakan material solidnya secara translasi atau rotasional. Sisi kanan pada persamaan melambangkan heat flux dari konduksi dan sumber panas di dalam material solid. Baterai diasumsikan tersusun dari satu material sehingga persamaannya menjadi sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_b C_{pb} T) = \nabla \cdot k_b \nabla T + Q_{\text{gen}} \quad (3.8)$$

dimana :

Q_{gen} : Panas yang dihasilkan oleh baterai (*Watt*)

ρ_b : Densitas baterai (kg m^{-3})

k_b : Konduktivitas termal baterai

T : Temperatur (K)

C_{pb} : Kapasitas panas baterai ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Sama halnya dengan baterai, persamaan konservasi energi dari air dan *cold plate* menjadi sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w c_{pw} T_w) + \nabla \cdot (\rho_w c_{pw} T_w \vec{v}) = \nabla \cdot (k_w \nabla T_w) \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_c c_{pc} T_c) = \nabla \cdot (k_c \nabla T_c) \quad (3.10)$$

dimana :

ρ_w = densitas air (kg m^{-3})

k_w = konduktivitas termal air ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)

c_{pw} = kapasitas panas air ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

T_w = temperatur air (K)

\vec{v} = kecepatan vektor air (m s^{-1})

ρ_c = densitas *cold plate* (kg m^{-3})

k_c = konduktivitas termal *cold plate* ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)

c_{pc} = kapasitas panas *cold plate* ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

T_c = temperatur *cold plate* (K)

Setelah dilakukan pemilihan model, maka tahapan berikutnya adalah penentuan parameter nilai – nilai input seperti karakteristik termal dari material dan jenis material. Selanjutnya, dilakukan proses inisialisasi kondisi dengan menentukan inlet sebagai parameter awal yang akan dikomputasi. Tahap terakhir adalah dilakukan proses iterasi hingga mencapai konvergensi.

3.2.4 Post Processing

Tahapan Post processing dilakukan ketika simulasi dengan metode *Computational Fluid Dynamics* telah selesai dilakukan. Hasil simulasi yang didapat adalah kontur distribusi temperatur pada sel baterai, plat pendingin dan fluida pendingin yakni air. Selain itu didapat pula kontur distribusi kecepatan air dan tekanan di dalam *channel*. Tidak hanya data berupa kontur, didapatkan pula data numerik seperti nilai temperatur inlet dan outlet serta kecepatan dan tekanan.

3.3 Pengambilan Data

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data hasil simulasi, data yang didapatkan meliputi kontur distribusi temperatur dan perbedaan temperatur pada baterai Li-ion bentuk prisma.

3.4 Analisa Data

Analisa data dilakukan setelah semua data dari hasil simulasi telah didapatkan. Proses ini dilaksanakan dengan berdasar pada teori-teori yang telah didapatkan pada tahap studi literatur. Pada bagian ini akan dibahas kontur temperatur dan perbedaannya di tiap variasi, kontur kecepatan pada aliran fluida dalam plat pendingin dan hubungannya dengan temperatur baterai serta pengaruh besarnya *laju aliran massa* dan lebar *channel* terhadap temperatur baterai.

3.5 Penarikan Kesimpulan

Dilakukan penarikan kesimpulan sesuai dengan hasil analisa data yang telah dilakukan.

3.6 Penutup

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

BAB IV

ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini ditampilkan hasil analisa dan simulasi dari penelitian yang telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi temperatur dari sel baterai Litium Ion yang diberi sistem pendinginan dengan variasi besarnya *laju aliran massa* fluida yang mengalir di dalam plat pendingin dan lebar *channel* dari plat pendingin pada simulasi dengan metode CFD. Selain distribusi temperatur di sel baterai, disertakan pula distribusi temperatur pada plat pendingin, kecepatan fluida dan tekanan dalam *channel*. Hal ini diperlukan untuk dapat melihat hubungan dari kecepatan aliran fluida dan tekanan terhadap distribusi temperatur dalam sel baterai, plat pendingin dan aliran fluida di dalam *channel*. Di akhir analisa, seluruh hasil simulasi dibandingkan sehingga didapat variasi laju aliran massa dan lebar *channel* yang paling optimal dalam manajemen termal baterai Litium Ion.

4.1 Validasi

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi yang didapat dan hasil perhitungan berdasarkan teori perpindahan panas yang berhubungan dengan sistem pendingin pada baterai Litium Ion. Besarnya nilai *Heat transfer* yang didapat sebesar 0,6039 W. Hasil perhitungan heat transfer tersebut digunakan untuk mencari temperatur air pendingin pada outlet *channel* dengan temperatur inlet sebesar 26,85°C dan *laju aliran massa* 10⁻³ kg/s. Temperatur inlet yang didapat dari hasil perhitungan sebesar 25,9961 °C sedangkan temperatur keluaran yang didapat dari hasil simulasi adalah 26,85°C. Hasil perhitungan dan hasil simulasi tersebut memiliki eror sebesar 3,18 %.

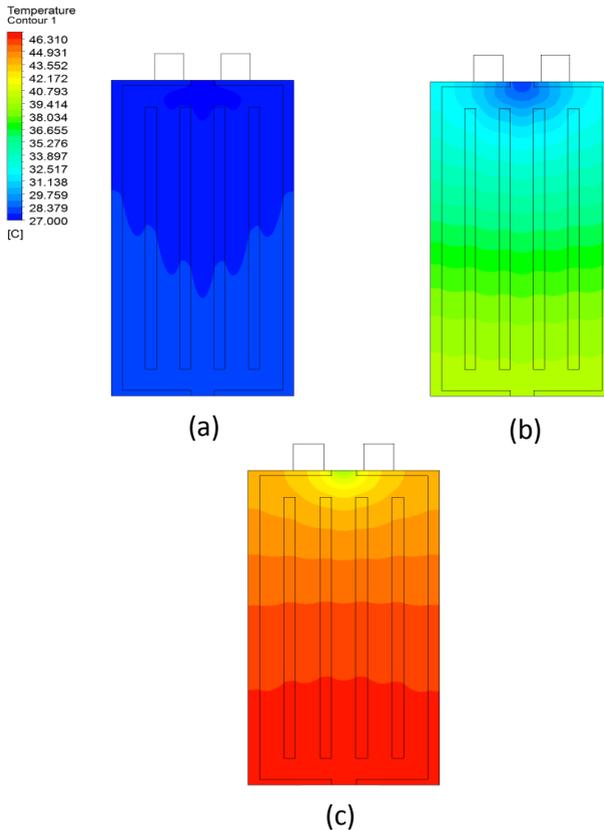
4.2 Analisis Pengaruh Laju aliran massa

Variasi pertama yang disimulasikan adalah mengubah nilai laju aliran massa fluida air yang mengalir di dalam *channel*. Variasi

besarnya *laju aliran massa* yang digunakan yaitu 10^{-5} kg/s, 10^{-4} kg/s dan 10^{-3} kg/s.

4.2.1 Kontur Plat Pendingin

Peran plat pendingin dalam manajemen termal pada baterai Litium Ion sebagai media pembawa fluida sangat berpengaruh terhadap kinerja suatu sistem pendingin. Sehingga hal pertama yang menjadi fokus pada penelitian ini adalah melakukan



Gambar 4. 1 Kontur Plat Pendingin Baterai Litium Ion dengan laju aliran massa air (a) 10^{-3} kg/s, (b) 10^{-4} kg/s dan (c) 10^{-5} kg/s

variasi besarnya laju aliran massa air yang mengalir di dalam *channel*.

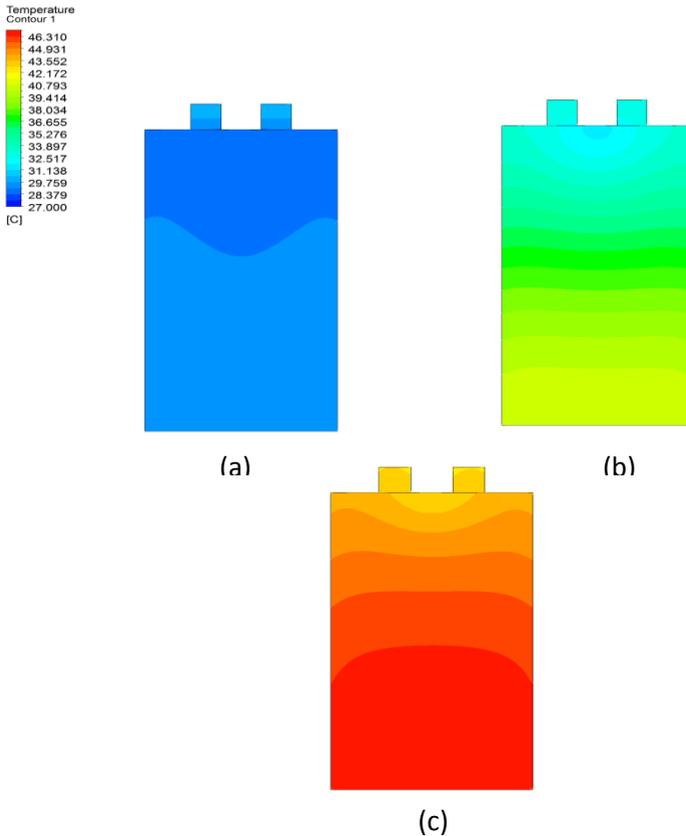
Hasil simulasi dengan lebar channel 8 mm menunjukkan bahwa laju aliran massa 10^{-3} kg/s memiliki suhu yang paling rendah dan berkisar antara 27-29 °C. Penurunan laju aliran massa menjadi 10^{-4} kg/s membuat rentang temperatur di plat pendingin semakin naik menjadi 29 – 40 °C. Temperatur plat pendingin menjadi semakin tinggi dan sudah melampaui 40°C seiring dengan menurunnya laju aliran massa air menjadi 10^{-5} kg/s. Temperatur plat pendingin seharusnya tidak boleh melebihi temperatur operasional baterai yaitu 40 °C, sehingga dalam hal ini fluida pendingin berupa air dengan laju aliran massa sebesar 10^{-5} kg/s tidak efektif untuk digunakan sebagai media pendingin dalam manajemen termal baterai Litium Ion.

4.2.2 Kontur Sel Baterai

Hasil simulasi sebelumnya tentang temperatur di dalam plat pendingin telah menunjukkan bahwa, temperatur plat diharuskan lebih rendah dibanding temperatur operasional baterai. Hal ini dikarenakan temperatur yang rendah pada plat pendingin dapat secara efektif menurunkan temperatur baterai itu sendiri. Hasil simulasi dari gambar 4.2 (a) menunjukkan bahwa air dengan laju aliran massa 10^{-3} kg/s memiliki temperatur baterai menjadi di bawah 30 °C. Sedangkan gambar 4.2 (b) dan 4.2 (c) menunjukkan kenaikan temperatur baterai mencapai 40 °C ketika inlet laju aliran massa air diperkecil menjadi 10^{-4} kg/s dan mencapai 50°C untuk inlet mass flow rate 10^{-5} kg/s. Dari semua kontur temperatur baterai, Sel baterai bagian atas memiliki temperatur yang lebih rendah dibandingkan bagian bawahnya. Hal ini sudah sesuai mengingat inlet plat pendingin berada sejajar dengan sisi sel baterai bagian atas sehingga air akan mendinginkan bagian atas sel baterai baru kemudian mendinginkan seluruh bagian sel baterai.

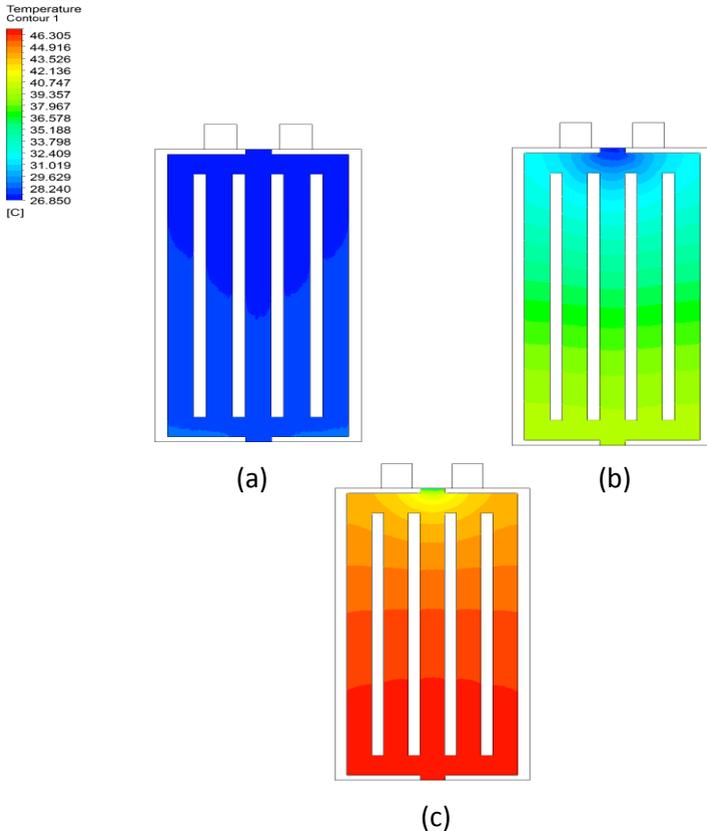
4.2.3 Kontur Temperatur air dan kecepatan vektor aliran air di dalam channel

Sebagai fluida kerja yang berfungsi untuk menurunkan temperatur baterai, analisis terhadap besarnya temperatur air



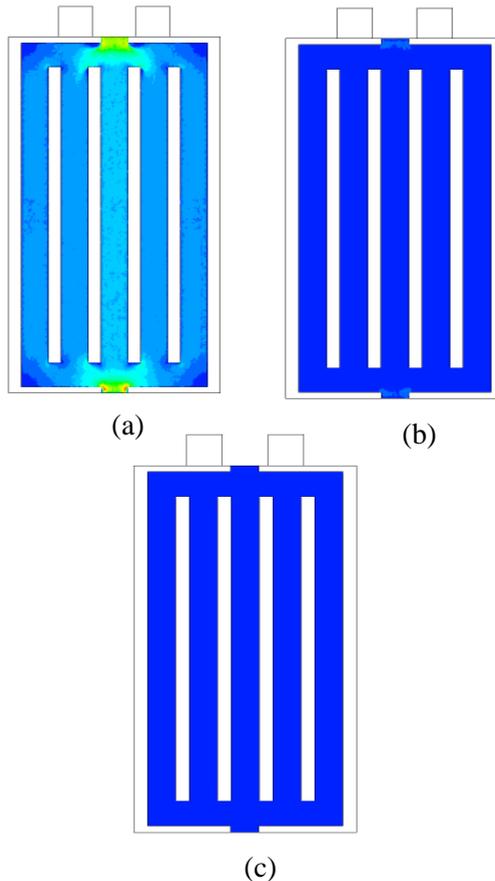
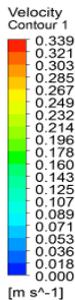
Gambar 4. 2 Kontur Baterai Litium Ion ketika dengan pendingin dengan laju aliran massa air sebesar (a) 10^{-3} kg/s , (b) 10^{-4} kg/s dan (c) 10^{-5} kg/s

menjadi sangat penting sebagai penentu baik tidaknya transfer panas yang terjadi dari sumber panas (baterai) ke fluida pendingin (air). Temperatur air ketika inlet laju aliran massa 10^{-3} kg/s jauh lebih kecil dibandingkan dengan inlet laju aliran massa 10^{-4} kg/s dan 10^{-5} kg/s seperti ditunjukkan oleh gambar 4.3 (a), (b) dan (c). Semakin tinggi inlet laju aliran massa, semakin rendah temperatur airnya yang berarti proses pendinginan yang terjadi sudah optimal. Kontur kecepatan aliran air pada gambar 4.5 (a), (b) dan (c)



Gambar 4. 3 Kontur Temperatur Fluida Pendingin dalam *channel* dengan variasi laju aliran massa (a) 10^{-3} kg/s , (b) 10^{-4} kg/s dan (c)

menunjukkan bahwa semakin besar laju aliran massanya, kecepatan aliran air semakin tinggi. Gambar 4.5 (a) memiliki kecepatan maksimum lebih besar hingga 0,3 m/s dibanding kontur pada gambar 4.5 (b) dan (c). Walaupun gambar 4.5(a) dan (b) memiliki kontur kecepatan yang identik namun kecepatan aliran air di sekitar inlet dan outlet pada gambar 4.5 (b) lebih besar dibanding



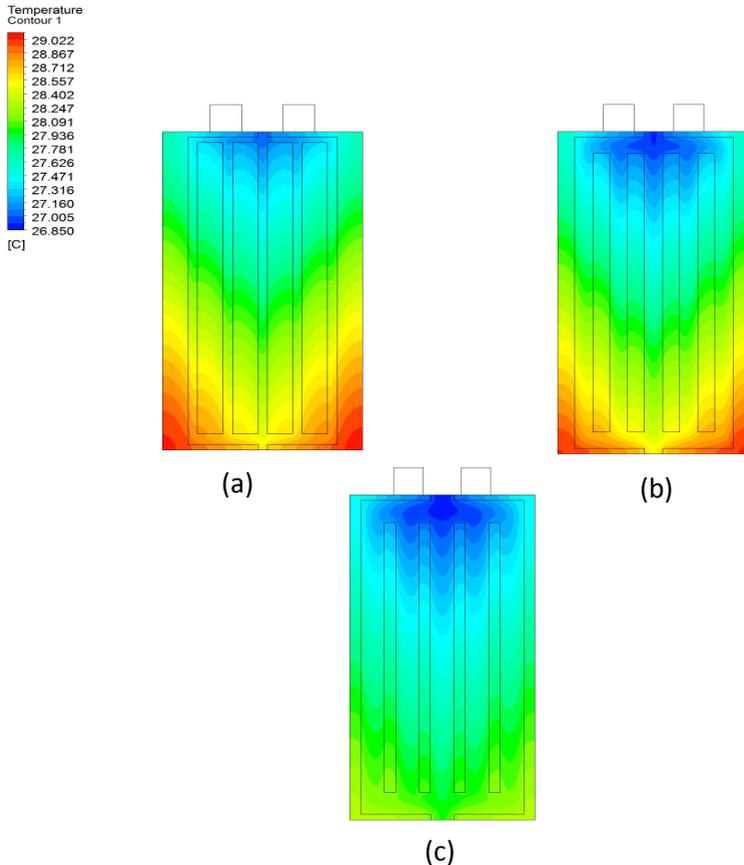
Gambar 4. 4 Kontur kecepatan air dalam *channel* dengan variasi mass flowrate (a) 1.10^{-3} kg/s ,(b) 1.10^{-4} kg/s, dan (c) 1.10^{-5} kg/s

kontur kecepatan pada gambar 4.5 (c). Jika mengamati kontur kecepatan air pada gambar 4.5 (a) akan terlihat penurunan kecepatan aliran saat air mengenai sudut – sudut *channel* (*elbow*). Hal ini sesuai dengan teori aliran dalam pipa/ducting yang menjelaskan bahwa akan terjadi minor loses saat fluida mengenai

sudut -sudut *ducting/channel* yang berdampak pada berkurangnya kecepatan aliran dalam channel tersebut.

4.3 Analisis Pengaruh Lebar *Channel*

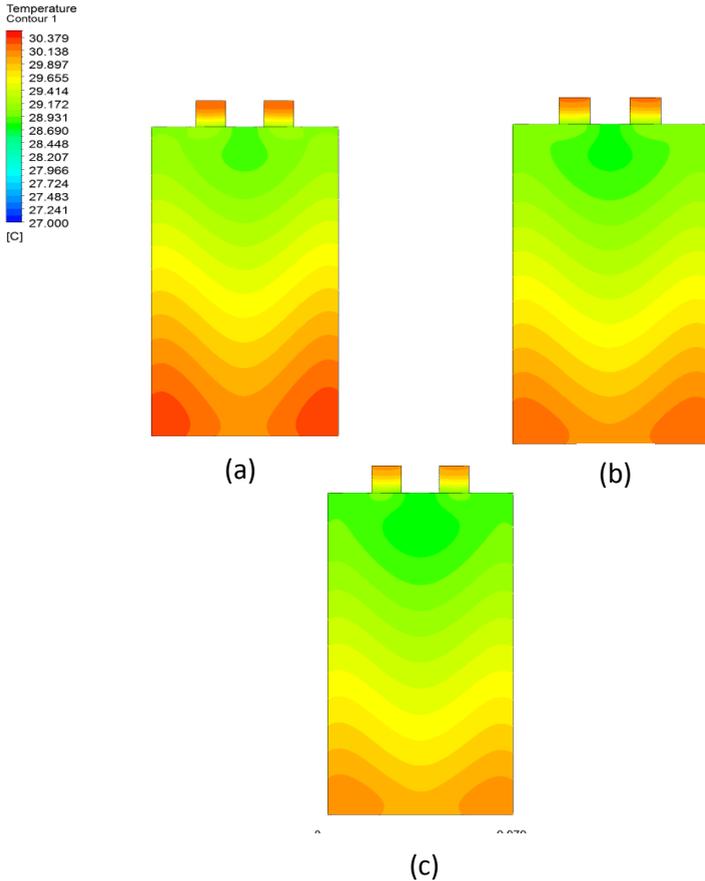
Jenis variasi kedua yang disimulasikan adalah lebar *channel* dari inlet air di dalam plat pendingin. Lebar *channel* divariasikan mulai dari 3 mm hingga 8 mm dengan inlet laju aliran massa 10^{-3} kg/s.



Gambar 4. 5 Kontur Plat Pendingin dengan variasi lebar *channel* (a) 3mm, (b) 6mm, dan (c) 8 mm

4.3.1 Kontur Plat Pendingin

Kontur plat pendingin ketika lebar *channel* 3 mm dan 6 mm sekilas hampir sama namun memiliki selisih temperatur yang berbeda yaitu 0,1 °C. Selisih temperatur dari kedua plat tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan plat dengan lebar *channel* 8 mm yang memiliki selisih 0,6 dengan lebar *channel* plat 6 mm dan 0,7 dengan lebar *channel* plat 3mm.

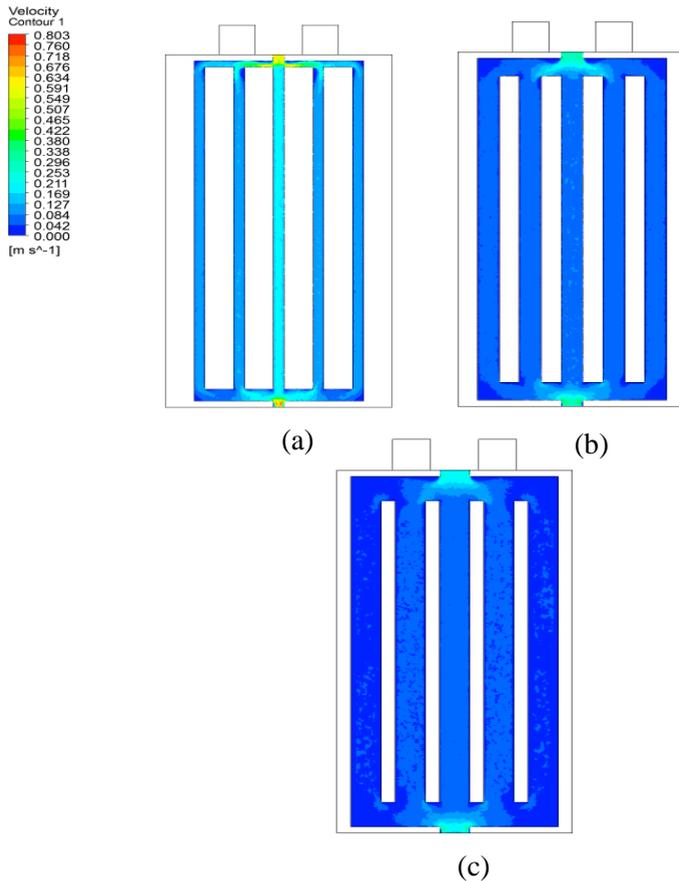


Gambar 4. 6 Kontur temperatur Baterai Saat Lebar *channel* (s) 3 mm, (b) 6 mm dan (c) 8 mm

4.3.2 Kontur Sel Baterai

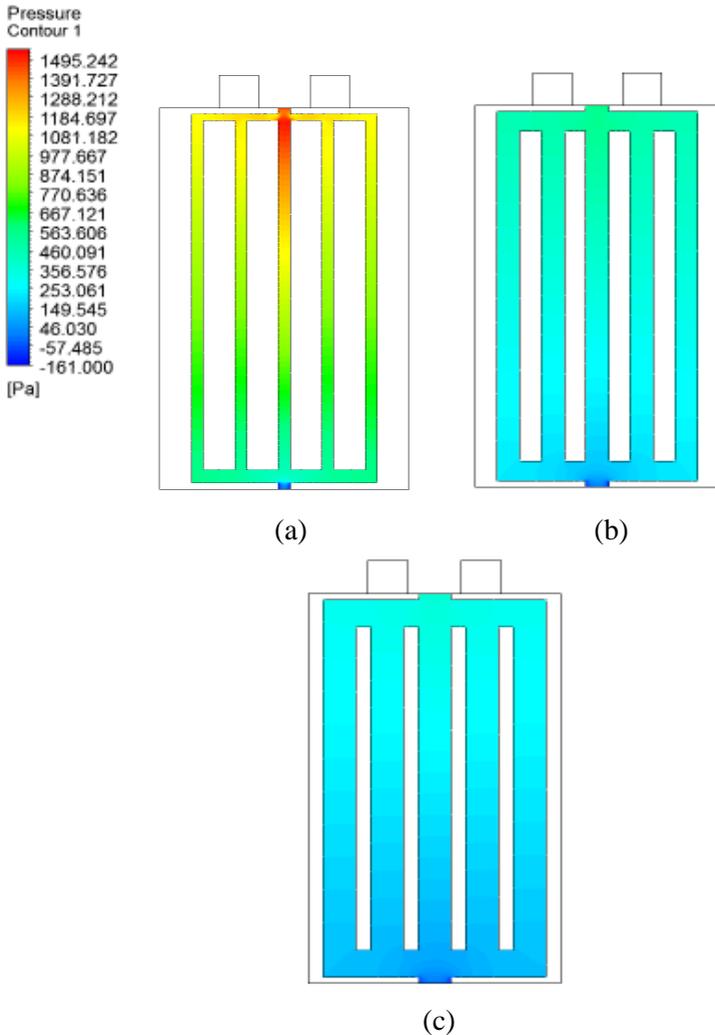
Tidak berbeda dengan kontur temperatur plat, kontur temperatur baterai juga mengalami penurunan temperatur maksimum seiring dengan semakin besarnya lebar *channel* seperti ditunjukkan oleh gambar 4.6 (a), (b) dan (c).

4.3.3 Kontur Temperatur air , Tekanan air dan Kecepatan aliran air di dalam *channel*

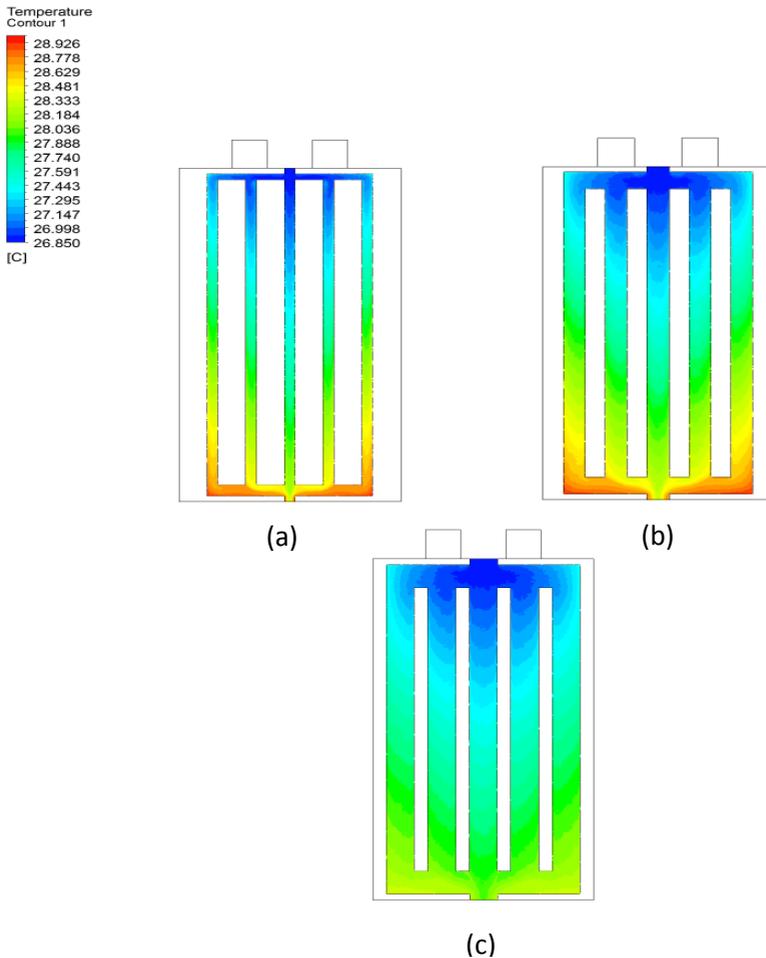


Gambar 4. 7 Kontur kecepatan aliran air dalam channel dengan variasi lebar channel (a) 3 mm, (b) 6 mm, dan (c) 8 mm

Kontur air dengan variasi lebar channel terbesar yaitu 8 mm memiliki temperatur yang rendah dibanding 2 variasi yang lain walaupun selisih temperatur maksimum air dari variasi lebar channel rata – rata sebesar 0,6 °C.



Gambar 4. 8 Kontur Tekanan air dalam channel dengan variasi lebar channel (a) 3 mm, (b) 6 mm dan (c) 8 mm



Gambar 4. 9 Kontur Temperatur Air dengan lebar channel (a) 3 mm, (b) 6 mm dan (c) 8 mm

Lain halnya dengan kontur tekanan yang memiliki rentang distribusi tekanan merata namun hanya pada gambar 4.9 (a). Rentang tekanan air untuk lebar channel 3 mm seperti yang ditunjukkan gambar 4.9 (a) berkisar antara 200 – 1500 Pa, berbeda dengan lebar channel 6 mm dan 8 mm seperti ditunjukkan gambar

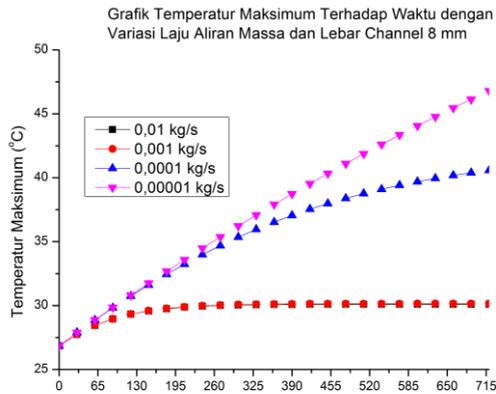
4.9 (a) dan (b) yang rata – rata nilai tekanannya berkisar antara 200 – 600 Pa dan 80- 400 Pa. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan sedikit saja pada lebar channel dapat memperbesar nilai tekanan maksimum pada air dalam channel. Sehingga pemilihan lebar channel yang tepat akan mengurangi nilai tekanan yang besar pada air dalam channel. Kontur kecepatan aliran air pada gambar 4.7 (a), (b) dan (c) menunjukkan bahwa semakin besar lebar channel, kecepatan aliran airnya semakin menurun. Gambar 4.7 (a), (b), dan (c) memiliki kontur kecepatan yang identik namun kecepatan aliran air di sekitar inlet dan outlet pada gambar 4.10 (a) lebih besar dibanding kontur kecepatan pada gambar 4.10 (b) dan (c). Jika mengamati kontur kecepatan air pada gambar

4.4 Pembahasan

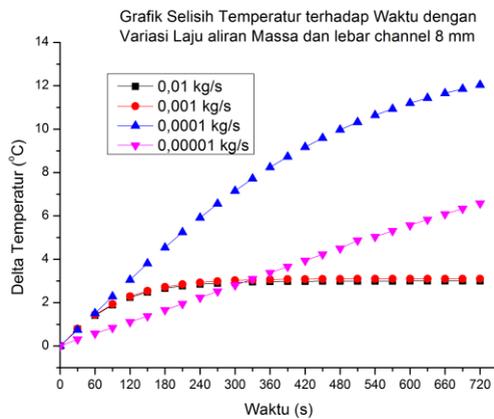
Inlet laju aliran massa sebesar 10^{-4} kg/s menyebabkan temperatur maksimum baterai meningkat dan hampir sama dengan temperatur operasional baterai yaitu 40°C . Hal yang serupa juga terjadi saat inlet laju aliran massa lebih kecil dari 10^{-4} kg/s, temperatur maksimum baterai meningkat lebih dari 40°C . Grafik 4.10 (a) dan (b) menunjukkan bahwa semakin menurunnya inlet laju aliran massa, maka temperatur maksimum dari baterai akan meningkat. Ketika inlet laju aliran massa 10^{-3} kg/s, temperatur maksimum baterai turun hampir 10°C dari temperatur operasional baterai menjadi stabil di kisaran $29^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kenaikan laju aliran massa berdampak pada menurunnya temperatur maksimum baterai. Jika dikaitkan dengan teori laju transfer panas Q , laju aliran massa air memang tidak berhubungan secara langsung dengan penurunan temperatur sel baterai namun, laju aliran massa sangat dipengaruhi oleh kecepatan vektor aliran, luas permukaan dan densitas fluida. Pada hasil simulasi, luas permukaan dan densitas di anggap konstan dan laju aliran massa saja yang divariasikan. Hasil menunjukkan bahwa semakin besar laju aliran massa, kecepatan vektor aliran menjadi semakin besar.

Besarnya kecepatan vektor aliran sangat erat kaitannya dengan nilai reynold number aliran dan nuselt number aliran. Jika



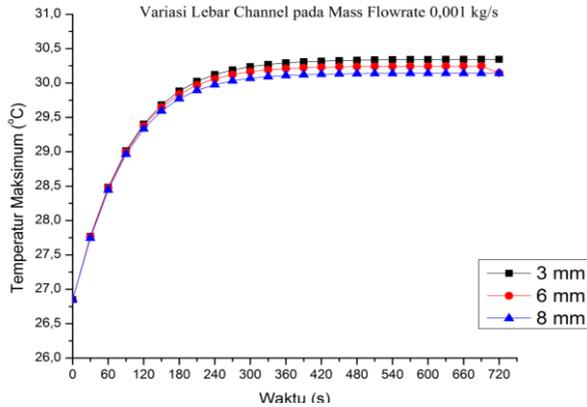
(a)



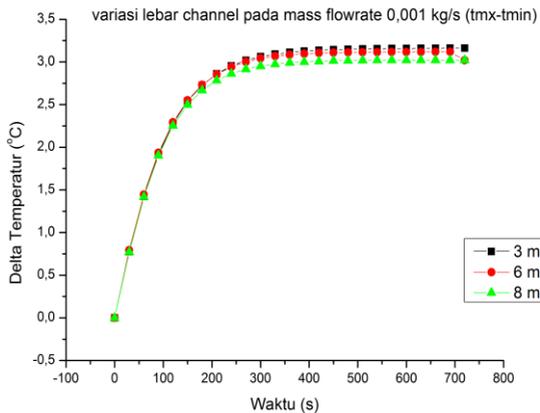
(b)

Gambar 4. 10 Grafik Temperatur Maksimum (a) dan Delta Temperatur (b) Sel Baterai dengan Lebar channel 8 mm dan mass flow rate yang divariasikan

dihubungkan lebih jauh lagi, koefisien konveksi transfer panas (h) dipengaruhi oleh konstanta konduktivitas termal (k) dari air, nuselt number (Nu) dan diameter hidrolis (D_h). Sehingga laju aliran massa suatu fluida sangat mempengaruhi koefisien konveksi



(a)



(b)

Gambar 4. 11 Grafik Temperatur Maksimum (a) dan Delta Temperatur (b) Sel Baterai dengan mass flowrate 0,001 kg/s dan lebar channel yang divariasikan

transfer panas suatu fluida dan pada akhirnya nanti akan mempengaruhi besarnya nilai transfer panas (Q) dan performansi pendinginan (ΔT).

Performansi pendinginan dari fluida pendingin juga dapat dikaitkan dengan seberapa besar kenaikan temperatur fluida pendingin terhadap panas yang diserap. Laju aliran massa akan secara langsung berhubungan dengan selisih temperatur fluida pendingin (dalam penelitian ini adalah air) saat sebelum dan sesudah melakukan proses pendinginan.

Hasil simulasi dengan melakukan variasi terhadap lebar channel menghasilkan temperatur maksimum untuk lebar *channel* 3 mm sebesar 30,345 °C, dimana temperatur ini lebih besar 0,1°C dari temperatur untuk lebar channel 6 mm dan lebih besar 0,12 °C untuk lebar channel 8 mm. Hasil yang lebih detail ditunjukkan oleh grafik 4.1.

Variasi *channel* yang semakin lebar memang dapat menurunkan temperatur sel baterai dan kecepatan aliran air, namun penurunannya tidak signifikan jika dibandingkan dengan variasi laju aliran massa air. Berdasarkan hasil simulasi pada tabel 4.1 ketika lebar channel divariasikan dan laju aliran massa konstan 10^{-3} kg/s, kecepatan aliran air memang mengalami penurunan namun tidak berpengaruh besar terhadap total laju transfer panasnya.

Hal ini berbeda dengan hasil simulasi pada tabel 4.2 dimana laju aliran massa divariasikan dan lebar channel dibuat tetap yakni 8 mm, kecepatan aliran air mengalami penurunan hampir 10 kali lipat dan berdampak signifikan terhadap penurunan total laju perpindahan panas. Hasil ini sesuai dengan teori tentang performansi pendinginan yang hanya dipengaruhi koefisien perpindahan panas (h) dan luasan permukaan (A) perpindahan panas.

Tabel 4. 1 Pengaruh Variasi Lebar Channel terhadap Kecepatan Aliran air dan Laju Transfer Panas

No	Lebar Channel (mm)	Laju Aliran Massa (kg/s)	Kecepatan Aliran air (m/s)	Total Heat Transfer Rate (W)
1	3	10^{-3}	0,67	7,348
2	6	10^{-3}	0,33	7,158
3	8	10^{-3}	0,25	7,161

Tabel 4. 2 Pengaruh Variasi Laju Aliran Massa Air terhadap Kecepatan Aliran air dan Laju Transfer Panas

No	Laju Aliran Massa (kg/s)	Lebar Channel (mm)	Kecepatan Aliran air (m/s)	Total Heat Transfer Rate (W)
1	10^{-3}	8	0,25	7,16
2	10^{-4}	8	0,025	6,30
3	10^{-5}	8	0,0025	2,75

Walaupun inlet laju aliran massa 10^{-3} kg/s menjadi yang paling baik dalam meningkatkan performansi pendinginan dibanding dua variasi lainnya, namun terdapat satu faktor yang harus dipertimbangkan dalam penentuan inlet laju aliran massa air. Hal tersebut adalah *pressure drop* dari aliran dalam channel.

Tabel 4. 3 Pengaruh Variasi Laju Aliran Massa Air terhadap Pressure Drop Aliran dan Kecepatan Aliran

No	Laju Aliran Massa (kg/s)	Lebar Channel (mm)	Pressure Drop (Pa)	Kecepatan Aliran air (m/s)
1	10^{-3}	8	415,5309	0,25
2	10^{-4}	8	36,07	0,025
3	10^{-5}	8	3,498	0,0025

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa dengan lebar channel tetap dan laju aliran massa air yang semakin besar akan meningkatkan nilai pumping power dan *pressure drop* aliran yang hampir 10 kali lipat. Pumping power adalah daya yang dibutuhkan untuk mengalirkan air ke dalam channel (Xie, Liu, He, & Tao, 2009). Pumping power dipengaruhi oleh jumlah *channel*, *pressure drop* dan volume flowrate.

Hubungan antara laju aliran massa air dengan *pressure drop* terletak pada \dot{V} yang merupakan rasio laju aliran massa (\dot{m}) dibanding densitas fluida (ρ), sehingga laju aliran massa air yang besar akan berpengaruh terhadap nilai pumping power.

Menurut penelitian dari Zhen Qian di tahun 2016 dan Xie & Liu di tahun 2009, besarnya nilai *pressure drop* dipengaruhi oleh lebar channel seperti pada persamaan 11, dimana nilai n yang merupakan jumlah channel dapat diartikan sebagai lebar plat pendingin dibagi penjumlahan antara ketebalan dinding antar channel dan lebar channel.

Analisa hasil simulasi berupa kontur, grafik penurunan temperatur, kecepatan aliran hingga *pressure drop* dan pumping power menunjukkan bahwa meningkatnya inlet laju aliran massa hingga 10^{-3} kg/s memang efektif untuk menurunkan temperatur maksimum baterai, namun *pressure drop* yang dihasilkan besar sehingga akan membutuhkan konsumsi energi yang besar.

Tabel 4. 4 Pengaruh Variasi Lebar Channel terhadap Pressure Drop Aliran dan Kecepatan Aliran

No	Lebar Channel (mm)	Laju Aliran Massa (kg/s)	Pressure Drop (Pa)	Kecepatan Aliran air (m/s)
1	3	10^{-3}	1539,6	0,67
2	6	10^{-3}	597,4	0,33
3	8	10^{-3}	415,5	0,25

Cara untuk mengurangi *pressure drop* yang besar adalah dengan memperbesar lebar channel. Hasil simulasi menunjukkan

bahwa lebar channel 8 mm memiliki pressure drop aliran yang terkecil dibanding variasi lainnya. Lebar channel semakin besar akan menurunkan *pressure drop* dan mengurangi konsumsi energi di sistem pendinginan baterai. Sehingga performansi pendinginan dapat meningkat namun dengan pressure drop bernilai kecil dan konsumsi energi yang sedikit.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian tugas akhir ini menganalisa manajemen termal pada sistem pendingin baterai Litium Ion dengan variasi laju aliran massa air dan lebar *channel* plat pendingin. Analisa terhadap manajemen termal dilakukan untuk mengetahui performansi sistem pendingin baterai yang dipengaruhi oleh besarnya laju aliran massa air dan lebar *channel* plat pendingin. Kesimpulan dari hasil analisa manajemen termal pada sistem pendingin baterai Litium Ion adalah sebagai berikut :

- a. Temperatur maksimum sel baterai Litium Ion dapat diperkecil dengan cara meningkatkan inlet laju aliran massa. Peningkatan inlet laju aliran massa dari 1×10^{-5} kg/s menjadi 1×10^{-3} kg/s membuat temperatur maksimum sel baterai turun dari 45°C menjadi 30°C. Walaupun peningkatan inlet laju aliran massa air dinilai merupakan metode yang efisien, namun kenaikan laju aliran massa melebihi 1×10^{-3} kg/s tidak berdampak besar terhadap penurunan temperatur sel baterai dan justru meningkatkan konsumsi energi.
- b. Perubahan lebar *channel* dari 3 mm hingga 8 mm hanya dapat menurunkan temperatur maksimum sel baterai sebesar rata – rata 0,11 °C, namun *channel* yang semakin lebar dapat mengurangi pressure drop aliran. Lebar *channel* 3 mm dengan pressure drop 1539,6 Pa, mengalami penurunan menjadi 415,5 ketika lebar *channel* diperbesar menjadi 8 mm.
- c. Peningkatan laju aliran massa air merupakan metode efektif untuk menurunkan temperatur maksimum sel baterai Litium Ion, namun harus diimbangi dengan memperlebar *channel* plat pendingin agar dapat menurunkan *pressure drop* dan mengurangi konsumsi energi di sistem pendingin baterai.

5.2 Saran

Penulis memberikan saran pengembangan penelitian lebih lanjut sebagai berikut :

- a. Dapat menambahkan beberapa variasi seperti jumlah channel dalam plat pendingin atau jenis fluida pendingin.
- b. Dapat menyempurnakan hasil simulasi dengan menggunakan baterai modul pada software sehingga perilaku termal dan reaksi elektrokimia pada baterai dapat dianalisa.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, D., Jiang, J., Kim, G., Yang, C., & Pesaran, A. (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells, *94*, 846–854.
- Greco, A., Cao, D., Jiang, X., & Yang, H. (2014). A theoretical and computational study of lithium-ion battery thermal management for electric vehicles using heat pipes. *Journal of Power Sources*, *257*, 344–355.
- Huo, Y., Rao, Z., Liu, X., & Zhao, J. (2015). Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate. *Energy Conversion and Management*, *89*, 387–395.
- Kurzweil, P. (1972). SECONDARY BATTERIES – LITHIUM.
- Linden, D., & Reddy, T. B. (2002). *HANDBOOK OF BATTERIES*.
- Mahamud, R., & Park, C. (2011). Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity. *Journal of Power Sources*, *196*(13), 5685–5696.
- Peng, P., & Jiang, F. (2016). International Journal of Heat and Mass Transfer Thermal safety of lithium-ion batteries with various cathode materials: A numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *103*, 1008–1016.
- Qian, Z., Li, Y., & Rao, Z. (2016). Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. *Energy Conversion and Management*, *126*, 622–631.
- Rao, Z., Wang, Q., & Huang, C. (2016). Investigation of the thermal performance of phase change material / mini-channel coupled battery thermal management system. *Applied Energy*, *164*, 659–669.
- Rao, Z., & Wang, S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(9), 4554–4571.
- Seifert, H. J., Schuster, E., Lepple, M., Cupid, D., Franke, P., & Ziebert, C. (2012). Thermodynamics and Phase Diagrams for Lithium Ion

Batteries.

Warner, J. (2015). *Battery Pack Design*.

Xie, X. L., Liu, Z. J., He, Y. L., & Tao, W. Q. (2009). Numerical study of laminar heat transfer and pressure drop characteristics in a water-cooled minichannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 29(1), 64–74.

Zhao, J., Rao, Z., Huo, Y., Liu, X., & Li, Y. (2015). Thermal management of cylindrical power battery module for extending the life of new energy electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 85, 33–43.

Zhao, R., Zhang, S., Liu, J., & Gu, J. (2015). Review article A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system. *Journal of Power Sources*, 299, 557–577.

LAMPIRAN I

1.1 Validasi

Bilangan Nusselt (Nu) yang digunakan pada plat pendingin dengan heat flux konstan adalah 6,05 . Hasil ini diperoleh dari gambar 2.5 dengan perbandingan panjang dan lebar *channel* 3 : 0,5 . Sehingga nilai koefisien perpindahan panas (h) bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} h &= \frac{Nu \cdot k}{Dh} \\ &= \frac{6,05 \times 0,609 \text{ (W m}^{-1}\text{K}^{-1})}{0,000857 \text{ m}} \\ &= 4299,24 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Tabel *Thermal Resistance* tiap material

No	Material	Thermal Resistance (W/K)
1	Baterai	22,363
2	Aluminium	1,151661
3	Air	20,7202

Dengan menggunakan metode thermal resistance multiple plane wall, didapatkan nilai thermal resistance total sebesar 24,83665 W/K, sehingga besarnya nilai Q :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{baterai-ambient} &= \frac{T_{baterai} - T_{ambient}}{\sum R_{baterai-ambient}} \\ Q &= \frac{313 \text{ K} - 298 \text{ K}}{24,83665 \text{ W/K}} = 0,6039 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Saat perhitungan validasi, perpindahan panas dihitung mulai dari baterai hingga liquid sehingga,

$$\dot{Q}_{\text{baterai-liquid}} = \frac{T_{\text{baterai}} - T_{\text{liquid}}}{\sum R_{\text{baterai-liquid}}}$$

Dengan nilai $\sum R_{\text{baterai-liquid}} = 23,1 \text{ W/K}$ dan $\dot{Q}_{\text{baterai-liquid}} = 0,6039 \text{ W}$ maka T_{liquid} dapat dihitung dengan :

$$T_{\text{liquid}} = T_{\text{baterai}} - \left(\dot{Q}_{\text{baterai-liquid}} \times \sum R_{\text{baterai-liquid}} \right)$$

$$T_{\text{liquid}} = 25,9961 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nilai $T_{\text{liquid}} = 25.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ adalah temperatur saat liquid memasuki plat pendingin, nilai ini kemudian dibandingkan dengan nilai temperatur inlet air simulasi yaitu 26.85°C dan didapatkan error sebesar $3,18 \%$

Selain melakukan perhitungan temperatur inlet air, validasi juga dilakukan dengan menghitung temperatur outlet air dengan menggunakan rumus perhitungan :

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T$$

Dengan \dot{Q} diperoleh dari heat generation baterai sebesar $7,232 \text{ W}$, $\dot{m} = 0,001$, $C_p = 4182$, $T_{\text{awal}} = 26,85^\circ\text{C}$, maka

$$T_{\text{Aakhir}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} C_p} + T_{\text{Awal}}$$

$$T_{\text{Aakhir}} = \frac{7,232}{0,001 \times 4128} + 26,85 = 28,57931 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nilai $T_{\text{Aakhir}} = 28,57931 \text{ } ^\circ\text{C}$ adalah temperatur saat liquid keluar dari plat pendingin, nilai ini kemudian dibandingkan dengan nilai temperatur outlet air maksimum dari simulasi yaitu $28,744^\circ\text{C}$ dan didapatkan error sebesar $0,57 \%$

LAMPIRAN II : Tekanan dalam Channel dengan Variasi Lebar Channel

waktu	3 mm		6 mm		8 mm	
	Pin (Pa)	Pout(Pa)	Pin(Pa)	Pout(Pa)	Pin(Pa)	Pout(Pa)
0	0	0	0	0	0	0
30	1554,07	6,41865	611,452	19,6196	419,643	4,64313
60	1555,01	6,50249	611,727	19,5306	419,783	4,58796
90	1555,3	6,60788	612,055	19,4685	419,981	4,5877
120	1555,11	6,65422	612,727	19,4232	420,118	4,55057
150	1554,72	6,73219	613,675	19,3951	420,102	4,53293
180	1554,52	6,75856	614,74	19,3764	420,09	4,50425
210	1553,31	6,81509	615,344	19,3645	420,084	4,48836
240	1551,57	6,83084	615,656	19,3483	420,04	4,45968
270	1550,32	6,88321	615,824	19,3339	420,028	4,44443
300	1548,78	6,90233	616,109	19,3196	420,028	4,41815
330	1548,26	6,9681	616,299	19,3085	419,989	4,4003
360	1548,01	7,00524	616,455	19,2981	420,021	4,37237
390	1547,88	7,09092	616,628	19,2896	419,985	4,35542
420	1547,35	7,15452	616,681	19,2844	419,953	4,32876
450	1546,67	7,26191	616,729	19,2815	419,913	4,32158
480	1545,96	7,34166	616,749	19,282	419,924	4,30411
510	1545,27	7,46119	616,719	19,2866	419,863	4,29748
540	1545,22	7,53072	616,678	19,2939	419,873	4,27823
570	1545,37	7,63756	616,703	19,3047	419,807	4,2761
600	1545,31	7,71318	616,662	19,3201	419,819	4,26079
630	1545,48	7,8106	616,71	19,338	419,784	4,25974
660	1545,73	7,86768	616,74	19,3581	419,799	4,24458

690	1546,62	7,94119	616,759	19,3813	419,775	4,24406
720	1547,54	7,96699	27,128	30,247	27,125	30,226

II. Tekanan dalam Channel dengan Variasi *Mass Flow Rate*

time	0,001 kg/s		0,0001 kg/s		0,00001 kg/s	
	Pin	Pout	Pin	Pout	Pin	Pout
0	0	0	0	0	0	0
30	419,642	4,66672	36,4245	0,319038	3,56686	0,0458826
60	419,643	4,64313	36,4199	0,316615	3,5649	0,0462776
90	419,783	4,58796	36,4266	0,315036	3,56177	0,0478583
120	419,981	4,5877	36,4314	0,310803	3,5613	0,0480853
150	420,118	4,55057	36,4281	0,307111	3,56001	0,048677
180	420,102	4,53293	36,4279	0,307306	3,55869	0,0490686
210	420,09	4,50425	36,4252	0,303746	3,55795	0,0491733
240	420,084	4,48836	36,4242	0,304148	3,55655	0,0495025
270	420,04	4,45968	36,4206	0,301191	3,55586	0,0496763
300	420,028	4,44443	36,4186	0,30169	3,55455	0,0501873
330	420,028	4,41815	36,4148	0,299526	3,55392	0,0504316
360	419,989	4,4003	36,4119	0,300114	3,55281	0,0509721
390	420,021	4,37237	36,4081	0,298935	3,55198	0,0514355
420	419,985	4,35542	36,4051	0,299879	3,55129	0,0518021
450	419,953	4,32876	36,4017	0,29906	3,55038	0,0523855
480	419,913	4,32158	36,3984	0,300715	3,54979	0,0527762
510	419,924	4,30411	36,395	0,300167	3,54908	0,0532862
540	419,863	4,29748	36,3914	0,301892	3,54842	0,0537912
570	419,873	4,27823	36,3893	0,301524	3,54782	0,0543085
600	419,807	4,2761	36,3857	0,303609	3,54724	0,0543085
630	419,819	4,26079	36,3837	0,303564	3,5467	0,0553115
660	419,784	4,25974	36,3804	0,306078	3,54619	0,0558168
690	419,799	4,24458	36,3786	0,305935	3,54569	0,0563324
720	419,775	4,24406	36,376	0,306586	3,54521	0,0568226

