



TUGAS AKHIR - TF 181801

**SIMULASI SISTEM PENDINGIN BATERAI MENGGUNAKAN PHASE
CHANGE MATERIAL PADA BATERAI LITHIUM-ION**

MUHAMMAD RIZKY CAHYA ANDHIKA

NRP. 02311940005018

Dosen Pembimbing:

Dr. Eng. Nur Laila Hamidah S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2021

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***SIMULATION OF BATTERY COOLING SYSTEM USING PHASE CHANGE
MATERIAL ON LITHIUM-ION BATTERY***

MUHAMMAD RIZKY CAHYA ANDHIKA
NRP. 02311940005018

Supervisors:

Dr. Eng. Nur Laila Hamidah S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2021

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Muhammad Rizky Cahya Andhika
NRP : 02311940005018
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "***SIMULASI SISTEM PENDINGIN BATERAI MENGGUNAKAN PHASE CHANGE MATERIAL PADA BATERAI LITHIUM-ION***" 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 sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 23 Agustus 2021

Yang membuat pernyataan,



M. Rizky C. Andhika

NRP. 02311940005018

Halaman ini sengaja dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**SIMULASI SISTEM PENDINGIN BATERAI MENGGUNAKAN PHASE
CHANGE MATERIAL PADA BATERAI LITHIUM-ION**

Oleh:



M. Rizky C. Andhika

NRP. 02311940005018

Surabaya, 23 Agustus 2021

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing**



Dr. Eng. Nur Laila Hamidah S.T., M.Sc.

NIP. 19880710 201504 2 001

**Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTIRS-ITS**



Dr. Suvanto, ST., MT

NIP. 197111131 995121 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

SIMULASI SISTEM PENDINGIN BATERAI MENGGUNAKAN PHASE CHANGE MATERIAL PADA BATERAI LITHIUM-ION TUGAS AKHIR




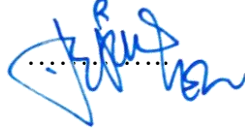
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

M. RIZKY C. ANDHIKA

NRP. 02311940005018

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Eng. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.  (Pembimbing I)
2. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  (Ketua Penguji)
3. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc.  (Penguji I)
4. Erna Septyaningrum, S.T., M.T.  (Penguji II)

SURABAYA

2021

Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULASI SISTEM PENDINGIN BATERAI MENGGUNAKAN PHASE CHANGE MATERIAL PADA BATERAI LITHIUM-ION

Nama : Muhammad Rizky Cahya Andhika
NRP : 02311940005018
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Nur Laila Hamidah S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Baterai Lithium-ion (Li-ion) adalah kandidat penyimpan energi yang menjanjikan karena kestabilannya yang baik, tidak ada efek memori, tingkat self-discharge rendah dan kepadatan energi yang tinggi. Baterai selama proses penggunaannya akan menghasilkan panas, panas tersebut dihasilkan dari rugi energi selama proses perubahan energi kimia ke listrik dan siklus perpindahan elektron, oleh sebab itu sistem pendingin pada baterai sangat dibutuhkan sebagai solusi untuk mengendalikan panas. Salah satu metode pendinginan baterai yang sedang diteliti adalah sistem pendinginan pasif menggunakan phase change material (PCM). Beberapa keunggulan PCM adalah mampu menampung panas dengan jumlah yang cukup besar dengan dimensi yang kecil, selain itu PCM memiliki keunggulan mudah dalam proses pengaplikasiannya dan tidak memerlukan daya dalam sistem pendinginannya. Penelitian ini bertujuan menemukan kriteria PCM yang baik dan jenis dan PCM yang tepat untuk digunakan pada baterai Nogogeni V Evo. Dilakukan penelitian dengan melakukan simulasi menggunakan software ANSYS Fluent dengan variasi jenis PCM Capric Acid dan PCM Hexacosane dan variasi ketebalan PCM sebesar 3 mm, 6 mm dan 9 mm. Didapatkan PCM Hexacosane mampu menurunkan temperatur maksimum baterai sampai 6.54°K , sehingga PCM jenis tersebut dapat digunakan sebagai referensi bagi Tim Nogogeni ITS untuk menggunakannya sebagai sistem pendingin pasif baterai Li-ion yang digunakan pada Nogogeni V Evo.

Kata Kunci: ANSYS Fluent, Baterai Lithium-ion, Pendingin Pasif, Phase Change Material, Hexacosane.

Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULATION OF BATTERY COOLING SYSTEM USING PHASE CHANGE MATERIAL ON LITHIUM-ION BATTERY

Name : Muhammad Rizky Cahya Andhika
NRP : 02311940005018
Department : Engineering Physics FTIRS - ITS
Supervisors : Dr. Eng. Nur Laila Hamidah S.T., M.Sc.

ABSTRACT

Lithium-ion (Li-ion) batteries are a promising energy storage candidate due to their good stability, no memory effect, low self-discharge rate and high energy density. Batteries during the process of use will generate heat, the heat is generated from energy losses during the process of changing chemical energy to electricity and the electron transfer cycle, therefore a cooling system in batteries is needed as a solution to control heat. One of the battery cooling methods being studied is a passive cooling system using a phase change material (PCM). Some of the advantages of PCM are that it is able to accommodate a fairly large amount of heat with small dimensions, besides that PCM has the advantage of being easy to apply and does not require power in the cooling system. This study aims to find the criteria for a good PCM and the right type and PCM to be used in the Nogogeni V Evo battery. The research was conducted by conducting simulations using ANSYS Fluent software with variations of PCM Capric Acid and PCM Hexacosane and variations in PCM thickness of 3 mm, 6 mm and 9 mm. Hexacosane PCM was found to be able to reduce the maximum battery temperature to 6.54°K, so that this type of PCM can be used as a reference for Nogogeni ITS Team to use it as a passive cooling system for Li-ion batteries used in the Nogogeni V Evo.

Keywords: Lithium-ion Batteries, Numerical Analysis, Pasif Cooling, Phase Change Material, Hexacosane.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa memberikan dan melimpahkan nikmat, kasih sayang serta rahmat-Nya sehingga pelaksanaan dan penyusunan Tugas Akhir yang berjudul **Simulasi Sistem Pendingin Baterai Menggunakan Phase Change Material pada Baterai Lithium-ion** dapat terwujud dan berjalan dengan baik.

Laporan ini disusun sebagai syarat untuk kelulusan pada Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulisan laporan tugas akhir ini didasarkan pada pengamatan dan penelitian langsung di pabrik serta didukung oleh teori, literatur, dan bimbingan dosen yang ada di Program Studi Teknik Fisika ITS. Selama penyusunan Tugas Akhir ini baik saat persiapan maupun pelaksanaan, penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak.

Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan banyak-banyak terima kasih kepada:

1. Ahmad Dwi Tjahyo Nuswantoro dan Febri Kusuma Hati selaku kedua orang tua penulis yang tidak henti-hentinya memberikan doa, dukungan secara materi maupun motivasi kepada penulis sehingga selalu semangat untuk menyusun tugas akhir dan lulus dari perguruan tinggi.
2. Ibu Dr. Eng. Nur Laila Hamidah S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir dan koordinator tugas akhir yang memberikan waktu serta tenaganya untuk membimbing penulis sehingga dapat menyusun dan menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Ibu Dyah Sawitri, S.T., MT. selaku dosen wali selama masa perkuliahan di Departemen Teknik Fisika FTIRS-ITS.
4. Semua dosen pengajar maupun staf pengajar di Departemen Teknik Fisika FTIRS-ITS yang telah memberikan ilmu dan banyak membantu dalam kelancaran penyusunan tugas akhir ini.
5. Sheilla Ramadhani dan teman-teman RPL yang telah memberikan bantuan dan doa.

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 07 Juli 2021

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
<i>COVER PAGE</i>	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Tugas Akhir	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Relevansi Tugas Akhir	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN SASAR TEORI	5
2.1 Baterai Lithium-ion	5
2.2 Manajemen Termal pada Baterai	6
2.3 <i>Phase Change Material</i>	7
2.4 Perpindahan Panas	8
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	11
3.1 Pengumpulan Data	12
3.2 Simulasi Manajemen Termal pada Baterai	15
3.2.1 Geometri	15

3.2.2	Meshing.....	17
3.2.3	Pre-Processing.....	19
3.2.4	Processing.....	20
3.2.5	Post-processing.....	20
3.3	Validasi Simulasi dengan Eksperimen.....	20
3.4	Analisa Data dan Penarikan Kesimpulan.....	20
3.5	Penulisan Laporan.....	21
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		23
4.1	Validasi.....	23
4.2	Analisa Pengaruh Ketebalan PCM.....	24
4.2.1	Kontur Temperatur Baterai	24
4.2.2	Grafik Temperatur Baterai	26
4.2.3	Penurunan Temperatur Maksimal Baterai.....	27
4.3	Analisa Pengaruh Temperatur Lingkungan terhadap Proses Pendinginan.....	27
4.4	Analisa Pengaruh Variasi Jenis PCM.....	29
4.5	Analisa Perubahan Fasa pada PCM Hexacosane	32
4.6	Pembahasan.....	33
BAB V PENUTUP.....		35
5.1	Kesimpulan.....	35
5.2	Saran.....	36
DAFTAR PUSTAKA		37
LAMPIRAN.....		39
BIODATA PENULIS		41

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Aliran Ion Litium dalam Sel Baterai	5
Gambar 2.2 Prinsip Kerja PCM	7
Gambar 2.3 Klasifikasi dari PCM	8
Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian.....	11
Gambar 3.2 Geometri Baterai (a) tanpa PCM (b) PCM Tebal 3 mm, (c) PCM Tebal 6 mm, (d) PCM Tebal 9 mm.....	17
Gambar 3.3 Meshing Geometri Baterai (a) Tanpa PCM, (b) PCM Tebal 3 mm, (c)PCM Tebal 6 mm, (d) PCM Tebal 9 mm	18
Gambar 3.4 Kategori Kualitas Meshing.....	19
Gambar 4.1 Hasil Eksperimen dengan C-rate = 3.5.....	23
Gambar 4.2 Hasil Simulasi dengan C-rate = 3.5.....	24
Gambar 4.3 Kontur Temperatur Baterai (a) tanpa PCM, (b) dengan PCM 3 mm, (c) dengan PCM 6 mm (d) dengan PCM 9 mm.....	26
Gambar 4.4 Grafik Temperatur Baterai dengan Variasi Ketebalan PCM.....	26
Gambar 4.5 Grafik Temperatur Baterai dengan Variasi Temperatur Lingkungan.....	28
Gambar 4.6 Kontur Temperatur Baterai dengan PCM Hexacosane (9 mm).....	29
Gambar 4.7 Temperatur Baterai dengan Variasi Jenis PCM dengan Ketebalan (a) 3 mm (b) 6 mm (c) 9 mm	30
Gambar 4.8 Analisa Perubahan Fasa pada PCM Hexacosane.....	33

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Baterai LiFePO_4 18650	12
Tabel 3.2 Spesifikasi PCM Capric Acid	12
Tabel 3.3 Spesifikasi PCM Hexacosane	13
Tabel 3.4 UDF dari Capric Acid	14
Tabel 3.5 UDF dari Hexacosane	14
Tabel 3.6 Kualitas dan Statistik Meshing.....	19
Tabel 3.7 Kondisi Batas pada Simulasi.....	20
Tabel 4.1 Temperatur Baterai dengan Variasi Ketebalan PCM.....	27
Tabel 4.2 Penurunan Temperatur Baterai dengan Variasi Temperatur Lingkungan	28
Tabel 4.3 Temperatur Baterai tanpa dan dengan Variasi Jenis PCM (tebal 3 mm)	31
Tabel 4.4 Temperatur Baterai tanpa dan dengan Variasi Jenis PCM (tebal 6 mm).....	31
Tabel 4.5 Temperatur Baterai tanpa dan dengan Variasi Jenis PCM (tebal 9 mm).....	31
Tabel 4.6 Temperatur Baterai dengan PCM Hexacosane	32
Tabel 4.7 Efektivitas Pendinginan PCM Hexacosane.....	32

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Masalah lingkungan seperti emisi gas buang kendaraan dan keterbatasan bahan bakar fosil telah mendorong tumbuhnya minat penelitian dan pengembangan teknologi baterai isi ulang untuk penyimpanan energi dan sumber tenaga hijau untuk transportasi. Baterai Lithium-ion (Li-ion) adalah kandidat yang menjanjikan di antara berbagai jenis baterai karena kestabilannya yang baik, tidak ada efek memori, tingkat *self-discharge* rendah dan kepadatan energi yang tinggi (Etacheri V, 2011). Baterai Lithium-Ion (Li-ion) adalah jenis baterai yang dapat diisi ulang dimana elektron bergerak dari elektroda negative (anoda) ke positif (katoda) selama fase penggunaan (*discharge*) dan sebaliknya selama fase pengisian (*charging*). Baterai Li-ion menggunakan senyawa litium sebagai bahan elektroda dan memiliki konduktivitas elektronik yang memadai (Verma, 2019). Modul dan kemasan baterai menghasilkan sejumlah panas selama pemakaian (*discharge*) karena reaksi eksotermik elektrokimia dan efek panas ohmik (*Joule heat*). Jika panas tidak dapat dihilangkan dengan efektif, akumulasi panas akan menyebabkan kenaikan suhu baterai, sehingga menurunkan kinerja siklus baterai dan bahkan menyebabkan *battery thermal runaway* (T. Yuksel, 2012). Secara khusus, kepadatan energi yang terus meningkat dari baterai lithium-ion pasti akan menyebabkan lebih banyak masalah panas berlebih (P. Nelson, 2002). Saat *discharge rate* meningkat, laju pembuangan panas juga meningkat hingga beberapa kali lipat dan kemudian baterai mulai memanas. Panas berlebih pada baterai akan mempengaruhi performa, umur penggunaan, faktor keselamatan, dan timbulnya *thermal runaway*, *thermal runaway* sendiri adalah proses kenaikan temperatur baterai secara tiba-tiba dan tidak terkendali diikuti oleh turunnya voltase secara mendadak (Feng, 2018). Oleh sebab itu manajemen termal pada baterai sangat dibutuhkan sebagai solusi untuk mengendalikan panas, meminimalkan resiko kerusakan dan meningkatkan faktor keamanan pada baterai Li-ion.

Ada dua metode untuk manajemen termal pada baterai yaitu dari dalam dan dari luar baterai, pertama dari dalam dengan mengontrol dimensi elektrode dan mengurangi resistansi, hal ini membantu dalam mengurangi terjadinya kehilangan daya dan mencegah terjadinya ledakan elektrolit yang dapat mengakibatkan kerusakan baterai secara keseluruhan. Kedua dari luar dengan dibedakan menjadi pendinginan aktif dan pendinginan pasif, pendinginan aktif pada umumnya menggunakan fluida udara dan liquid yang

memerlukan banyak bagian atau peralatan tambahan, terlebih pendinginan aktif juga dapat menurunkan efisiensi. Timbulnya panas pada baterai sangat dipengaruhi oleh discharge rate dan kondisi temperatur lingkungan sekitar (Verma, 2019). Sistem pendinginan pasif memiliki kelebihan dimana tidak memerlukan banyak peralatan tambahan (pompa, kompresor, pipa dll.) dan memerlukan energi masukan seperti sistem pendingin aktif yang tentu sangat mempengaruhi efisiensi dari kendaraan listrik. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan berfokus pada penggunaan pendinginan pasif pada baterai menggunakan *phase change material* (PCM). PCM adalah material yang mengalami perubahan fasa dan menggunakan ikatan kimianya untuk menyerap dan melepaskan panas. PCM memiliki prinsip kerja yaitu ketika sedang disuhu ruangan maka PCM akan berbentuk padatan yang kemudian akan menyerap panas hingga saat suhu tinggi (titik lelehnya) maka material akan berubah fasa mencair cair dan kembali padatan ketika suhu kembali normal. Sedangkan keuntungan menjadikan PCM sebagai pendinginan pasif adalah kemudahan penggabungan dengan sistem, efisien, pemeliharaan yang mudah, penggunaan dapat dalam waktu yang lama, harga yang murah, serta pendistribusian dan penurunan panas yang cukup baik. Jenis dan ketebalan PCM juga merupakan hal yang penting, dikarenakan jenis PCM yang beragam yang harus disesuaikan dengan kebutuhan, begitu juga nilai ketebalan PCM yang digunakan perlu disesuaikan dengan kebutuhan dan ketersediaan dimensi atau ruang yang dimiliki (Javani, 2014).

Tim Nogogeni ITS merupakan salah satu Tim dibawah naungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) yang melakukan riset pada mobil listrik, Tim Nogogeni telah mengikuti beberapa perlombaan seperti Kontes Mobil Hemat Energy (KMHE) dan Shell Eco Marathon Asia (SEM-A) dalam mengembangkan mobil listrik Nogogeni kategori urban motor listrik (sekarang Nogogeni V Evo), banyak parameter yang diperhatikan salah satunya adalah parameter manajemen termal pada baterai agar tidak terjadinya kerusakan dan bertujuan meningkatkan faktor keamanan. Baterai yang digunakan oleh kendaraan Nogogeni V Evo merupakan baterai Lithium-ion sebagai penggerak motor listrik dan penyimpan daya. Dalam proses riset Nogogeni V Evo, riset mengenai manajemen termal pada baterai yang digunakan pada Nogogeni V Evo masih belum dilakukan. Pada *Material Safety Data Sheet* baterai Nogogeni V Evo dituliskan bahwa batas suhu aman baterai adalah 90°C akibat penggunaan atau suhu lingkungan, selain itu baterai Li-ion pada kendaraan listrik memiliki operasi maksimal pada suhu 25°C - 60°C, diatas suhu tersebut baterai akan mengalami penurunan efisiensi (Verma, 2019). Oleh karena itu perlu dilakukan riset lebih lanjut dengan mendesain sistem pendingin sebagai manajemen termal pada baterai menggunakan *phase*

change material (PCM). Selain itu perlu juga dilakukan penelitian mengenai kriteria PCM yang baik sebagai acuan untuk memilih jenis PCM. Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa variasi diantaranya ketebalan PCM dan jenis PCM.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana pengaruh variasi ketebalan PCM terhadap performansi sistem pendingin pada baterai litium ion?
- b. Bagaimana kriteria jenis PCM yang baik jika dikaji dalam hal perpindahan panas, dengan cara membandingkan hasil variasi jenis PCM?

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui pengaruh variasi ketebalan PCM terhadap performansi sistem pendingin pada baterai Li-ion.
- b. Mengetahui kriteria jenis PCM yang baik jika dikaji dalam hal perpindahan panas, dengan cara membandingkan hasil variasi jenis PCM.

1.4 Batasan Masalah

Analisa yang digunakan berdasarkan atas heat and mass balance termodinamika siklus rankine dengan variabel dan asumsi sebagai berikut :

1. Dimensi dan material baterai Nogogeni V Evo (LI-ION (LiFePO4) *BATTERY* (UN3480)).
2. Analisa distribusi termal dan karakteristik termal baterai menggunakan simulasi *software ANSYS Fluent R19.2*.
3. Variable yang divariasikan adalah ketebalan PCM yaitu 3 mm, 6 mm dan 9 mm.
4. Suhu awal baterai adalah 32°C, sama dengan suhu rata-rata lingkungan.
5. Efek radiasi sangat kecil sehingga dihilangkan.
6. Heat generation rate baterai konstan dan *uniform*.
7. Discharge rate = 3C.
8. Aliran fluida di dalam PCM dianggap steady.

1.5 Relevansi Tugas Akhir

Penelitian yang diusulkan ini diharapkan memberi manfaat sebagai berikut:

- a. Menambah pengetahuan tentang manajemen termal pada baterai.
- b. Meningkatkan pemahaman terhadap penggunaan *phase change material* (PCM) pada sistem pendinginan baterai.
- c. Sebagai referensi atau penunjang dalam mendukung riset mengenai sistem manajemen termal pada baterai Nioogeni V Evo.

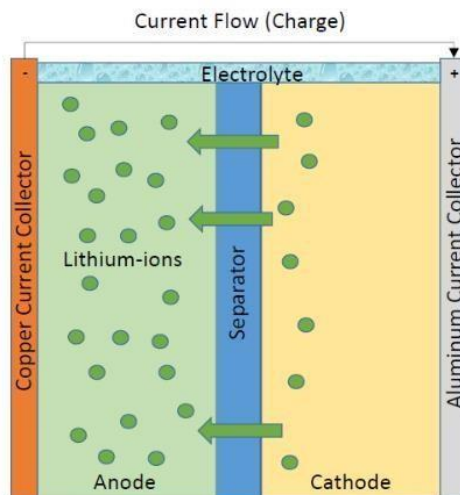
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baterai Lithium-ion

Pengertian dari baterai adalah suatu media penyimpan energi yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui proses elektrokimia. Baterai Lithium-Ion (Li-ion) adalah jenis baterai yang dapat diisi ulang. Baterai Li-ion memiliki dua buah elektroda yaitu, elektroda positif (katoda) dan elektroda negatif (anoda), baterai litium-ion diawali dengan berpindahnya ion-ion litium dari katoda ke anoda melalui elektrolit sebagai medium (proses *charging*), kemudian proses *discharging* ditandai dengan ion-ion litium yang berpindah melalui elektrolit dari anoda ke katoda. Baterai lithium-ion pada umumnya menggunakan material karbon sebagai anoda dan material metal oxide yang mengandung ion lithium sebagai katoda. Bahan katoda lainnya adalah lithium cobalt oksida, lithium mangan oksida, lithium iron phosphate, lithium mangan nikel, dan lithium nikel cobalt aluminium oxide. Adapun beberapa kelebihan yang dimiliki oleh baterai Li-ion adalah memiliki *discharge rate* yang tinggi, kestabilannya yang baik, tidak ada efek memori, tingkat *self-discharge* rendah dan kepadatan energi yang tinggi. Pada gambar 2.1 dibawah ini menunjukkan prinsip kerja baterai Lithium Ion.

Gambar 2.1 Aliran Ion Litium dalam Sel Baterai (Warner, 2015)



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/dm³ dan 230 Wh/kg.

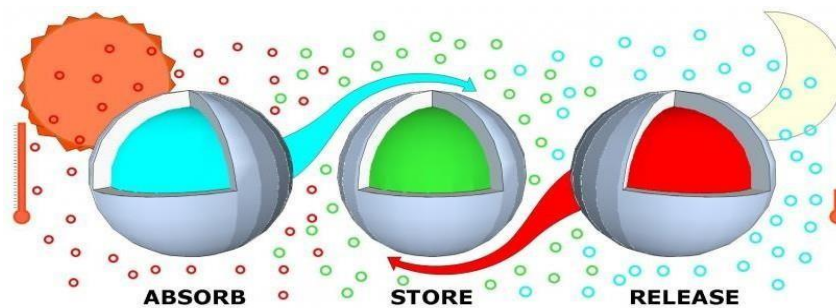
- b. Tegangan keluaran rata-rata yang tinggi yaitu sebesar (~3,6 V) dan tiga kali lebih besar dari baterai Ni-Cd atau Ni MH.
- c. Daya keluaran yang tinggi dan mencapai 2000 W/kg untuk waktu yang singkat.
- d. Self-Discharge yang lebih rendah dari baterai Ni-Cd atau Ni MH yaitu sebesar 3% perbulan.
- 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.

2.2 Manajemen Termal pada Baterai

Ada dua metode untuk manajemen termal pada baterai yaitu dari dalam dan dari luar baterai, pertama dari dalam dengan mengontrol dimensi elektrode dan mengurangi resistansi, hal ini membantu dalam mengurangi terjadinya kehilangan daya dan mencegah terjadinya ledakan elektrolit yang dapat mengakibatkan kerusakan baterai secara keseluruhan. Kedua dari luar dengan dibedakan menjadi pendinginan aktif dan pendinginan pasif, pendinginan aktif pada umumnya menggunakan fluida udara dan liquid, untuk pendinginan pasif dapat dilakukan dengan memanfaatkan PCM (Verma, 2019). Suhu baterai yang tinggi dapat secara signifikan mempercepat penurunan kapasitas baterai Li-ion. Dua ancaman utama pada unit baterai karena kenaikan suhu adalah (i) thermal runaway (ii) ledakan elektrolit. Oleh karena itu, manajemen baterai pada baterai sangat penting. Sistem pendinginan pasif memiliki kelebihan dimana tidak memerlukan banyak peralatan tambahan (pompa, kompresor, pipa dll.) dan memerlukan energi masukan seperti sistem pendingin aktif yang tentu sangat mempengaruhi efisiensi dari kendaraan listrik dikarenakan membutuhkan energi masukan yang cukup besar seiring dengan penggunaan *discharge rate* yang tinggi dan suhu lingkungan yang tidak menguntungkan. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan berfokus pada penggunaan pendinginan pasif pada baterai menggunakan *phase change material* (PCM).

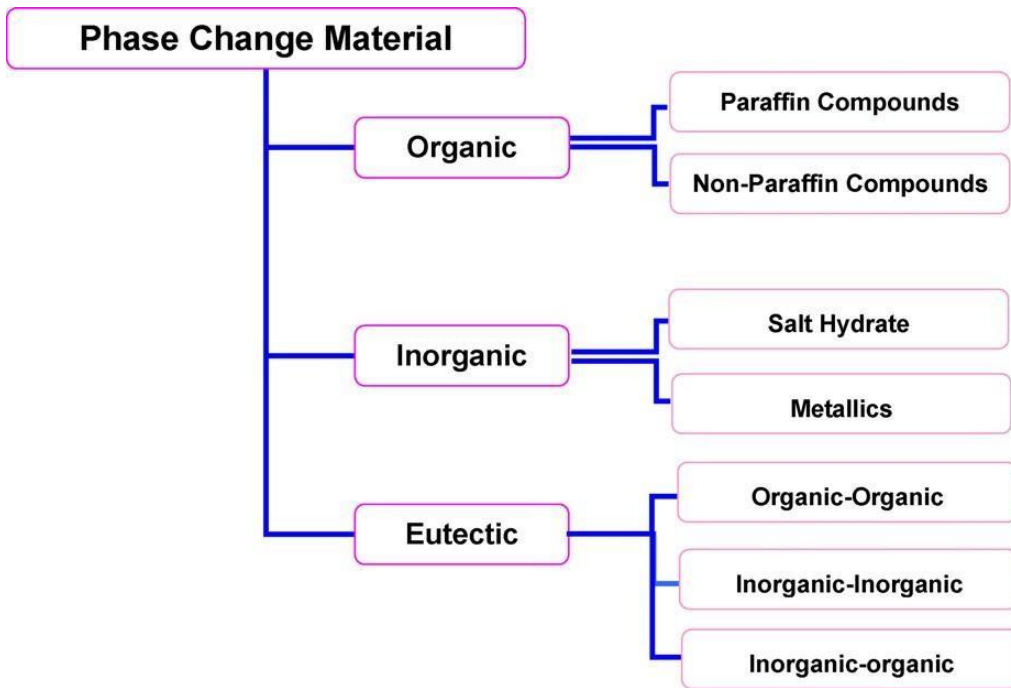
2.3 Phase Change Material

Material yang mengalami perubahan fasa dan menggunakan ikatan kimianya untuk menyerap dan melepaskan panas disebut *Phase Change Material* (PCM). PCM memiliki prinsip kerja yaitu akan menyerap panas disuatu lingkungan yang memiliki suhu lebih tinggi dan menyimpan panas tersebut lalu melepaskan kalor tersebut di suatu lingkungan yang memiliki suhu temperature lebih rendah. Ketika sedang disuhu ruangan maka PCM akan berbentuk padatan yang kemudian akan menyerap panas hingga saat suhu tinggi (titik lelehnya) maka material akan berubah fasa mencair cair dan kembali padatan ketika suhu kembali normal. Panas yang bekerja pada PCM ini adalah panas laten yang merubah fasa suatu material namun cenderung memiliki suhu yang konstan. Material yang digunakan sebagai PCM harus memiliki panas laten yang besar dan konduktifitas termal yang tinggi.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja PCM (aiaaustin.org,2021)

Keuntungan menggunakan PCM adalah material yang aman, tidak korosif, mampu menyimpan panas dalam kapasitas besar dengan volume material yang kecil dan proses penyerapan dan pengeluaran energi panas terjadi pada temperatur yang hampir konstan. Selain itu PCM juga ramah lingkungan sehingga tidak membahayakan bagi penggunaannya. Sedangkan keuntungan menjadikan PCM sebagai pendinginan passif adalah kemudahan penggabungan dengan sistem, efisien, pemeliharaan yang mudah, penggunaan dapat dalam waktu yang lama, harga yang murah, serta pendistribusian dan penurunan panas yang cukup baik. *Phase change material* (PCM) ada beberapa jenis diantaranya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.3 Klasifikasi dari PCM (Sharma, 2007)

2.4 Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah energi yang berpindah akibat adanya perbedaan temperatur. Panas dapat berpindah dari suatu zat yang memiliki suhu lebih tinggi ke zat yang memiliki suhu lebih rendah. Terdapat tiga mekanisme perpindahan panas yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Fenomena perpindahan panas yang terjadi pada penelitian ini terjadi secara konduksi dan konveksi. Konduksi terjadi pada panas yang dihasilkan di dalam baterai kemudian merambat pada PCM, sedangkan konveksi dilakukan oleh baterai dan PCM ketika tersentuh dengan udara. Sedangkan untuk persamaan umum perpindahan panas pada baterai dimana perumusannya adalah sebagai berikut (Javani, 2014 dan Liu, 2014):

$$m \cdot Cp \cdot \frac{dT}{dt} = Q - hA(T_b - T_{amb}) \quad (1)$$

Dan dapat disimpulkan sebagai berikut:

$$Q = m \cdot Cp \cdot \frac{dT}{dt} + hA(T_b - T_{amb}) \quad (2)$$

Dimana: Q = Volumetric *heat generation*

m = Massa baterai

$C_p = \text{Specific heat}$

$\frac{dT}{dt} = \text{Laju perubahan temperatur per satuan waktu}$

$h = \text{Koefisien perpindahan panas konveksi}$

$A = \text{Luas permukaan baterai}$

$T_b = \text{Temperatur baterai}$

$T_{amb} = \text{Temperatur lingkungan}$

Sedangkan untuk perhitungan *Heat generation rate* yang terjadi pada baterai terjadi secara konstan dan *uniform*, perumusannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Q_{\text{gen rate}} = \frac{I(E-V)}{Vb} - T\Delta S \frac{I}{nF} \quad (3)$$

$$Q_{\text{gen rate}} = \frac{I(E-V)}{Vb} \quad (4)$$

Dimana: $Q = \text{Volumetric heat generation}$

$I = \text{Arus baterai}$

$E = \text{Tegangan sirkuit terbuka}$

$V = \text{Tegangan operasi}$

$Vb = \text{Volume baterai}$

$T = \text{Temperatur lingkungan}$

$\Delta S = \text{Perubahan entropi per satuan waktu}$

$n = \text{Jumlah perpindahan electron}$

$F = \text{Konstanta Faraday}$

Heat generation pada baterai disebabkan oleh reaksi elektrokimia dan efek panas ohmik (*Joule heat*). Panas baterai yang disebabkan oleh reaksi elektrokimia dikarenakan adanya siklus perpindahan elektron, sedangkan *Joule heat* merupakan sebuah proses ketika arus listrik melewati sebuah konduktor yang menyebabkan konduktor tersebut memproduksi panas (Angelo Onorati, 2009). Panas yang dihasilkan dari reaksi elektrokimia diabaikan karena pada simulasi ini menggunakan *high discharge rate* (3C) (Zhao, 2015) dan panas yang dihasilkan oleh potensial entropi biasanya digunakan pada range temperature yang sempit (Liu, 2014). Hasil perhitungan *heat generation rate* akan dimasukkan pada simulasi sebagai inputan untuk memprediksikan temperatur maksimal dari baterai.

Pada bagian pertama adalah persamaan panas yang terjadi secara konduksi, sedangkan bagian kedua adalah persamaan hilangnya panas pada baterai secara konveksi. Proses penyerapan panas yang terjadi pada PCM, persamaan energinya adalah (Zhao, 2019):

$$\frac{\partial(\rho_{PCM}H)}{\partial t} = \nabla(K_{PCM}\nabla T) + S_h \quad (5)$$

$$H = h + \Delta H \quad (6)$$

$$\Delta H = \beta H \quad (7)$$

$$\beta = 0 \text{ Untuk } T > T_m \quad (8)$$

$$\beta = 1 \text{ Untuk } T < T_m \quad (9)$$

Dimana: S_h = Laju *heat generation*

H = Enthalpy PCM

ΔH = Panas laten PCM

h = Panas sensibel PCM

K_{PCM} = Konduktivitas termal PCM

ρ_{PCM} = *Density* / massa jenis PCM

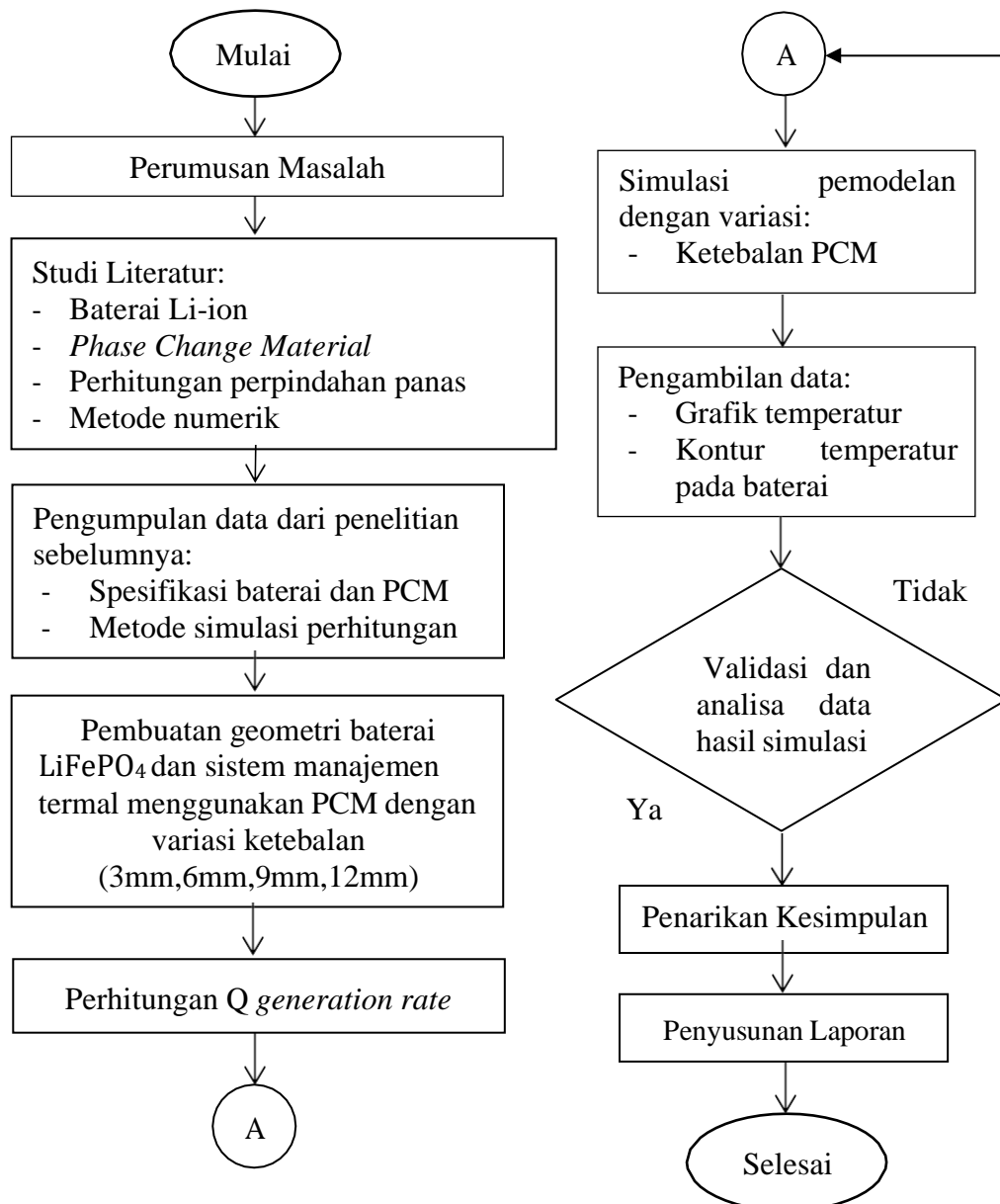
β = Fraksi liquid PCM

T_m = Temperatur leleh/ *liquidus temperature*

Pada bagian pertama persamaan (5), merupakan total panas yang dapat diserap oleh PCM, sehingga berdasarkan persamaan tersebut, semakin tinggi nilai dari temperatur melting, density, specific heat dan konduktivitas termal dari PCM, maka akan semakin besar juga nilai panas yang dapat diserap oleh PCM, sehingga syarat tersebut bisa digunakan sebagai acuan untuk memilih PCM yang baik.

BAB III METODE PENELITIAN

Penelitian manajemen termal dari sistem pendingin baterai dengan *Phase Change Material* pada baterai LiFePO_4 menggunakan metode numerik dilakukan melalui tahapan-tahapan sesuai pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metode Penelitian

3.1 Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini berupa spesifikasi baterai litium-ion jenis LiFePO_4 dan *Phase Change Material* jenis Capric Acid $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ dan Hexacosane. Pemilihan PCM jenis Capric Acid berdasarkan hasil dari penelitian (Verma, 2019) yang membandingkan hasil pendinginan dari PCM jenis capric acid dan PCM jenis n-octadecane dari (Javani, 2014), dan hasilnya PCM jenis capric acid memiliki performa pendinginan yang lebih baik. Kemudian dipilihlah PCM jenis hexacosane berdasarkan kriteria jenis PCM yang baik jika dikaji dalam hal perpindahan panas, yaitu yang memiliki nilai temperatur melting, density, specific heat dan konduktivitas termal yang besar. Data spesifikasi baterai didapatkan dari data pabrikan baterai dan beberapa referensi jurnal, untuk nilai konduktivitas termal baterai (K) didapatkan dari (Chen, 2004) sedangkan nilai *specific heat* baterai (C_p) didapatkan dari (Zheng, 2018). Data spesifikasi PCM didapatkan dari jurnal penelitian (Verma, 2019) dan (Zhao, 2015). Adapun data dari baterai dan PCM adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi Baterai LiFePO_4 18650

Besaran	Nilai
Nominal Voltage	3.7 V
Tegangan Operasi	3.2 V
Kapasitas	2 Ah
Arus (I)	6 A
C-rate	3C
Massa Jenis	2604.92 kg/m ³
Konduktivitas Termal (K)	1.035 W/m.°K
Specific Heat (C_p)	894 (J/kg°K)
Temperatur Maksimal Operasi	60°C

Tabel 3.2 Spesifikasi PCM Capric Acid (Verma, 2019)

Besaran	Nilai
Specific Heat (C_p)	475.59 (J/kg°K)
Latent Heat	152.7 (kJ/kg°K)
Konduktivitas Termal (solid)	0.2 (W/m°K)
Konduktivitas Termal (liquid)	0.12 (W/m°K)
Solidus Temperature	302 °K

Liquidus Temperature	305 °K
Boiling Temperature	542 °K
Density (solid)	878 kg/m ³
Density (liquid)	752 kg/m ³

Tabel 3.3 Spesifikasi PCM Hexacosane (Zhao,2015)

Besaran	Nilai
Spesific Heat (Cp)	1770 (J/kg°K)
Latent Heat	195 (kJ/kg°K)
Konduktivitas Termal (solid)	0.29 (W/m°K)
Konduktivitas Termal (liquid)	0.21 (W/m°K)
Solidus Temperature	327 °K
Liquidus Temperature	329 °K
Boiling Temperature	685.15 °K
Density (solid)	910 kg/m ³
Density (liquid)	822 kg/m ³

Setelah didapatkan beberapa data tersebut kemudian untuk langkah awal dilakukan pembuatan fungsi dari data spesifikasi PCM, khususnya pada nilai konduktivitas termal, fraksi liquid dan *density*, dikarenakan PCM adalah material yang mengalami perubahan fasa maka nilai dari *density* dan konduktivitas termalnya juga akan berubah, oleh sebab itu diperlukannya pendefinisian fungsi dari masing-masing PCM, yang mana fungsi tersebut nantinya akan dimasukkan pada set up simulasi dengan cara meng-*compile User Defined Function* (UDF). UDF sendiri adalah salah satu fitur pada ANSYS agar pengguna dapat menambahkan fungsi tambahan untuk meningkatkan kemampuan *solver*, dikarenakan fungsi yang dimasukkan adalah fungsi yang spesifik dalam suatu sistem yang besar. UDF dapat dibuat atau dituliskan dalam bahasa pemrograman C. Hal ini juga menunjukkan bahwa proses yang terjadi pada simulasi antara baterai dan PCM tidak hanya proses konduksi biasa yang menyebabkan adanya penurunan temperatur, melainkan juga adanya panas laten yang terjadi pada PCM dan diikuti dengan adanya perubahan fasa. Berikut merupakan fungsi dan UDF dari masing-masing PCM (penulisan UDF ada pada Lampiran):

Tabel 3.4 UDF dari Capric Acid

Besaran	Fungsi	Nilai
<i>Density</i> (ρ)	$T < T_{solidus}$	878 kg/m ³
	$T > T_{solidus} \ \& \ T < T_{liquidus}$	$\rho = 878 - (36 \times \frac{(T-302)}{2})$
	$T > T_{liquidus}$	752 kg/m ³
Konduktivitas termal (k)	$T < T_{solidus}$	0.2 (W/m ^o K)
	$T > T_{solidus} \ \& \ T < T_{liquidus}$	$k = 0.2 - (0.01 \times \frac{(T-302)}{2})$
	$T > T_{liquidus}$	0.12 (W/m ^o K)
Fraksi Liquid (β)	$T > T_{liquidus}$	$\beta = 0$
	$T > T_{solidus} \ \& \ T < T_{liquidus}$	$\beta = \frac{(305 - T)}{2}$
	$T < T_{liquidus}$	$\beta = 1$

Tabel 3.5 UDF dari Hexacosane

Besaran	Fungsi	Nilai
<i>Density</i> (ρ)	$T < T_{solidus}$	910 kg/m ³
	$T > T_{solidus} \ \& \ T < T_{liquidus}$	$\rho = 910 - (36 \times \frac{(T-327)}{2})$
	$T > T_{liquidus}$	822 kg/m ³
Konduktivitas termal (k)	$T < T_{solidus}$	0.29 (W/m ^o K)
	$T > T_{solidus} \ \& \ T < T_{liquidus}$	$k = 0.29 - (0.01 \times \frac{(T-327)}{2})$
	$T > T_{liquidus}$	0.21 (W/m ^o K)
Fraksi Liquid (β)	$T > T_{liquidus}$	$\beta = 0$
	$T > T_{solidus} \ \& \ T < T_{liquidus}$	$\beta = \frac{(329 - T)}{2}$
	$T < T_{liquidus}$	$\beta = 1$

Berdasarkan perumusan fungsi pada tabel di atas, ditulislah fungsi tersebut menjadi UDF dalam bahasa pemrograman C. Setelah pembuatan UDF, dilanjutkan dengan perhitungan *Heat generation rate* pada baterai LiFePO₄ jenis 18650. Panas yang dihasilkan baterai berasal dari panas hasil reaksi elektrokimia Q_r dan *joule heat* Q_j . Panas yang dihasilkan dari reaksi elektrokimia diabaikan karena pada simulasi ini menggunakan *high discharge rate* (3C) (Zhao, 2015) dan panas yang dihasilkan oleh potensial entropi biasanya digunakan pada range temperature yang sempit (Liu, 2014).

Joule heat merupakan sebuah proses ketika arus listrik melewati sebuah konduktor (resistansi internal) yang menyebabkan konduktor tersebut memproduksi panas (Angelo Onorati, 2009), dengan nilai $I = 6 \text{ A}$; $E = 3.7 \text{ v}$; $V = 3.2 \text{ v}$ maka:

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

$$Q_j = (6 \text{ A}) \times ((3.7\text{V}) - (3.2\text{V}))$$

$$Q_j = 3 \text{ W}$$

Kemudian nilai q_{gen} -rate atau panas volumetrik didapatkan dengan volume baterai = 1.6532×10^{-5} , didapatkan hasil sebagai berikut:

$$Q_{gen} \text{ rate} = \frac{Q_{gen}}{V}$$

$$Q_{gen} \text{ rate} = \frac{3 \text{ W}}{1.6532 \times 10^{-5}}$$

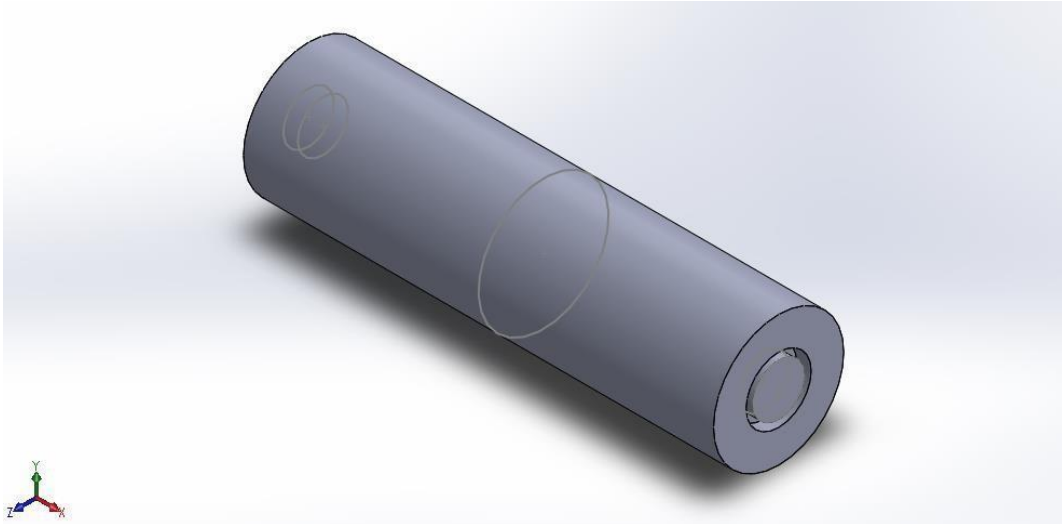
$$Q_{gen} \text{ rate} = 181,466.2 \text{ W/m}^3$$

3.2 Simulasi Manajemen Termal pada Baterai

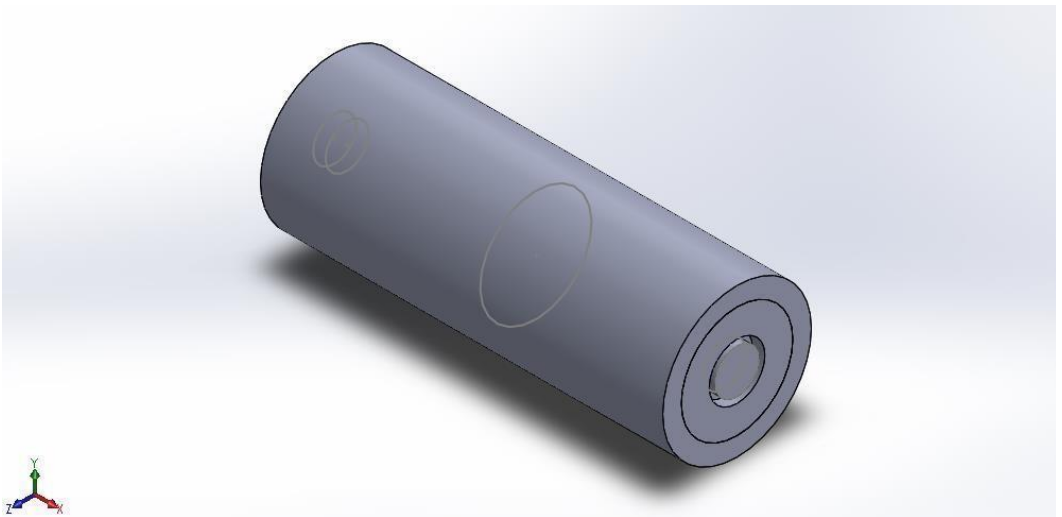
Pada simulasi dilakukan beberapa tahap seperti pembentukan geometri baterai, meshing, set-up atau memasukkan data-data yang diperlukan saat simulasi dan post-processing atau munculnya hasil simulasi berupa kontur dan plot grafik temperatur pada baterai.

3.2.1 Geometri

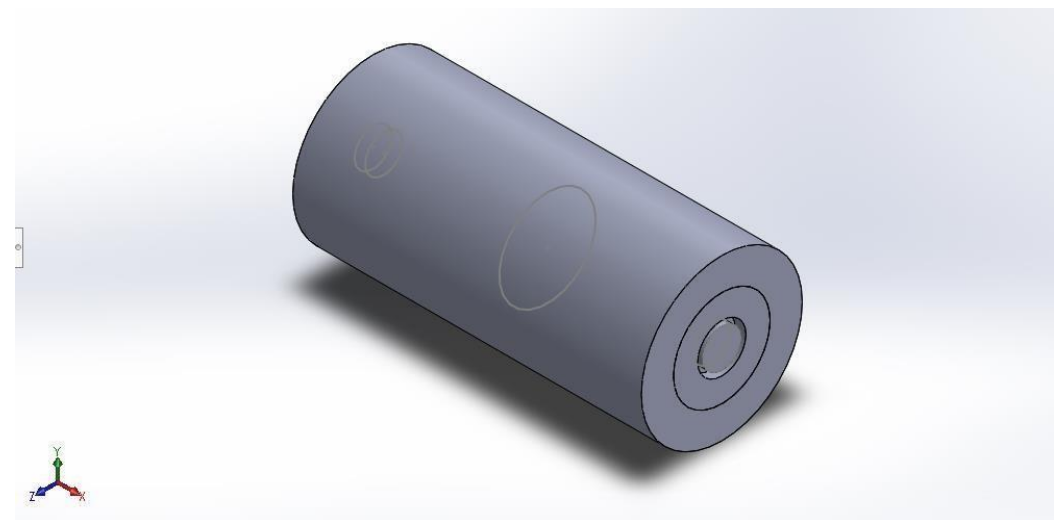
Proses pembuatan geometri baterai dilakukan dengan *software Solidworks*. Geometri baterai dibuat dengan dimensi diameter lingkaran sebesar 18 mm dan ketinggian baterai sebesar 65 mm. Setelah geometri baterai dibuat dilanjutkan dengan membuat dimensi dari PCM yang mengililingi baterai dengan variasi ketebalan 3 mm, 6 mm dan 9 mm.



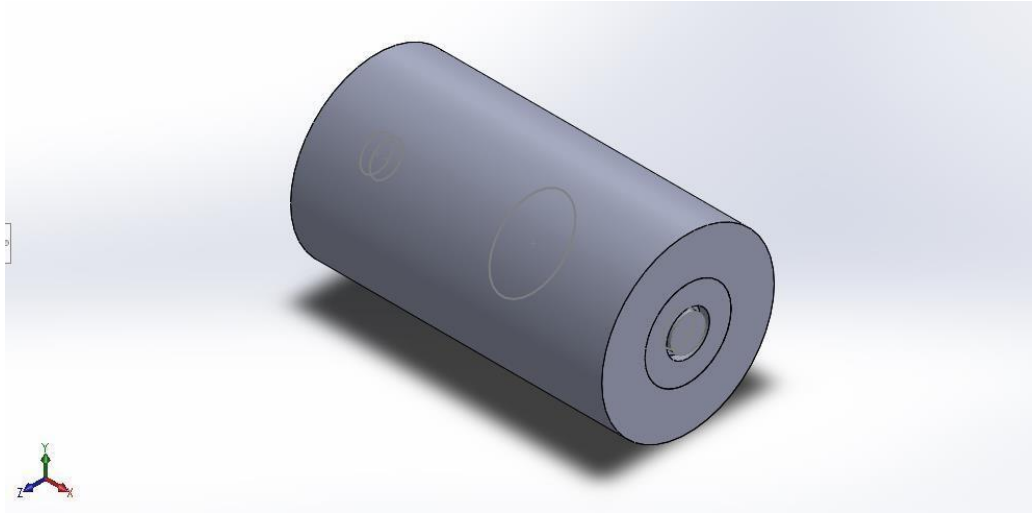
(a)



(b)



(c)

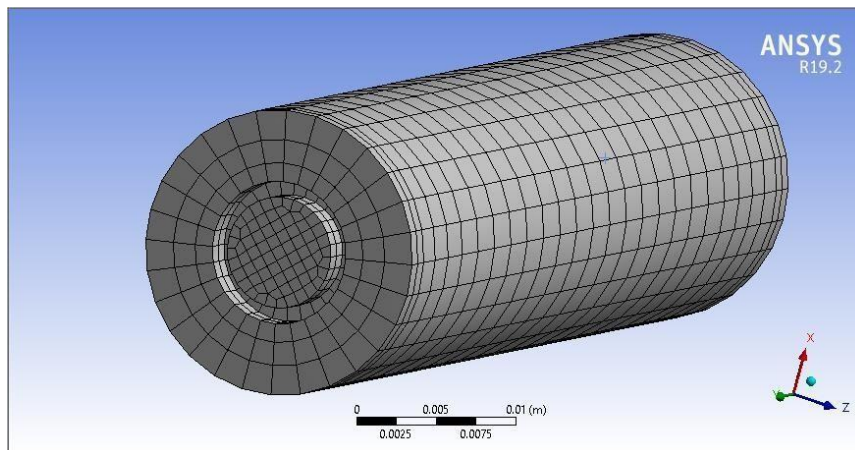


(d)

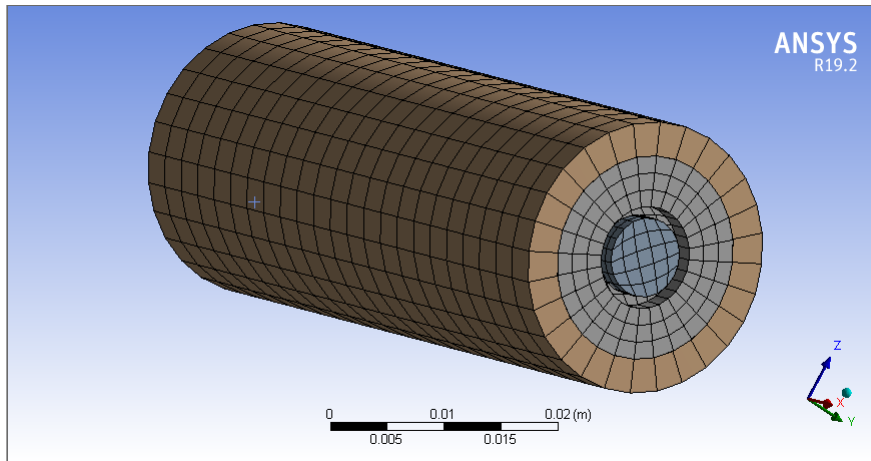
Gambar 3.2 Geometri Baterai (a) tanpa PCM (b) PCM Tebal 3 mm, (c) PCM Tebal 6 mm, (d) PCM Tebal 9 mm

3.2.2 Meshing

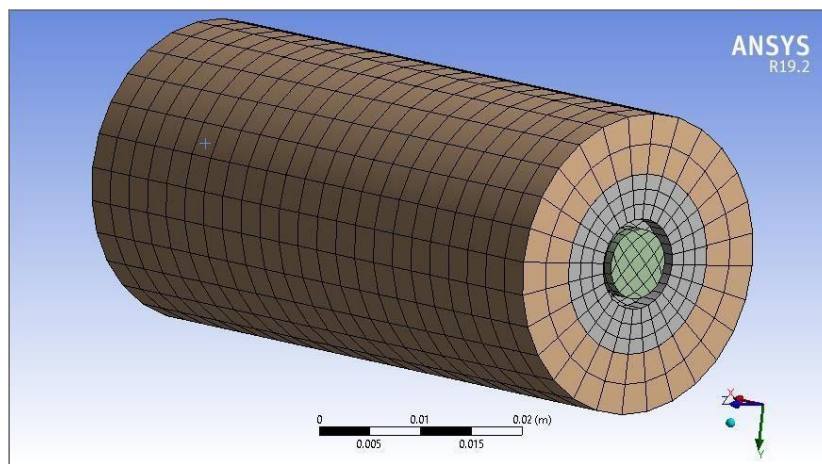
Proses meshing dilakukan dengan software ANSYS R19.2. Meshing adalah pembagian geometri menjadi beberapa volume kontrol yang akan dilakukan perhitungan matematis pada setiap elemennya, meshing bertujuan untuk meningkatkan hasil akurasi simulasi. Berikut adalah hasil proses meshing dari geometri baterai:



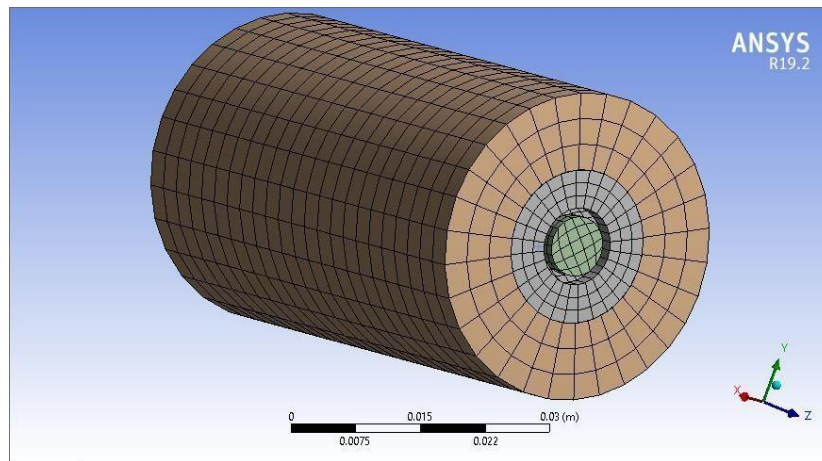
(a)



(b)



(c)



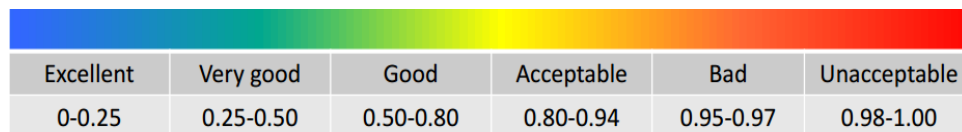
(d)

Gambar 3.3 Meshing Geometri Baterai (a) Tanpa PCM, (b) PCM Tebal 3 mm, (c) PCM Tebal 6 mm, (d) PCM Tebal 9 mm

Tabel 3.6 Kualitas dan Statistik Meshing

Geometri Baterai	Skewness	Noda	Elemen
Tanpa PCM	0.10445	5600	4883
PCM 3 mm	0.1403	5336	3971
PCM 6 mm	0.1308	6008	4615
PCM 9 mm	0.12035	6872	5397

Melalui proses *meshing* dapat pula diketahui berapa jumlah elemen dan kualitas dari *meshing* itu sendiri untuk masing-masing variasi geometri. Nilai *meshing* dikategorikan baik atau buruk tergantung pada nilai dari *skewness*. *Skewness* merupakan perbedaan antara bentuk sel dan bentuk elemen sel sama sisi pada volume ekivalen. Sel yang memiliki *skewness* tinggi akan menurunkan akurasi dan mengganggu solusi perhitungan sehingga sulit mencapai konvergensi. *Meshing* dianggap baik jika nilai *skewness* mendekati 0 dan dikategorikan buruk jika nilai *skewness* mendekati 1. Jika *meshing* dikategorikan baik maka *meshing* tersebut valid untuk dianalisa perhitungan matematisnya. Berikut adalah kategori kualitas *meshing*:



Gambar 3.4 Kategori Kualitas Meshing (ANSYS UK Ltd., 2009)

Berdasarkan referensi tersebut, kualitas dari *meshing* yang sudah dilakukan pada geometri baterai tanpa PCM dan baterai dengan variasi ketebalan PCM sudah dikatakan baik dan layak untuk dilakukan proses selanjutnya yaitu pembuatan *set-up* simulasi.

3.2.3 Pre-Processing

Setelah proses *meshing* dilakukan, selanjutnya memilih model yang digunakan dan memilih jenis material serta memasukkan data karakteristik material yang digunakan beserta UDF yang sudah dibuat untuk tiap material PCM, kemudian menentukan kondisi batas dan memasukkan data yang telah dihitung (*Q generation rate*) dan data-data lainnya seperti data spesifikasi baterai dan PCM. Setelah semua data dimasukkan, kemudian dilakukan perhitungan pada ANSYS *Fluent* R19.2. Berikut merupakan *boundary condition* dari simulasi, langkah set up simulasi ada pada Lampiran:

Tabel 3.7 Kondisi Batas pada Simulasi

Kondisi Batas	Keterangan	
MSMD Battery Model	Cell Capacity	2 Ah
	C-rate	3
	Initial DoD	0
Material Baterai	<i>Density (constant)</i>	2604.92 Kg/m ³
	<i>Spesific Heat (constant)</i>	894 J/Kg°K
	Konduktivitas Termal (<i>constant</i>)	1.035
Dinding Luar Baterai dan PCM	Konveksi	$h = 7 \text{ W/m}^2\text{K}$
	<i>Free Stream Temperature</i>	306 °K
	<i>Heat Generation Rate</i>	181466.2 W/m ³

3.2.4 Processing

Setelah proses *pre-processing* dilakukan perhitungan dan simulasi menggunakan bantuan software ANSYS *Fluent* R19.2.

3.2.5 Post-processing

Setelah dilakukan kalkulasi kemudian didapatkan grafik temperatur baterai seiring berjalannya waktu, kemudian dilakukan pengaturan kontur untuk mendapatkan gambaran kontur temperatur baterai.

3.3 Validasi Simulasi dengan Eksperimen

Setelah didapatkan data hasil berupa grafik dan kontur temperatur dari simulasi baterai tanpa manajemen termal PCM, kemudian dilakukan perbandingan dengan hasil eksperimen dari (Kurniawan, 2020), literasi tersebut melakukan eksperimen dengan jenis, tipe dan voltase baterai yang sama yaitu Li-ion dengan tipe 18650 dengan voltase 3.7 Volt. Hasil dari eksperimen tersebut menghasilkan sebuah visualisasi temperatur baterai dengan discharge rate (C-rate) sebesar 3.5, kemudian hasil eksperimen tersebut dibandingkan dengan hasil simulasi baterai tanpa PCM dengan besar C-rate yang sama.

3.4 Analisa Data dan Penarikan Kesimpulan

Setelah didapatkan data dari hasil simulasi kemudian dilakukan analisa. Dilakukan perbandingan temperatur dari baterai tanpa menggunakan PCM dan dengan menggunakan PCM, dibahas juga pengaruh variasi ketebalan PCM pada sistem manajemen termal sistem pendingin pasif.

3.5 Penulisan Laporan

Semua hasil dari simulasi menggunakan ANSYS *Fluent* R19.2 dan analisisnya akan dituangkan ke dalam sebuah laporan tugas akhir yang disusun secara sistematis.

Halaman ini sengaja dikosongkan

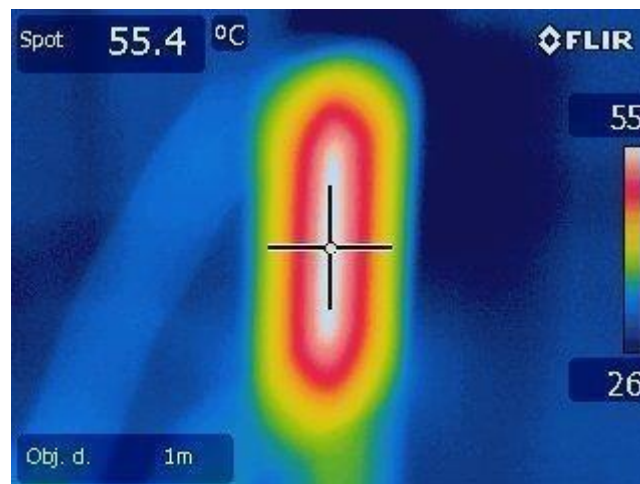
BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

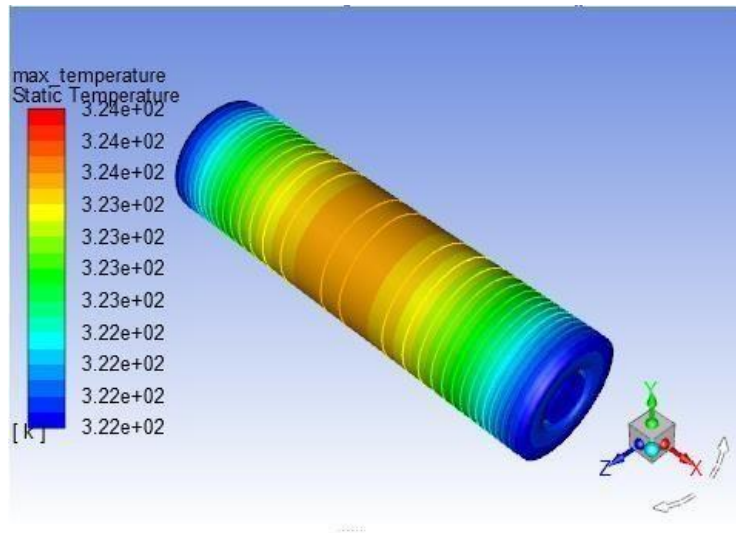
Pada bab ini akan dibahas hasil simulasi mengenai pengaruh variasi ketebalan PCM sebagai sistem pendinginan pasif pada baterai berbentuk silinder sel dengan metode CFD. Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui penurunan temperatur yang paling besar terhadap variasi ketebalan PCM pada baterai. Data yang didapat meliputi kontur temperatur baterai dan grafik temperatur baterai ketika dilakukan simulasi. Analisis dilakukan dengan membandingkan besar penurunan temperatur dari tiap variasi ketebalan dan dilakukan validasi dengan cara membandingkan dengan hasil eksperimen.

4.1 Validasi

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi yang didapat dan hasil eksperimen (Kurniawan, 2020), eksperimen tersebut menggunakan baterai dengan jenis, tipe dan voltase baterai yang sama yaitu Li-ion dengan tipe 18650 dengan voltase 3.7 Volt. Hasil dari eksperimen tersebut menghasilkan sebuah visualisasi temperatur baterai dengan set-up *discharge rate* (C-rate) sebesar 3.5. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen adalah sebagai berikut:



Gambar 4.1 Hasil Eksperimen dengan C-rate = 3.5 (Kurniawan, 2020)



Gambar 4.2 Hasil Simulasi dengan C-rate = 3.5

Berdasarkan hasil eksperimen didapatkan temperatur maksimal baterai sebesar 55.4°C, sedangkan hasil temperatur maksimal dari simulasi didapatkan sebesar 323.9°K atau 50.75°C, sehingga perhitungan nilai error adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{error \%} &= \frac{|50.75^{\circ}\text{C} - 55.4^{\circ}\text{C}|}{55.4^{\circ}\text{C}} \\ &= 8.3\% \end{aligned}$$

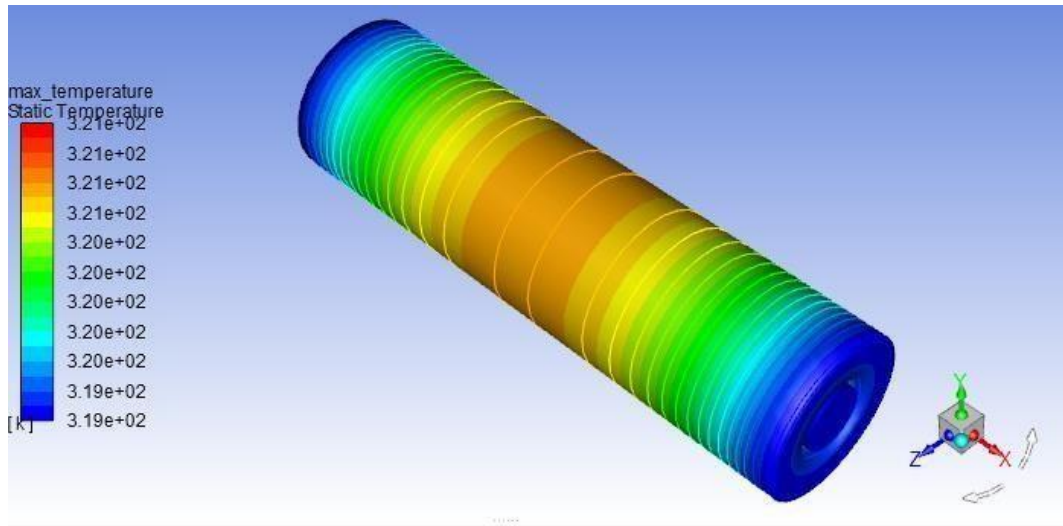
Berdasarkan perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa hasil *set-up* simulasi sudah mendekati dengan hasil sesungguhnya.

4.2 Analisa Pengaruh Ketebalan PCM

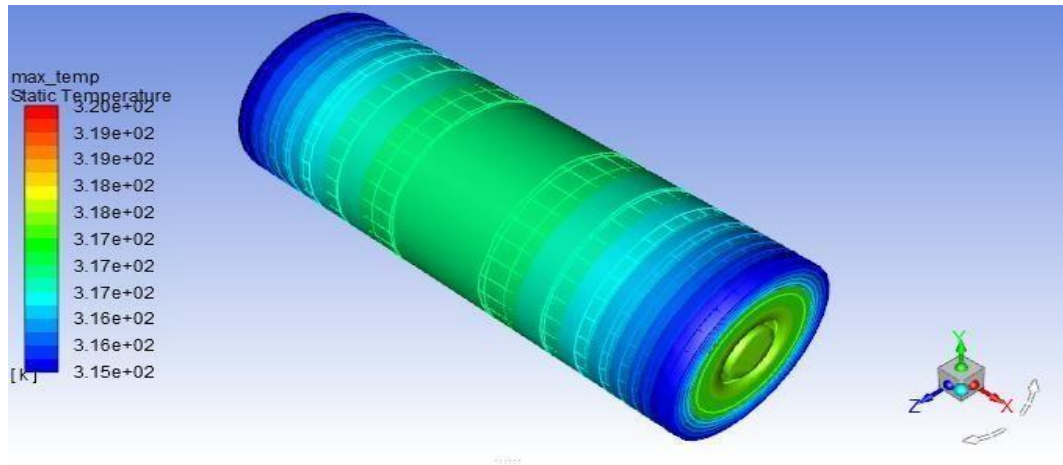
Variasi yang dilakukan adalah mengubah ketebalan PCM yang digunakan sebagai pendinginan pasif pada baterai, jenis PCM yang digunakan adalah *Capric Acid* (CH₃(CH₂)₈COOH) dengan variasi ketebalan 3 mm, 6 mm dan 9 mm.

4.2.1 Kontur Temperatur Baterai

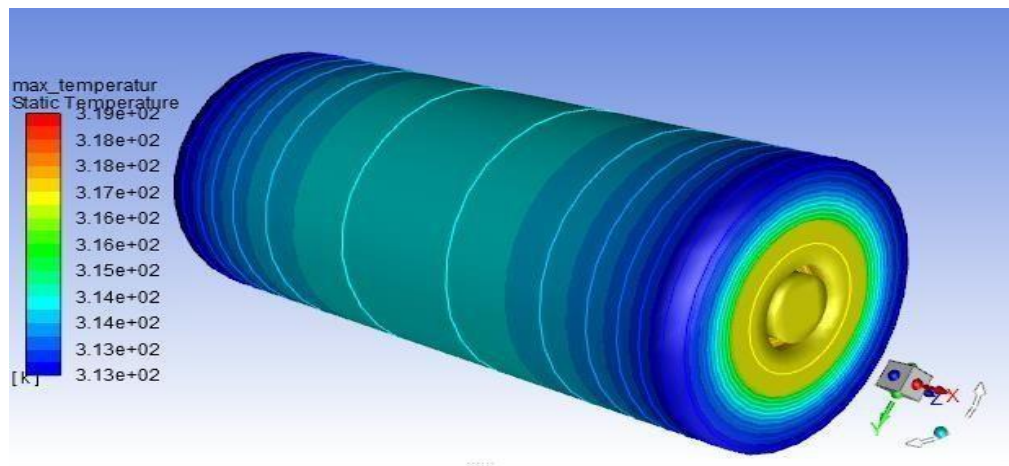
Kontur temperatur baterai merupakan hasil dari simulasi yang dilakukan, kontur tersebut akan menunjukkan persebaran termal pada baterai dan pengaruh ketebalan PCM yang digunakan sebagai sistem pendinginan pasif. Dari simulasi yang dilakukan didapatkan kontur baterai sebagai berikut:



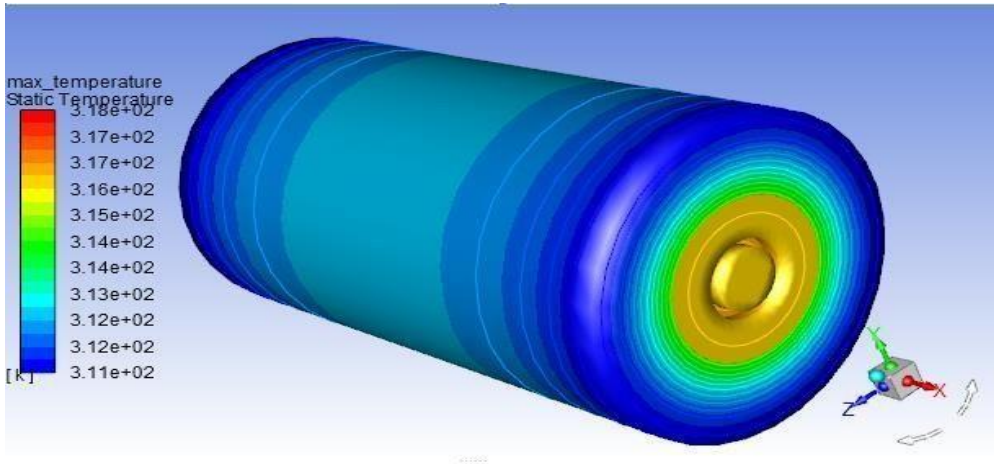
(a)



(b)



(c)



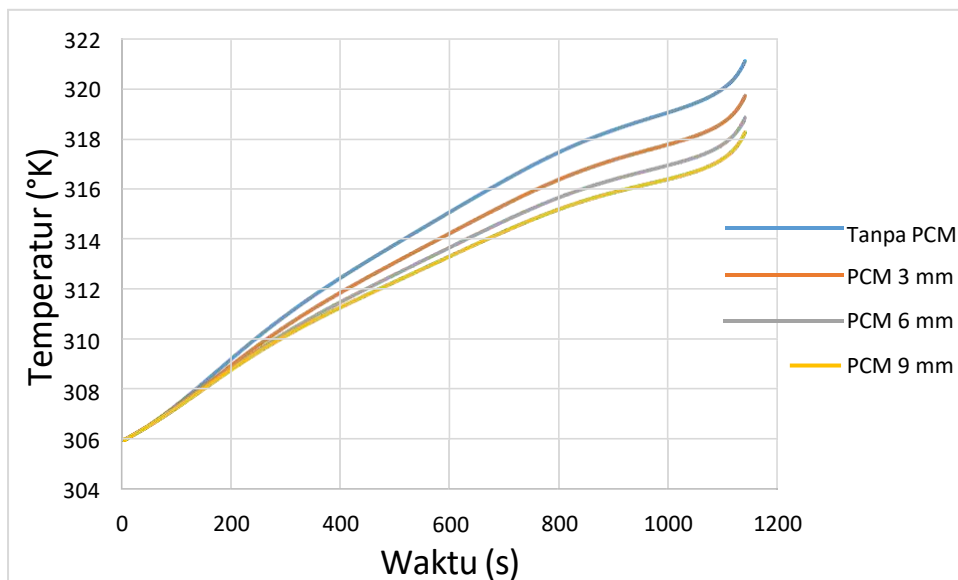
(d)

Gambar 4.3 Kontur Temperatur Baterai (a) tanpa PCM, (b) dengan PCM 3 mm, (c) dengan PCM 6 mm (d) dengan PCM 9 mm

Berdasarkan kontur tersebut menunjukkan bahwa baterai tanpa PCM memiliki suhu maksimal mencapai 321°K , sedangkan untuk baterai menggunakan sistem pendinginan pasif PCM menunjukkan adanya penurunan temperatur maksimal. Baterai yang menggunakan PCM dengan ketebalan 3 mm memiliki suhu maksimal sebesar 320°K , sedangkan baterai yang menggunakan PCM dengan ketebalan 6 mm, memiliki suhu maksimal sebesar 319°K dan untuk PCM dengan ketebalan 9 mm memiliki suhu maksimal sebesar 318°K .

4.2.2 Grafik Temperatur Baterai

Adapun selain kontur temperatur baterai, hasil simulasi berupa grafik temperatur baterai. Dari simulasi yang dilakukan didapatkan grafik temperatur baterai sebagai berikut:



Gambar 4.4 Grafik Temperatur Baterai dengan Variasi Ketebalan PCM

Berdasarkan grafik tersebut didapatkan pergerakan temperatur baterai berdasarkan waktu, pergerakan temperatur tiap grafik memiliki pergerakan yang hampir mirip, dapat dilihat juga seiring bertambahnya ketebalan maka semakin turun juga temperatur maksimal dari baterai. Sehingga dapat disimpulkan PCM mampu memberikan efek penurunan temperatur maksimal dari baterai.

4.2.3 Penurunan Temperatur Maksimal Baterai

Berdasarkan grafik yang didapatkan di simulasi disajikan juga data berupa tabel, berikut merupakan rekap hasil temperatur maksimal baterai pada *time step* dan waktu yang sama dengan variasi ketebalan PCM.

Tabel 4.1 Temperatur Baterai dengan Variasi Ketebalan PCM

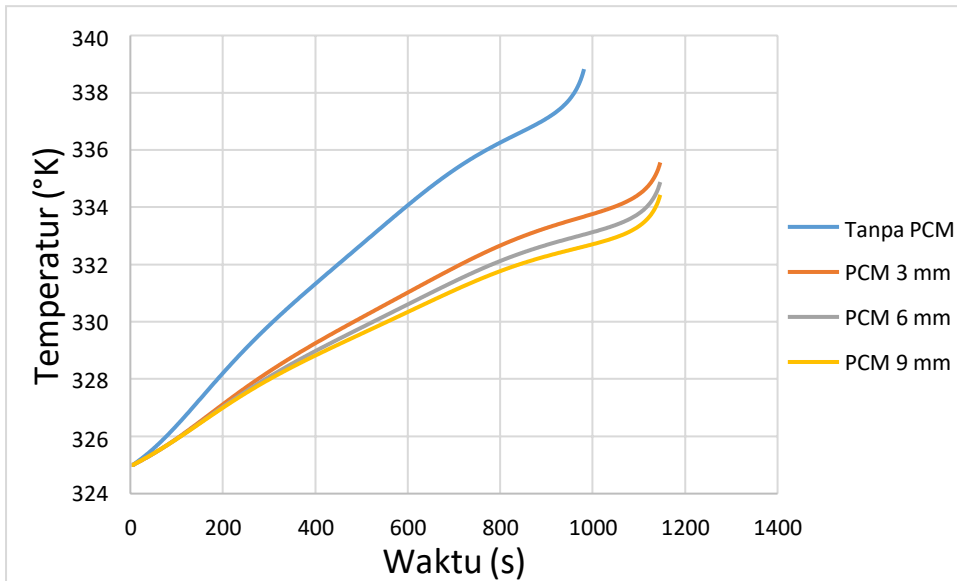
Variasi Ketebalan PCM	Tipe Step	Waktu (s)	Temperatur Maksimal (°K)
Tanpa PCM	379	1140	321.09
PCM 3 mm	379	1140	319.70
PCM 6 mm	379	1140	318.83
PCM 9 mm	379	1140	318.25

Dari tabel tersebut dapat terlihat nilai yang lebih jelas untuk nilai temperatur maksimal dari baterai pada *time step* dan waktu yang sama. Temperatur paling tinggi ditunjukkan oleh baterai tanpa PCM dengan temperatur maksimal mencapai 321.09°K dan temperatur terendah pada baterai menggunakan PCM 9 mm dengan temperatur maksimal mencapai 318.25°K. Penurunan temperatur didapatkan dari selisih temperatur maksimal baterai tanpa PCM dengan temperatur maksimal tiap varian ketebalan PCM. PCM dengan ketebalan 3 mm mampu menurunkan temperatur baterai sebesar 1.39°K. PCM dengan ketebalan 6 mm mampu menurunkan temperatur baterai sebesar 2.26°K. PCM dengan ketebalan 9 mm mampu menurunkan temperatur baterai sebesar 2.84°K. Sehingga dapat disimpulkan bahwa ketebalan PCM akan mempengaruhi penurunan temperature maksimal baterai, semakin tebal PCM maka nilai penurunan temperature maksimal juga akan besar.

4.3 Analisa Pengaruh Temperatur Lingkungan terhadap Proses Pendinginan

Variasi yang dilakukan adalah mengubah temperatur lingkungan baterai dan PCM untuk mengetahui pengaruh kondisi lingkungan terhadap proses pendinginan pasif menggunakan PCM. Adapun variasi temperatur yang dilakukan dengan mengubah temperatur lingkungan menjadi lebih tinggi ketimbang temperatur pada simulasi

sebelumnya (306°K) menjadi 325°K (51°C). Adapun grafik penurunan temperatur maksimal baterai adalah sebagai berikut:



Gambar 4.5 Grafik Temperatur Baterai dengan Variasi Temperatur Lingkungan

Berdasarkan grafik tersebut, kemudian dibandingkan dengan hasil penurunan temperatur baterai ketika berada di temperatur lingkungan normal (306°K). Disajikan dalam tabel berikut:

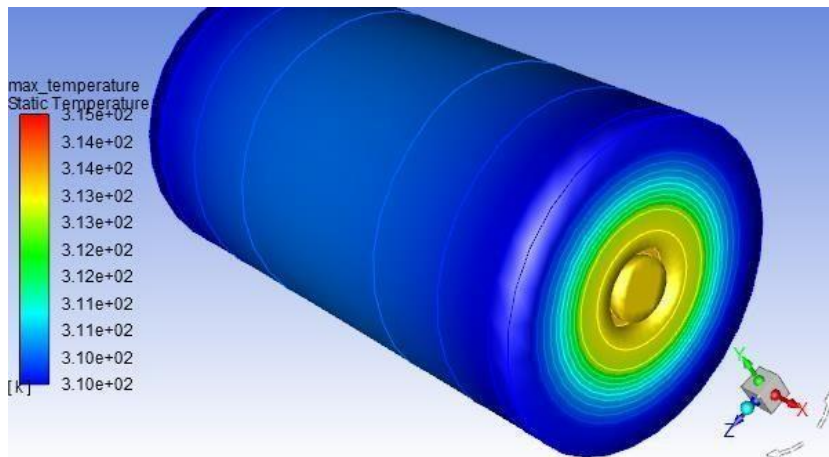
Tabel. 4.2 Penurunan Temperatur Baterai dengan Variasi Temperatur Lingkungan

Variasi Temperatur Lingkungan	Penurunan Temperatur Baterai ($^{\circ}\text{K}$)		
	Ketebalan PCM 3 mm	Ketebalan PCM 6 mm	Ketebalan PCM 9 mm
Normal (306°K)	1.39°K	2.26°K	2.84°K
Ekstrim (325°K)	3.26°K	3.95°K	4.39°K

Berdasarkan Tabel tersebut didapatkan bahwa PCM pada kondisi lingkungan yang ekstrim mampu menurunkan temperatur lebih besar jika dibandingkan dengan pada kondisi normal, namun PCM tidak mampu menjaga temperatur baterai dibawah temperatur operasi yang di anjurkan oleh pabrikan yaitu 323°K (50°C). Hasil ini mirip dengan penelitian sebelumnya (Verma, 2019) yang menunjukkan adanya performa penurunan temperatur yang lebih baik ketika PCM dalam kondisi temperatur lingkungan ekstrim namun tidak mampu menjaga temperatur baterai dibawah 323°K (50°C).

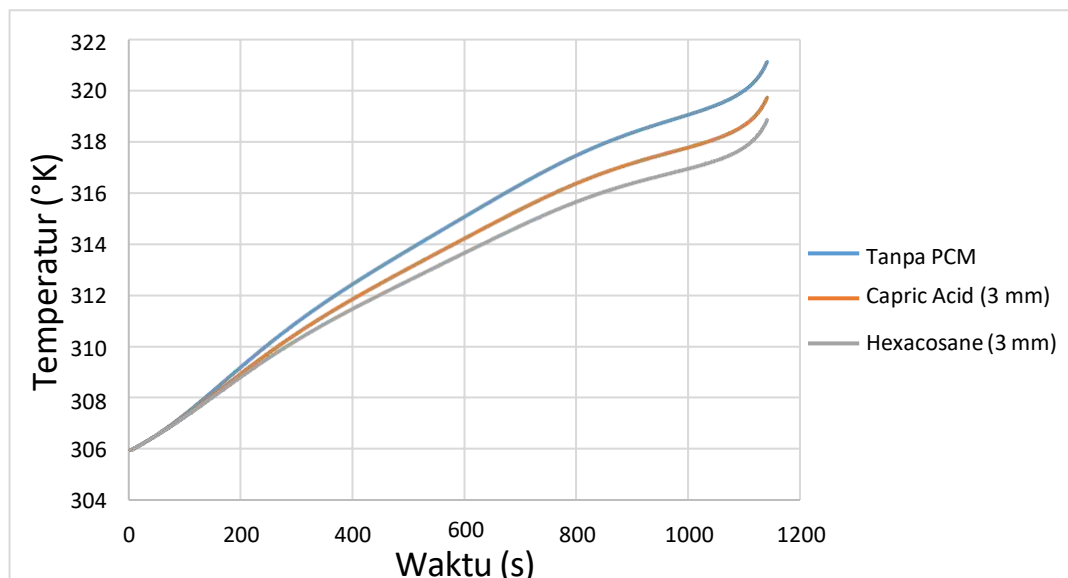
4.4 Analisa Pengaruh Variasi Jenis PCM

Variasi yang dilakukan adalah mengubah jenis PCM yang digunakan sebagai pendinginan pasif pada baterai, jenis PCM yang digunakan adalah *Capric Acid* ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$) dan Hexacosane sebagai perbandingan. Berikut merupakan gambaran kontur baterai menggunakan PCM Hexacosane dengan ketebalan 9 mm:

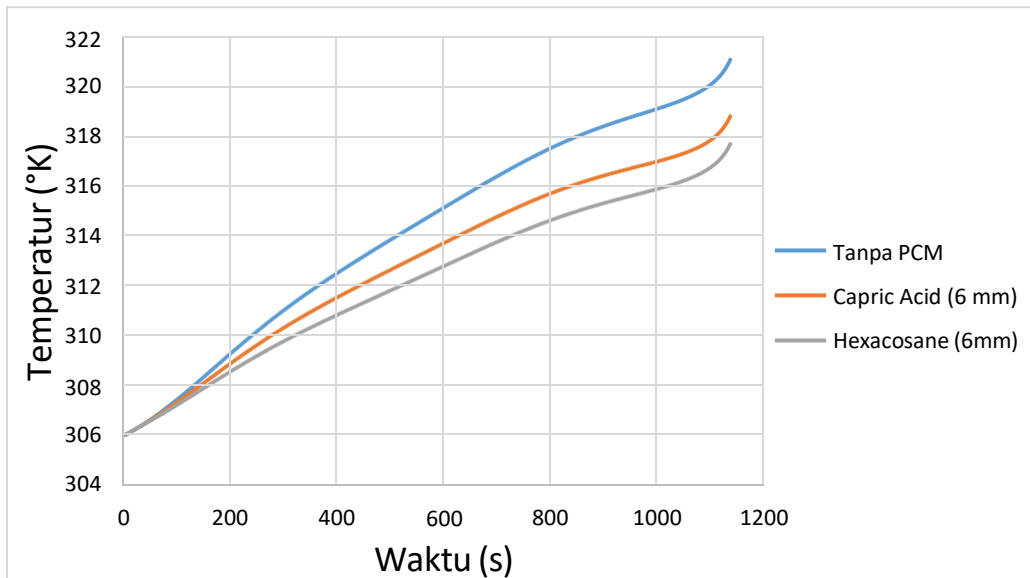


Gambar 4.6 Kontur Temperatur Baterai dengan PCM Hexacosane (9 mm)

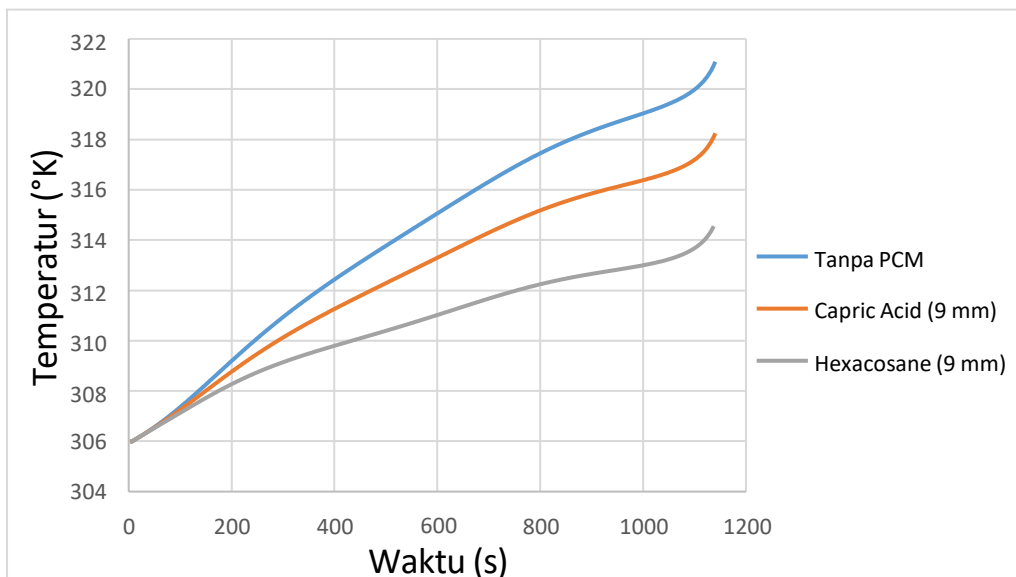
Adapun grafik dan tabel perbandingan hasil temperatur maksimal baterai, dengan variasi jenis PCM Capric Acid dan Hexacosane dengan nilai ketebalan yang sama, adalah sebagai berikut:



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.7 Temperatur Baterai dengan Variasi Jenis PCM dengan Ketebalan (a) 3 mm (b) 6 mm (c) 9 mm

Berdasarkan grafik-grafik tersebut bisa terlihat jika PCM jenis Hexacosane dapat menurunkan temperatur baterai lebih baik jika dibandingkan dengan PCM jenis Capric Acid pada ketebalan yang sama. Untuk hasil yang lebih jelas dan detail dapat ditunjukkan dengan tabel berikut:

Tabel 4.3 Temperatur Baterai tanpa dan dengan Variasi Jenis PCM (tebal 3 mm)

Variasi Ketebalan PCM	Tipe Step	Waktu (s)	Temperatur Maksimal (°K)
Tanpa PCM	379	1140	321.09
Capric acid	379	1140	319.70
Hexacosane	379	1140	318.83

Tabel 4.4 Temperatur Baterai tanpa dan dengan Variasi Jenis PCM (tebal 6 mm)

Variasi Ketebalan PCM	Tipe Step	Waktu (s)	Temperatur Maksimal (°K)
Tanpa PCM	379	1140	321.09
Capric acid	379	1140	318.83
Hexacosane	379	1140	317.72

Tabel 4.5 Temperatur Baterai tanpa dan dengan Variasi Jenis PCM (tebal 9 mm)

Variasi Ketebalan PCM	Tipe Step	Waktu (s)	Temperatur Maksimal (°K)
Tanpa PCM	379	1140	321.09
Capric acid	379	1140	318.25
Hexacosane	379	1140	314.55

Berdasarkan Tabel tersebut, terlihat jika PCM jenis Hexacosane mampu menurunkan temperatur maksimal baterai lebih baik jika dibandingkan dengan PCM jenis Capric Acid pada ketebalan yang sama, pada ketebalan 3 mm, Capric Acid mampu menurunkan temperatur maksimal baterai sebesar 1.39°K sedangkan PCM jenis Hexacosane mampu menurunkan temperatur maksimal sebesar 2.26°K, pada ketebalan 6 mm, Capric Acid mampu menurunkan temperatur maksimal baterai sebesar 2.26°K sedangkan PCM jenis Hexacosane mampu menurunkan temperatur maksimal sebesar 3.37°K, dan pada ketebalan 9 mm, Capric Acid mampu menurunkan temperatur maksimal baterai sebesar 2.84°K sedangkan PCM jenis Hexacosane mampu menurunkan temperatur maksimal sebesar 6.54°K. Kemudian dilakukan perhitungan efektivitas pendinginan untuk setiap ketebalan PCM dengan tujuan untuk mengetahui ketebalan PCM yang paling efektif dengan perhitungan sebagai berikut (Javani, 2014):

Tabel 4.6 Temperatur Baterai dengan PCM Hexacosane

Variasi Ketebalan PCM	Type Step	Waktu (s)	Temperatur Maksimal (°K)
Tanpa PCM	379	1140	321.09
3 mm	379	1140	318.83
6 mm	379	1140	317.72
9 mm	379	1140	314.55

$$\text{Cooling Effectiveness} = \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\text{amb}}}$$

T = Temperatur baterai dengan variasi ketebalan

T_{amb} = Temperatur lingkungan/ temperatur awal baterai (306°K)

T_{max} = Temperatur maksimal baterai (tanpa PCM)

Didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.7 Efektivitas Pendinginan PCM Hexacosane

Variasi Ketebalan PCM	Efektivitas Pendinginan
3 mm	0.15
6 mm	0.22
9 mm	0.43

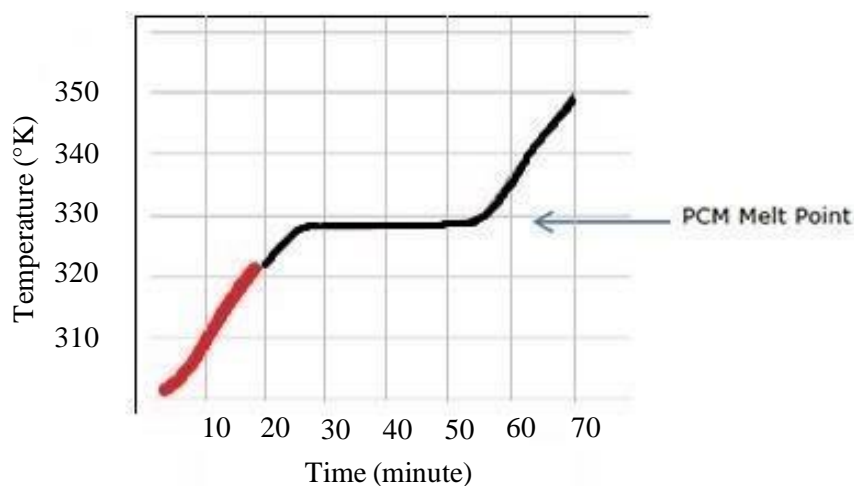
Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa PCM Hexacosane 9 mm memiliki nilai efektivitas pendinginan yang paling tinggi dibandingkan variasi ketebalan PCM yang lain. Hasil tersebut memiliki kemiripan dengan (Javani, 2014), PCM yang memiliki nilai efektivitas pendinginan paling baik adalah PCM yang memiliki ketebalan paling besar dengan menunjukkan pendinginan yang lebih baik pada baterai.

4.5 Analisa Perubahan Fasa pada PCM Hexacosane

Berdasarkan penelitian sebelumnya (Javani, 2014 dan Verma, 2019). Peneliti mengasumsikan tidak ada aliran fluida didalam PCM saat PCM dalam fase fluid, hal tersebut dikarenakan pergerakan fluida mendekati 0 (nol) atau tidak dapat terlihat secara kasat mata. sehingga dikarenakan hal tersebut, proses penggambaran atau visualisasi proses perubahan fasa PCM pada Ansys fluent tidak dapat dilakukan.

Namun untuk menunjukkan adanya perubahan fasa pada PCM dapat dilihat berdasarkan spesifikasi PCM dan data hasil simulasi. Berdasarkan data spesifikasi PCM Hexacosane, memiliki nilai solidus temperature sebesar 327 °K dan liquidus temperature sebesar 329 °K. Artinya ketika temperatur lingkungan sekitarnya (baterai) melebihi 327 °K, PCM Hexacosane akan mulai mengalami perubahan fasa, ketika temperatur lingkungan sekitarnya (baterai) diantara 327 °K dan 329 °K, PCM Hexacosane dalam fase diantara solid dan liquid, dalam proses tersebut terjadi panas latent yang mana PCM dapat menyerap panas dalam jumlah besar dengan hampir tanpa terjadi kenaikan temperatur atau kenaikan temperaturnya kecil. Kemudian ketika temperatur lingkungan (baterai) melebihi 329°K, PCM Hexacosane akan berubah fasa menjadi cair.

Berdasarkan hasil simulasi didapatkan bahwa temperatur maksimum baterai hanya mencapai 321°K, sehingga material PCM Hexacosane belum sampai mengalami perubahan fasa atau wujud, dikarenakan temperature solidus baterai adalah 327°K. Berdasarkan analisa tersebut PCM Hexacosane pada saat simulasi masih belum terjadi ada nya perubahan wujud. Sebagai gambaran bagaimana proses terjadinya perubahan fasa atau wujud dari PCM Hexacosane adalah sebagai berikut, garis tebal berwarna merah menunjukkan temperatur maksimal baterai hasil simulasi, sedangkan garis berwarna hitam menunjukkan pola perubahan fasa PCM Hexacosane terhadap perubahan temperatur dan waktu:



Gambar 4.8 Analisa Perubahan Fasa pada PCM Hexacosane

4.6 Pembahasan

Kriteria varian jenis PCM yang baik jika dikaji dalam hal perpindahan panas dapat dicari dari **Persamaan (5)**, didapatkan kriteria sebagai berikut, yaitu yang memiliki nilai temperatur melting, density, specific heat dan konduktivitas termal yang besar, ketika PCM memiliki nilai sesuai kriteria tersebut maka PCM akan memiliki kemampuan untuk

menyerap panas yang besar juga. Kemudian berdasarkan hasil simulasi, untuk pengaruh variasi ketebalan dapat dilihat dari **Gambar 4.4** dan **Tabel 4.1**, berdasarkan data tersebut dapat terlihat jika seiring bertambahnya ketebalan PCM maka semakin besar juga nilai penurunan temperaturnya, hal tersebut dikarenakan berdasarkan rumus $Q = m \cdot L$, maka semakin besar volume dan masaa dari PCM akan meningkatkan nilai besarnya kalor yang dapat diserap oleh PCM dari baterai. Berdasarkan hasil simulasi pengaruh temperatur lingkungan terhadap proses pendinginan didapatkan bahwa bahwa PCM pada kondisi lingkungan yang ekstrim mampu menurunkan temperatur lebih besar jika dibandingkan dengan pada kondisi normal, namun PCM tidak mampu menjaga temperatur baterai dibawah temperatur operasi yang di anjurkan oleh pabrikannya yaitu 323°K (50°C). Berdasarkan hasil simulasi dengan variasi jenis PCM, dibandingkan hasil penurunan temperatur maksimal baterai, dengan 2 jenis PCM yang berbeda pada nilai ketebalan yang sama. Dapat dilihat pada **Gambar 4.7** dan **Tabel 4.3-4.5** bahwa variasi jenis PCM Hexacosane mampu menurunkan temperatur maksimum baterai lebih baik jika dibandingkan dengan variasi jenis PCM Capric Acid, hal tersebut dikarenakan PCM Hexacosane memiliki nilai temperatur melting, density, specific heat dan konduktivitas termal yang lebih besar dari PCM Capric Acid, sehingga PCM Hexacosane mampu menyerap dan menyimpan panas lebih besar ketimbang PCM Capric Acid. Kemudian untuk analisa perubahan fasa pada PCM Hexacosane didapatkan bahwa pada simulasi PCM Hexacosane belum mencapai titik perubahan fasa atau perubahan wujud, hal tersebut dikarenakan PCM Hexacosane memiliki temperatur melting sebesar 327°K , sedangkan temperatur maksimal baterai hanya mencapai 321°K .

BAB V

PENUTUP

Penelitian tugas akhir ini menganalisa tentang pengaruh ketebalan dan jenis PCM sebagai pendingin pasif untuk baterai Li-ion. Analisa ini dilakukan untuk mengetahui kriteria PCM yang baik jika dikaji dalam hal perpindahan panas, dan performansi sistem pendingin dari baterai litium ion dengan memvariasikan ketebalan PCM dan jenis PCM. Kesimpulan dari hasil analisa manajemen termal pada sistem pendingin baterai litium ion menggunakan PCM adalah sebagai berikut:

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- a. Hasil simulasi untuk pengaruh variasi ketebalan dapat dilihat dari **Gambar 4.4** dan **Tabel 4.1**, berdasarkan data tersebut dapat terlihat jika seiring bertambahnya ketebalan PCM maka semakin besar juga nilai penurunan temperaturnya, hal tersebut dikarenakan semakin besar volume dan masa dari PCM akan meningkatkan nilai besar kalor yang diserap oleh PCM dari baterai.
- b. Kriteria PCM yang baik jika dikaji dalam hal perpindahan panas adalah PCM yang memiliki nilai temperatur *melting*, *density*, *specific heat* dan konduktivitas termal yang besar, sehingga PCM tersebut dapat menyerap dan menyimpan panas dengan nilai yang besar. PCM Hexacosane memiliki performa pendingin yang lebih baik dari PCM Capric Acid, hal tersebut dibuktikan dengan PCM Hexacosane dengan tebal 9 mm mampu menurunkan temperatur maksimal baterai sebesar 6.54°K , sedangkan PCM Capric Acid dengan tebal 9 mm hanya mampu menurunkan temperatur maksimal baterai sebesar 2.84°K dan PCM tebal 9 mm memiliki efektivitas pendinginan yang paling baik. Hal ini dikarenakan PCM Hexacosane memiliki nilai temperature *melting*, *density*, *specific heat* dan konduktivitas termal yang lebih tinggi ketimbang PCM jenis Capric Acid. Dengan begitu PCM Hexacosane lebih baik dalam menyerap dan melepaskan panas, terlebih ketebalan dari PCM juga lebih efisien. Oleh sebab itu penulis menyarankan PCM jenis Hexacosane dengan tebal 9 mm sebagai referensi untuk sistem pendingin pasif pada baterai LiFePO_4 18650 di Nogogeni V Evo.

5.2 Saran

Berikut adalah saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya:

- a. Perlu menggunakan fungsi *battery module* pada simulasi ANSYS *Fluent* agar hasil simulasi yang dihasilkan lebih mendekati kondisi sebenarnya.
- b. Membandingkan performa pendingin dari PCM Hexacosane dengan material PCM yang lain untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Linden, David and Thomas B. Reddy. (2002) Handbook of Batteries 3 Ed. Amerika Serikat: The McGraw-Hills Companies, Inc.
- Bergman, T. L., A. S. Lavine, F. F. Incropera. (2002) Fundamental of Heat and Mass Transfer Seventh Edition. ISBN 13 978-0470-50197-9.USA: MPS Ltd.
- Feng, X. (2018) Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: a review. *Energy Storage Materials* 10, 246–267
- Song, L., H. Zhang, C. Yang. (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* 133, 827–841.
- Verma, A., Sumanth S., Dibakar R. (2019) A comparative study on battery thermal management using phase change material (PCM), *Thermal Science and Engineering Progress* 11, 74–83
- Etacheri V, Marom R, Ran E, Salitra G, Aurbach D. (2011) Challenges in the development of advanced li-ion batteries: a review. *Energy Environ Sci* 4:3243–62.
- A. Jarrett, I.Y. Kim. (2011) Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance. *J. Power Sources* 196 (23) 10359– 10368.
- T. Yuksel, J. Michalek. (2012) Development of a simulation model to analyze the effect of thermal management on battery life. *SAE 2012 World Congress & Exhibition*, Vol. 25, pp. 8–18.
- P. Nelson, D. Dees, K. Amine, et al. (2002) Modeling thermal management of lithiumion PNGV batteries. *J. Power Sources* 110 (2) 349–356.
- Warner, J. (2015). Battery Pack Design.
- Sharma, A., V.V. Tyagi, C.R. Chen. (2007) Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 318–345.
- Hale, D.V.; Hoover, M.J. & O'Neill, M.J. (1971) Phase change materials handbook. Report No. HREC-5183-2LMSCHREC D225138. NASA, Marshal Space Flight Centre. Alabama.
- X. Wang, Y. Xie, R. Day. (2018) Performance analysis of a novel thermal management system with composite phase change material for a lithium-ion battery pack. *Energy* 156, 154-158.
- Z. An, X. Chen, L. Zhao. (2019) Numerical investigation on integrated thermal management for a lithium-ion battery module with a composite phase change material and liquid cooling. *Applied Thermal Engineering* 163, 114345.
- Javani, N., I. Dincer, G. F. Naterer, B. S. Yilbas. (2014). Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 72, 690–703.
- American Institute of Architects (AIA). (2021, 2 22). Phase Change Materials (PCM) for High Performance Enclosures. Retrieved from AIA Austin: <https://www.aiaaustin.org/event/phase-change-materials-pcm-high-performance-enclosures>

- Chen, S.C., Wan, C.C., and Wang, Y.Y. (2004) Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 140, 111–124.
- Zhang, X. Xuan., Kleinb. (2018) Evaluation of convective heat transfer coefficient and specific heat capacity of a lithium-ion battery using infrared camera and lumped capacitance method. *Journal of Power Sources*, 412, 552-558.
- Kurniawan, A., (2020) Analisa Laju Perpindahan Panas pada Baterai Ion Lithium 18650 terhadap Beban Keluarannya dengan Metode Numerik. *Journal of Mechanical Design and Testing*, ISSN: 2716-1293
- Angelo, Onorati., and Cannova, Marcello. (2009) Thermal Characerization of Ion Lithium Battery Cell, Thesis, Politecnica de Milano, Italy

LAMPIRAN

A. UDF PCM Capric Acid (a) Density (b) Fraksi Liquid (c) Konduktivitas Termal

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROPERTY(PCM_density,cell,thread)
{
    real tempe2,r;
    #if !RP_HOST
    tempe2 = C_T(cell,thread);
    if (tempe2 <= 302)
        r=878;
    else if ((tempe2 > 302) && (tempe2 < 305))
    {
        r=878-(36*(tempe2-302)/2);
    }
    else if (tempe2 >= 305)
    {
        r=752;
    }
    #endif
    return r;
}
```

(a)

```
DEFINE_PROPERTY(PCM_Dynamicviscosity,cell,thread)
{
    real tempe2,mu;
    #if !RP_HOST
    tempe2 = C_T(cell,thread);
    if (tempe2 <= 302)
        mu=1;
    else if ((tempe2 > 302) && (tempe2 <= 305))
        mu=(305-tempe2)/2;
    else if (tempe2 > 305)
        mu=0.00169;
    #endif
    return mu;
}
```

(b)

```
DEFINE_PROPERTY(PCM_thermalconductivity,cell,thread)
{
    real tempe2,k;
    #if !RP_HOST
    tempe2 = C_T(cell,thread);
    if (tempe2 <= 302)
        k=0.2;
    if ((tempe2 > 302) && (tempe2 < 305))
    {
        k=0.2-(0.01*(tempe2-302)/2);
    }
    else
    {
        k=0.12;
    }
    #endif
    return k;
}
```

(c)

B. UDF PCM Hexacosane (a) Density (b) Fraksi Liquid (c) Konduktivitas Termal

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROPERTY(PCM_density,cell,thread)
{
    real tempe2,r;
    #if !RP_HOST
    tempe2 = C_T(cell,thread);
    if (tempe2 <= 302)
        r=878;
    else if ((tempe2 > 302) && (tempe2 < 305))
    {
        r=878-(36*(tempe2-302)/2);
    }
    else if (tempe2 >= 305)
    {
        r=752;
    }
    #endif
    return r;
}
```

(a)

```
DEFINE_PROPERTY(PCM_Dynamicviscosity,cell,thread)
{
    real tempe2,mu;
    #if !RP_HOST
    tempe2 = C_T(cell,thread);
    if (tempe2 <= 302)
        mu=1;
    else if ((tempe2 > 302) && (tempe2 <= 305))
        mu=(305-tempe2)/2;
    else if (tempe2 > 305)
        mu=0.00169;
    #endif
    return mu;
}
```

(b)

```
DEFINE_PROPERTY(PCM_thermalconductivity,cell,thread)
{
    real tempe2,k;
    #if !RP_HOST
    tempe2 = C_T(cell,thread);
    if (tempe2 <= 302)
        k=0.2;
    if ((tempe2 > 302) && (tempe2 < 305))
    {
        k=0.2-(0.01*(tempe2-302)/2);
    }
    else
    {
        k=0.12;
    }
    #endif
    return k;
}
```

(c)

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya pada tanggal 23 April 1998 dengan nama Muhammad Rizky Cahya Andhika, anak pertama dari dua bersaudara. Penulis sejak kecil tinggal di Surabaya bersama orang tua dan adek laki-laki. Pendidikan formal yang pernah dan telah ditempuh penulis yaitu pada tahun 2004 di SD Citra Berkat, pada tahun 2009 melanjutkan pendidikan di SMP Citra Berkat, pada tahun 2013 melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 2 Surabaya, pada tahun 2016 melanjutkan pendidikan Diploma 3 di Departemen Teknik Mesin Industri Fakultas Vokasi - Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Pada tahun 2019 penulis melanjutkan pendidikan Sarjana di Departemen Teknik Fisika Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem – Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Penulis pernah mengikuti LKMM Pra-TD, PKTI, panitia Gerigi 2017, OC LKMM Pra-TD Vokasi. Penulis aktif pada kegiatan dalam kampus di jurusan maupun tingkat institut. Penulis juga pernah dan telah melaksanakan kerja praktek di PT. SAKA Indonesia Pangkah Limited, Gresik, Jawa Timur dengan fokus pada divisi mekanik di pabrik tersebut. Bagi pembaca yang ingin lebih mengenal penulis dan ingin berdiskusi lebih luas lagi dapat menghubungi E-mail: rizkyandhika99@gmail.com