

**PENDINGINAN MODUL BATERAI LITHIUM-ION SILINDER
MENGUNAKAN *WAVY CHANNEL TUBE***



Skripsi

**Diajukan Untuk Melengkapi Persyaratan
Dalam Menyelesaikan Program Strata-(S1)
Pada Jurusan Teknik Mesin
Universitas Sultan Ageng Tirtayasa**

Disusun Oleh:

**MUHAMMAD ILHAM FATWA
3331190030**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN
2023**

TUGAS AKHIR


Pendinginan Modul Baterai Lithium-Ion Silinder Menggunakan Wavy Channel Tube


Dipersiapkan dan disusun oleh:

Muhammad Ihham Fatwa
3331190030

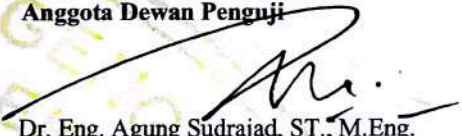
telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
pada tanggal, 19 Desember 2023

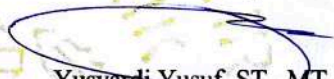
Pembimbing Utama

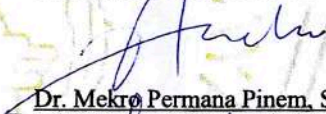

Dr. Mekro Permana Pinem, ST., MT.
NIP. 198902262015041002



Hadi Wahyudi, MT., Ph.D.
NIP. 197101162002121001

Anggota Dewan Penguji


Dr. Eng. Agung Sudrajad, ST., M.Eng.
NIP. 197505152014041001

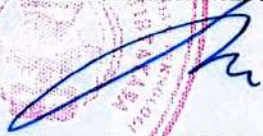

Yusvardi Yusuf, ST., MT.
NIP. 197910302003121001


Dr. Mekro Permana Pinem, ST., MT.
NIP. 198902262015041002


Hadi Wahyudi, MT., Ph.D.
NIP. 197101162002121001

**Tugas Akhir ini sudah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

Tanggal, 27 Desember 2023
Ketua Jurusan Teknik Mesin UNTIRTA


Dhimas Satria, S.T., M.Eng.
NIP. 198305102012121006



PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Muhammad Ilham Fatwa
NPM : 3331190030
Judul : Pendinginan Modul Baterai Lithium-Ion Silinder Menggunakan
Wavy Channel Tube

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

MENYATAKAN

Bahwa skripsi ini hasil karya sendiri dan tidak ada duplikat dengan karya orang lain, kecuali untuk yang telah disebutkan sumbernya.

Cilegon, Desember 2023



Muhammad Ilham Fatwa

NPM. 3331190030

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah Rabbil'alamin. Segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "Pendinginan Modul Baterai Lithium-Ion Silinder Menggunakan *Wavy Channel Tube*". Shalawat dan salam tidak lupa penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membawa kita dari zaman jahiliyah ke zaman Islamiyah yang penuh dengan keberkahan dari Allah SWT.

Laporan tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pada jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari proses studi yang penulis jalani hingga tersusunnya laporan tugas akhir ini tidak terlepas dari peran berbagai pihak yang senantiasa membantu penulis dalam menyelesaikannya. Oleh karena itu, izinkan penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga penulis yang tidak henti-hentinya memberikan semangat, doa, motivasi, inspirasi, dan dukungan lainnya baik moril maupun materil selama penulis menuntut ilmu.
2. Bapak Dhimas Satria, S.T., M. Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Ibu Miftahul Jannah, S.T., M. T. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
4. Bapak Dr. Mekro Permana Pinem, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 1 yang senantiasa memberikan pengarahan serta masukan kepada penulis selama mengerjakan tugas akhir.
5. Bapak Hadi Wahyudi, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing 2 atas ilmu dan bimbingannya yang diberikan kepada penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
6. Bapak Imron Rosyadi, S.T., M.T, selaku Dosen Pembimbing Akademik atas bimbingan dan semangat yang diberikan dalam menjalankan perkuliahan.

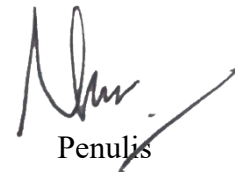
7. Seluruh Bapak/Ibu Dosen yang senantiasa selalu memberikan pengarahan dan berbagi ilmu kepada penulis di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
8. Tim penelitian tugas akhir, diantaranya ada Wahyudin, Nuriman, Fikri, Andreas, dan Rodo yang selalu memberikan semangat dan membantu penulis.
9. Rekan-Rekan Seperjuangan Teknik Mesin Angkatan 2019, yang telah memberikan dukungan dan semangat untuk menyelesaikan perkuliahan ini.

Semoga Allah SWT membalas segala kebbaikannya dan menjadikan setiap pencapaian yang penulis peroleh sebagai amal sholeh di akhirat kelak. Aamiin.

Tidak ada sesuatu yang sempurna di dunia, begitupun dengan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap kritik dan saran agar laporan ini menjadi lebih baik lagi. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan semua pihak yang membacanya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Cilegon, Desember 2023



Penulis

ABSTRAK

Pendinginan Modul Baterai Lithium-Ion Silinder Menggunakan *Wavy Channel Tube*

Disusun oleh:

Muhammad Ilham Fatwa

NIM. 3331190030

Sistem pendingin baterai diperlukan untuk mengontrol suhu baterai agar tetap berada dalam kisaran suhu optimal. Sistem pendingin *wavy channel tube* dengan fluida pendingin air, campuran air dan etilen glikol, nanofluida *cellulose nanocrystal* yang disuspensikan pada campuran air dan etilen glikol, dianalisis dengan simulasi numerik dan eksperimen untuk menurunkan suhu maksimum modul baterai. Pengaruh variasi laju aliran massa untuk mengalirkan fluida pendingin dipertimbangkan, yaitu 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s. Dalam penelitian ini, simulasi numerik dilakukan menggunakan *software* Ansys Fluent dan eksperimen dilakukan dengan alat pendingin modul baterai yang telah dibuat. Berdasarkan hasil simulasi, ditemukan bahwa nanofluida CNC-W+EG dapat mengontrol suhu baterai tetap berada dalam kisaran suhu optimal, dengan suhu maksimum modul baterai dari laju aliran terendah ke tertinggi, masing-masing adalah 37,93 °C, 34,6 °C, dan 33,42 °C. Namun, secara keseluruhan, air menjadi fluida pendingin yang efektif dengan suhu maksimum masing-masing adalah 35,15 °C, 33,02 °C, dan 32,32 °C. Selain itu, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa dengan meningkatkan laju aliran massa, dapat menurunkan suhu maksimum modul baterai dan suhu pada outlet. Di sisi lain, hasil eksperimen menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan dengan hasil simulasi. Hal ini dikarenakan *setup* eksperimen yang masih perlu dievaluasi, seperti pada pompa, geometri dan *wavy channel tube*, suhu awal eksperimen, pengukuran suhu, dan konfigurasi radiator yang perlu ditingkatkan.

Kata kunci: *Ansys Fluent, Baterai Li-Ion, Pendinginan Baterai, Wavy Channel*

ABSTRACT

Cooling of Cylindrical Lithium-Ion Battery Module Using Wavy Channel Tube

Arranged by:

Muhammad Ilham Fatwa

3331190030

A battery cooling system is required to control the battery temperature to keep it within the optimum temperature range. A wavy channel tube cooling system with cooling fluids of water, a mixture of water and ethylene glycol, cellulose nanocrystal nanofluid suspended in a mixture of water and ethylene glycol, is analysed by numerical simulation and experiment to reduce the maximum temperature of the battery module. The effect of varying the mass flow rate to circulate the cooling fluid was considered, namely 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s. In this study, numerical simulations were carried out using Ansys Fluent software and experiments were conducted with a battery module cooling device that has been made. Based on the simulation results, it was found that the CNC-W+EG nanofluid can control the battery temperature to stay within the optimal temperature range, with the maximum temperature of the battery module from the lowest to the highest flow rate being 37.93 °C, 34.6 °C, and 33.42 °C, respectively. However, overall, water became an effective cooling fluid with maximum temperatures of 35,15 °C, 33,02 °C, and 32,32 °C, respectively. In addition, the simulation results also show that by increasing the mass flow rate, it can reduce the maximum temperature of the battery module and the temperature at the outlet. On the other hand, the experimental results show significant differences with the simulation results. Experimental setup still needs to be evaluated, such as the pump, geometry and wavy channel tube, initial experimental temperature, temperature measurement, and radiator configuration that need to be improved.

Keywords: *Ansys Fluent, Battery Cooling, Li-ion Battery, Wavy Channel*

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
KATA PENGANTAR	ii
ABSTRAK	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>State of The Art</i>	6
2.2 Parameter Baterai	10
2.3 Baterai Lithium-Ion (Li-ion)	12
2.4 Sistem Manajemen Termal Baterai.....	15
2.5 Nanofluida	18
2.6 Model Baterai <i>Multi-Scale Multi-Domain</i> (MSMD).....	19
2.7 Pendekatan <i>Equivalent Circuit Model</i> (ECM).....	20
2.8 <i>Hybrid Pulse Power Characterization</i> (HPPC)	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	24
3.2 Perancangan dan Pengumpulan Data	25
3.2.1 Spesifikasi Sel Baterai Lithium-Ion 18650.....	27
3.2.2 <i>Properties</i> Sel Baterai Lithium-Ion	27
3.2.3 <i>Properties</i> Busbar	28
3.2.4 <i>Properties Wavy Channel Tube</i>	28
3.2.5 <i>Properties</i> Air (W)	29

3.2.6 <i>Properties</i> Air (W) 60% + Etilen Glikol (EG) 40%	29
3.2.7 <i>Properties</i> Nanofluida.....	29
3.3 Pengujian <i>Hybrid Pulse Power Characterization</i> (HPPC) Sel Baterai.....	30
3.4 Geometri Model Simulasi.....	31
3.5 Pemodelan <i>Meshing</i>	32
3.5 Penentuan Kondisi Batas (<i>Boundary Condititon</i>)	33
3.6 Penentuan <i>Setup</i> Simulasi.....	33
3.7 Penentuan <i>Solver</i> Simulasi	35
3.8 Hasil Simulasi.....	35
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
4.1 Validasi Data Awal.....	36
4.2 Air (W) Sebagai Fluida Pendingin	37
4.3 Air (W) 60% + Etilen Glikol (EG) 40% Sebagai Fluida Pendingin.....	41
4.4 Nanofluida <i>Cellulose Nanocrsytal</i> (CNC) – Air (W) + Etilen Glikol (EG)	44
4.5 Pembahasan	48
4.6 Faktor Kesalahan Eksperimen.....	53
4.7 Pengaruh Efektivitas Pendingin Terhadap Kinerja Baterai	56
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
Lampiran 1. Gambar Modul Baterai Li-Ion Dengan <i>Wavy Channel Tube</i>	
Lampiran 2. Data Spesifikasi Pembelian Baterai Lithium-Ion	
Lampiran 3. Perhitungan Persentase <i>Error</i>	
Lampiran 4. Perhitungan Bilangan Reynolds	
Lampiran 5. <i>Cellulose Nanocrystal</i> (CNC) <i>Data Sheet</i>	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Model Geometri dan <i>Mesh</i> Sel Baterai dan Paket Baterai Li-ion Prismatik	6
Gambar 2.2 Kontur Suhu: (a) Sel Baterai Dengan Kecepatan Pendinginan 0,1 m/s dan 0,01 m/s, (b) Paket Baterai Dengan Kecepatan Pendinginan 0,01 m/s dan 0,005 m/s.....	7
Gambar 2.3 Model Skema Sistem Pendingin Modul Baterai.....	8
Gambar 2.4 Perbandingan Pendingin Air dan Nanofluida Alumina.....	8
Gambar 2.5 Model Geometri Baterai Dengan Variasi Jarak Antar Sel	9
Gambar 2.6 Kontur Suhu Pada 3C Dengan Memodifikasi Jarak Antar Sel	10
Gambar 2.7 Perbandingan Densitas Energi Dari Berbagai Baterai Isi Ulang	11
Gambar 2.8 Paket Baterai.....	13
Gambar 2.9 Ilustrasi Charge dan Discharge Baterai Li-Ion	14
Gambar 2.10 Struktur Baterai Lithium-Ion Silinder	15
Gambar 2.11 (a) Perpindahan panas kontak langsung dan kontak tidak langsung; (b) Jenis bahan pendingin untuk manajemen termal baterai.....	16
Gambar 2.12 Sistem Pendingin Baterai Dengan Udara Pada Toyota Prius	16
Gambar 2.13 Pendinginan Baterai Dengan Cairan Pada Tesla Model S.....	17
Gambar 2.14 Ilustrasi Manajemen Termal Baterai Dengan PCM	18
Gambar 2.15 <i>Equivalent Circuit Model</i> (ECM)	20
Gambar 2.16 Parameter HPPC	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	25
Gambar 3.2 Skematik Sistem Pendingin Baterai.....	26
Gambar 3.3 Alat Eksperimen Sistem Pendingin Baterai	26
Gambar 3.4 Model Simulasi.....	27
Gambar 3.5 Data HPPC Pada Suhu 25 °C.....	30
Gambar 3.6 Data HPPC Pada Suhu 35 °C.....	31
Gambar 3.7 Data HPPC Pada Suhu 45 °C.....	31
Gambar 3.8 Geometri Baterai Li-Ion Dengan <i>Wavy Channel Tube</i>	32
Gambar 3.9 Bagian-Bagian Model Simulasi	32

Gambar 3.10 Model <i>Mesh</i> Domain Simulasi	33
Gambar 4.1 Perbandingan Hasil Simulasi Dengan Hasil Eksperimen	36
Gambar 4.2 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai (a) Hasil Simulasi & (b) Hasil Eksperimen Tanpa Fluida Pendingin.....	37
Gambar 4.3 Pengaruh Air (W) Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses <i>Discharge</i> - Simulasi	38
Gambar 4.4 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai dan Fluida Pendingin Laju Aliran: (a) $5 \times 10 - 4 \text{ kg/s}$, (b) $10 \times 10 - 4 \text{ kg/s}$, (c) $15 \times 10 - 4 \text{ kg/s}$	38
Gambar 4.5 Pengaruh Air (W) Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses <i>Discharge</i> - Eksperimen	39
Gambar 4.6 Suhu Outlet Air Selama Proses <i>Discharge</i> - Simulasi	40
Gambar 4.7 Suhu Outlet Air Selama Proses <i>Discharge</i> – Eksperimen	40
Gambar 4.8 Pengaruh W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses <i>Discharge</i> - Simulasi	41
Gambar 4.9 Pengaruh W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses <i>Discharge</i> - Eksperimen	42
Gambar 4.10 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai dan Fluida Pendingin Laju Aliran: (a) $5 \times 10 - 4 \text{ kg/s}$, (b) $10 \times 10 - 4 \text{ kg/s}$, (c) $15 \times 10 - 4 \text{ kg/s}$	42
Gambar 4.11 Suhu Outlet W+EG Selama Proses <i>Discharge</i> - Simulasi	43
Gambar 4.12 Suhu Outlet W+EG Selama Proses <i>Discharge</i> - Eksperimen.....	44
Gambar 4.13 Pengaruh CNC-W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses <i>Discharge</i> - Simulasi	45
Gambar 4.14 Pengaruh CNC-W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses <i>Discharge</i> - Eksperimen.....	45
Gambar 4.15 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai dan Fluida Pendingin Laju Aliran (a) $5 \times 10 - 4 \text{ kg/s}$, (b) $10 \times 10 - 4 \text{ kg/s}$, (c) $15 \times 10 - 4 \text{ kg/s}$	46
Gambar 4.16 Suhu Outlet CNC-W+EG Selama Proses <i>Discharge</i> - Simulasi ...	47
Gambar 4.17 Suhu Outlet CNC-W+EG Selama Proses <i>Discharge</i> - Eksperimen	47
Gambar 4.18 Pengaruh Variasi Jenis Fluida Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Dengan Laju Aliran $5 \times 10 - 4 \text{ kg/s}$ Selama Proses <i>Discharge</i>	49

Gambar 4.19 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai Variasi Fluida Pendingin: (a) Air, (b) W+EG, (c) CNC-W+EG	50
Gambar 4.20 Perbandingan Nilai <i>Properties</i> Fluida Pendingin	52
Gambar 4.21 Perbandingan Nilai <i>Properties</i> W+EG (Basefluid) dan CNC-W+EG (0.5% CNC) Mengacu Pada Penelitian Farhana el al., (2020).....	52
Gambar 4.22 Penggunaan Pompa Pada Alat Eksperimen Pendinginan Modul Baterai	54
Gambar 4.23 <i>Wavy Channel Tube</i> Pada Modul Baterai.....	54
Gambar 4.24 Radiator Pada Alat Eksperimen Pendinginan Modul Baterai.....	55
Gambar 4.25 Paket Baterai Ke Komponen Individual	56

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Spesifikasi Baterai Lithium-Ion (Li-ion) 18650.....	27
Tabel 3.2 <i>Properties</i> Sel Baterai.....	28
Tabel 3.3 <i>Properties</i> Busbar Tembaga.....	28
Tabel 3.4 <i>Properties Wavy Channel Tube</i>	28
Tabel 3.5 <i>Properties</i> Air	29
Tabel 3.6 <i>Properties</i> 60% Air + 40% Etilen Glikol.....	29
Tabel 3.7 <i>Properties</i> Nanofluida CNC-W+EG.....	30

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perekonomian global mengalami perkembangan yang cepat dalam hal penggunaan listrik portabel, berdampak pada berbagai sektor teknologi, terutama elektronik, energi ramah lingkungan, dan transportasi. Dari segi transportasi, pasar kendaraan listrik telah mengalami peningkatan permintaan yang signifikan. Selain itu, kendaraan listrik menawarkan banyak keunggulan dalam hal efisiensi dan ramah lingkungan. Menurut Wibowo (2019), jika dibandingkan dengan kendaraan mesin pembakaran dalam, kendaraan listrik memiliki efisiensi yang tinggi, bekerja tanpa gas buang, tidak bising, tidak bergantung pada bahan bakar fosil, dan memiliki torsi yang tinggi. Kendaraan listrik menggunakan motor listrik dengan mengubah lebih banyak energi untuk menggerakkan kendaraan sehingga lebih efisien dari mesin pembakaran dalam. Namun, terdapat banyak tantangan yang dihadapi dalam mengembangkan kendaraan listrik, salah satunya adalah pada baterai sebagai sumber daya listrik.

Kemampuan daya baterai memiliki peran utama dalam pengembangan kendaraan listrik. Ada banyak jenis baterai, seperti lead acid, zinc/halogen, metal/air, sodium-beta, nickel metal hydride (Ni-MH), dan lithium-ion (Li-ion) dapat digunakan untuk menyuplai daya listrik ke kendaraan listrik. Baterai Li-ion menjadi kandidat yang menjanjikan sebagai sumber listrik karena keunggulannya, seperti biaya yang relatif rendah, tingkat *self-discharge* (pengeluaran arus listrik dalam keadaan tanpa beban) yang rendah, masa pakai yang lama, serta daya dan densitas energi yang tinggi (Wu et al., 2019). Namun, manajemen termal diperlukan untuk menangani akumulasi panas yang dihasilkan oleh baterai Li-ion.

Panas pada baterai muncul karena adanya proses *electrochemical* (reaksi elektrokimia di dalam baterai) dan *joule heating* (panas akibat arus listrik melewati konduktor) yang terjadi saat baterai beroperasi (Kurniawan, 2020). Dalam penelitian Malik et al (2017) menyebutkan bahwa baterai Li-ion

sangat bergantung pada suhu agar dapat berfungsi dengan baik dan tahan lama, dengan rentang suhu yang disarankan antara 25 °C hingga 40 °C. Jika baterai tersebut disusun menjadi rangkaian baterai yang terdiri dari sel-sel baterai, perbedaan suhu antara setiap sel baterai tidak melebihi 5 °C, yang dianggap sebagai suhu optimal saat baterai beroperasi (Widyantara et al., 2022).

Mengoperasikan baterai Li-ion pada suhu diluar rentang suhu optimal dapat mengakibatkan penurunan kinerja dan masa pakai baterai. Operasi pada suhu yang rendah dengan laju arus tinggi dapat menyebabkan pelapisan lithium pada anoda, kehilangan kapasitas, kenaikan impedansi, penurunan konduktivitas ionik, dan korsleting internal karena dendrit lithium logam (Petzl et al., 2015). Sementara itu, operasi suhu yang lebih tinggi dapat menyebabkan pengurangan bahan aktif, meningkatkan resistansi internal, bahkan pada suhu yang terlalu tinggi dapat memicu kebakaran dan ledakan (Ma et al., 2018). Oleh karena itu, diperlukan sistem manajemen termal baterai untuk menjaga suhu baterai agar tetap berada dalam kisaran suhu optimal.

Upaya sistem manajemen termal baterai telah banyak dilakukan, mulai dari dengan pendingin udara, cairan, *phase change material*, nanofluida, atau gabungan dari beberapa teknik pendinginan secara bersamaan (Widyantara et al., 2022). Karena keunggulan dari baterai Li-ion, berbagai upaya dan inovasi dilakukan untuk dapat mengoptimalkan efisiensi baterai untuk kendaraan listrik. Dalam penelitian ini menggunakan pendingin cairan, yaitu air, campuran air + etilen glikol, dan nanofluida *cellulose nanocrystal* – air + etilen glikol untuk mendinginkan modul baterai Li-ion tipe 18650 silinder.

Gagasan/ide nanofluida dikemukakan oleh Choi & Eastman (1995), mereka mengusulkan rekayasa cairan perpindahan panas dengan menambahkan nanopartikel logam dalam cairan. Hasilnya “nanofluida” diharapkan menunjukkan laju perpindahan panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan fluida perpindahan panas yang umum digunakan. Abdelkareem et al. (2022) menyatakan bahwa nanofluida mempunyai potensi konduktivitas termal yang tinggi, bahkan untuk konsentrasi kecil dari nanopartikel tersuspensi. Selain menggunakan nanofluida, desain yang dimodifikasi dapat meningkatkan kinerja perpindahan panas (Hasan et al., 2023).

Penggunaan metode numerik dengan simulasi komputasi sering dilakukan untuk menganalisis perpindahan panas terhadap kinerja baterai. Untuk memvalidasi hasil numerik, umumnya dilakukan studi eksperimental dalam kasus-kasus praktis. Hasan et al. (2023) melakukan penelitian dengan simulasi komputasi dengan Ansys Fluent mengenai pengaruh sistem pendingin menggunakan empat nanofluida (SiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , dan CuO) dan air murni, untuk mendinginkan 52 sel baterai Li-ion silinder. Didapat bahwa nilai Re yang lebih tinggi ($Re > 30000$) menghasilkan proses pendinginan yang lebih baik dan menurunkan suhu sel baterai. Sarchami et al. (2022) melakukan penelitian simulasi komputasi pada modul baterai yang terdiri dari 71 baterai Li-ion tipe 18650 silinder, yang dilengkapi sistem pendingin air dan nanofluida (alumina). Didapat bahwa penambahan pendingin nanofluida alumina dan peningkatan kecepatan aliran masuk pendingin secara signifikan dapat menurunkan suhu di seluruh modul.

Dalam penelitian tugas akhir ini, penulis menganalisis termal pada sistem pendingin modul baterai Li-ion 18650 silinder yang terdiri dari 13 sel baterai. Modul baterai dijepit oleh *wavy channel tube* sebagai tempat fluida mengalir untuk mendinginkan baterai. Pengaruh jenis fluida dipertimbangkan untuk melihat performa nanofluida. Oleh karena itu, ada tiga jenis fluida pendingin yang digunakan, yaitu air (W), campuran air (W) 60% + etilen glikol (EG) 40%, serta nanofluida dengan nanopartikel *cellulose nanocrystal* (CNC) 0,5% yang disuspensikan dengan basis cairan berupa campuran air (W) 60% + etilen glikol (EG) 40%. Variasi besarnya laju aliran massa juga dipertimbangkan untuk mengalirkan fluida pendingin ke dalam *wavy channel tube*, yaitu 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana melakukan simulasi komputasi untuk menguji sistem pendingin baterai menggunakan *software* Ansys Fluent?

2. Bagaimana pengaruh pendingin nanofluida *cellulose nanocrystal* (CNC) - air (W) + etilen glikol (EG) terhadap penurunan suhu maksimum pada modul baterai Li-ion?
3. Bagaimana pengaruh variasi besarnya laju aliran massa terhadap penurunan suhu maksimum pada modul baterai Li-ion?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian tugas akhir yang ingin dicapai berdasarkan rumusan masalah di atas adalah sebagai berikut.

1. Melakukan simulasi pada sistem pendingin modul baterai Li-ion tipe 18650 silinder.
2. Menganalisis pengaruh pendingin nanofluida *cellulose nanocrystal* (CNC) – air (W) + etilen glikol (EG) terhadap penurunan suhu maksimum pada modul baterai Li-ion.
3. Menganalisis pengaruh variasi besarnya laju aliran massa terhadap penurunan suhu maksimum pada modul baterai Li-ion.

1.4 Manfaat Penelitian

Berikut beberapa manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian tugas akhir yang dilakukan.

1. Dapat memberikan informasi untuk merancang sistem manajemen termal baterai yang dapat digunakan pada kendaraan listrik.
2. Dapat memberikan perbandingan sistem manajemen termal baterai menggunakan *wavy channel tube* dengan jenis sistem manajemen termal baterai lainnya.
3. Penelitian tugas akhir ini dapat menjadi perbandingan atau rujukan untuk penelitian berikutnya.

1.5 Batasan Masalah

Terdapat beberapa hal yang menjadi batasan masalah agar penelitian tugas akhir ini dapat berjalan sesuai dengan objek yang ingin dicapai, diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Geometri yang digunakan berupa *wavy channel tube* yang menjepit modul baterai Li-ion tipe 18650 silinder.
2. Pengujian sistem pendingin baterai dilakukan menggunakan *software* Ansys Fluent dengan jumlah *mesh* sebanyak 983069 sel.
3. Variasi laju aliran massa, yaitu 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s.
4. Simulasi dilakukan dalam kondisi *transient* dengan *time step* 2 s yang menghasilkan 900 s.
5. Tidak mempertimbangkan proses elektrokimia di dalam baterai.
6. Tidak mempertimbangkan proses pembuatan nanofluida.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *State of The Art*

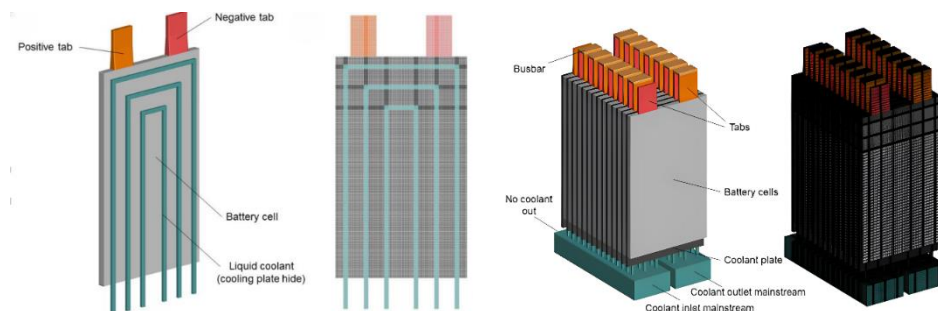
State of the art bertujuan untuk menganalisa penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan untuk dijadikan sebagai acuan. Dalam *state of the art* dapat meliputi judul, penulis, tujuan penelitian, metode yang digunakan, dan hasil yang dicapai. Adapun referensi yang dijadikan *state of the art* pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. **Judul:** *Three-dimensional Thermal Modeling of Li-ion Battery Cell and 50 V Li-ion Battery Pack Cooled by Mini-channel Cold Plate*

Peneliti: Yubai Li, Zhifu Zhou, Wei-Tao Wu (2019).

Tujuan: Memberikan demonstrasi pemodelan termal 3D dalam merancang desain termal paket baterai.

Metode: Pemodelan termal 3D sel baterai Li-ion dan paket baterai Li-ion 50 V yang terdiri dari 14 baterai prismatik dengan pendingin fluida air (Gambar 2.1). Pemodelan baterai menggunakan *Multi-Scale Multi-Domain* (MSMD) dengan sub-model *Equivalent Circuit Model* (ECM).

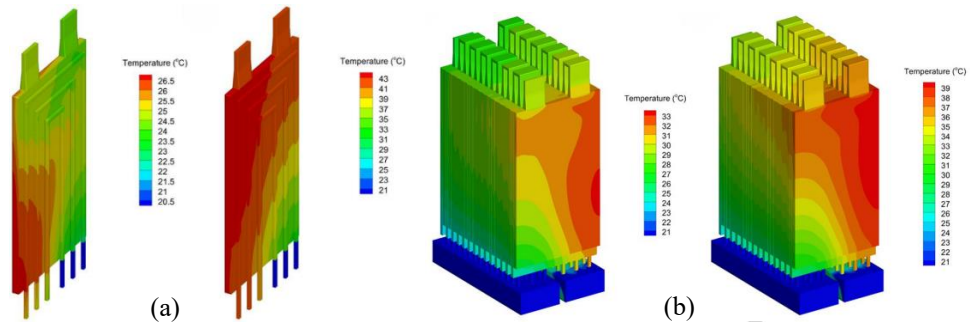


Gambar 2.1 Model Geometri dan *Mesh* Sel Baterai dan Paket Baterai Li-ion Prismatik

(Sumber: Li et al., 2019)

Hasil: Hasil penelitian menemukan bahwa ketika pendingin beroperasi dengan kecepatan yang rendah pada baterai yang beroperasi dengan laju 5C,

suhu sel dapat dengan mudah melebihi 40 °C, dan perbedaan suhu antar sel melebihi 5 °C. Di samping itu, saat aliran pendingin yang cukup tersedia, suhu sel dan perbedaan suhu antar sel dapat terkontrol dengan baik



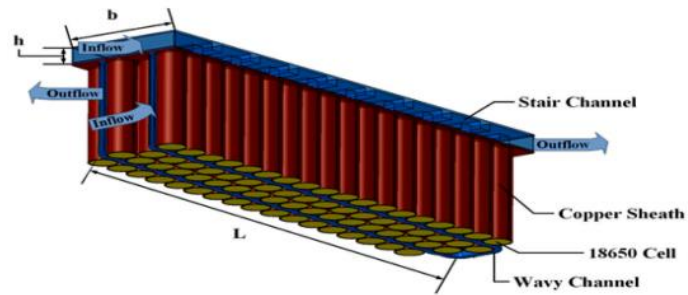
Gambar 2.2 Kontur Suhu: (a) Sel Baterai Dengan Kecepatan Pendinginan 0,1 m/s dan 0,01 m/s, (b) Paket Baterai Dengan Kecepatan Pendinginan 0,01 m/s dan 0,005 m/s
(Sumber: Li et al., 2019)

2. **Judul:** *A novel nanofluid cooling system for modular lithium-ion battery thermal management based on wavy/stair channels*

Peneliti: Amirhosein Sarchami, Mahdi Tousi, Mehrdad Kiani, Amir Arshadi, Mohammad Najafi, Mahdi Darab, Ehsan Houshfar (2022)

Tujuan: Meningkatkan distribusi suhu dan kapasitas pendinginan sistem manajemen termal baterai selama proses *charge/discharge*.

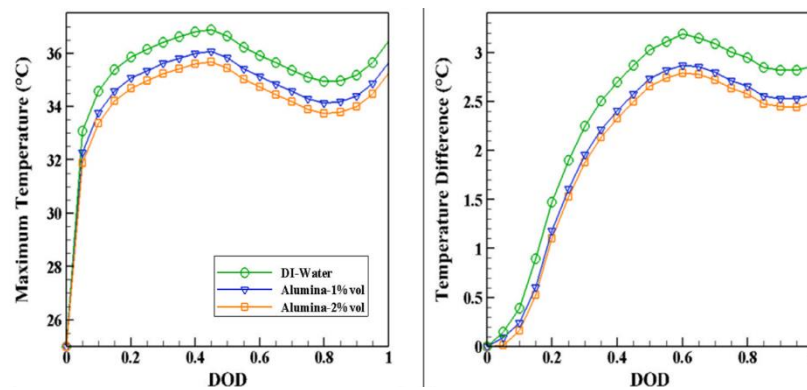
Metode: Model pendingin modul baterai yang terdiri dari 71 baterai Li-ion tipe 18650 silinder. Bagian pendingin meliputi *stair channel* di atas baterai dan *wavy channel* antar baterai untuk mendinginkan modul baterai Li-ion selama proses *charge/discharge*. Selubung tembaga (*copper sheath*) dipermukaan baterai untuk mendistribusikan panas secara merata dengan menyerap panas. Pendingin yang digunakan adalah air dan nanofluida alumina. Pemodelan baterai menggunakan persamaan *heat generation* baterai yang diinputkan di Ansys Fluent.



Gambar 2.3 Model Skema Sistem Pendingin Modul Baterai

(Sumber: Sarchami, et al., 2022)

Hasil: Penambahan pendingin nanofluida alumina secara signifikan dapat menurunkan suhu maksimum dan meningkatkan distribusi suhu di seluruh modul baterai. Dengan menggunakan nanofluida alumina 2%, suhu maksimum dan perbedaan suhu antar baterai untuk proses *discharge* 5C masing-masing menurun sebesar 1,2 °C dan 0,4 °C dibandingkan dengan air. Peningkatan kecepatan masuk cairan pendingin juga menyebabkan penurunan suhu maksimum dan perbedaan suhu antar baterai.



Gambar 2.4 Perbandingan Pendingin Air dan Nanofluida Alumina

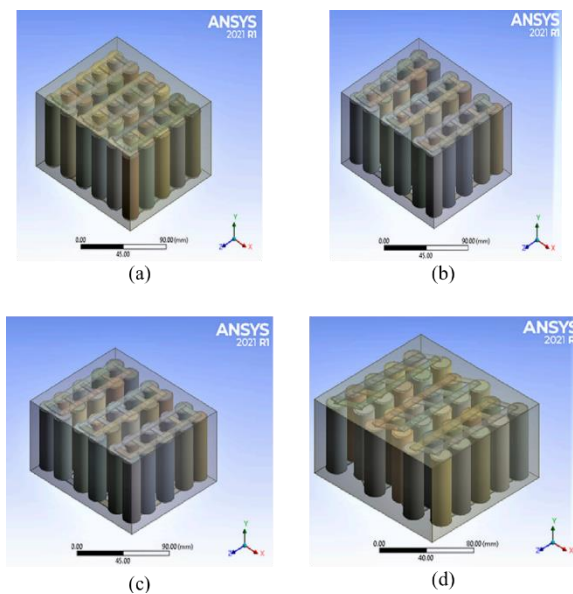
(Sumber: Sarchami et al., 2022)

- Judul:** *Computational investigation for reduction in auxiliary energy consumption with different cell spacing in battery pack*

Peneliti: Akshay B. Padalkar, Mangesh B. Chaudhari, Adinath M. Funde (2023)

Tujuan: Meningkatkan efisiensi pendinginan dan mengurangi penggunaan energi tambahan dalam sistem pendingin paket baterai sel silinder dengan pendingin udara.

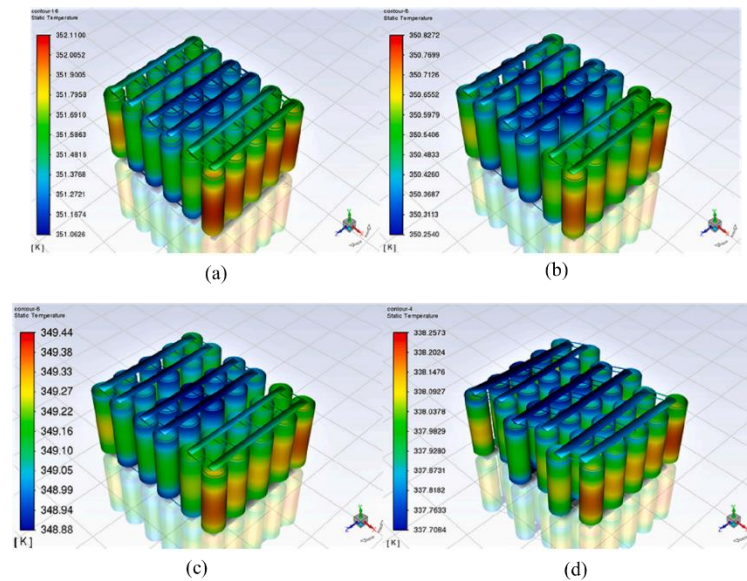
Metode: Paket baterai sel silinder yang disusun 6S5P dengan pendingin udara. Jarak antar sel baterai dimodifikasi melintang (St) dan memanjang (Sl) untuk melihat kinerja pendinginan baterai dengan tetap memperhatikan volume paket baterai. Model baterai ditunjukkan pada Gambar 2.3, (a) jarak konstan $St = 23$ mm dan $Sl = 23$ mm, (b) jarak $St = 21 - 26$ mm dan $Sl = 21 - 25$ mm, (c) jarak $St = 20 - 27,5$ mm dan $Sl = 21 - 26$ mm, dan (d) jarak konstan $St = 23$ mm dan $Sl = 23$ mm dengan mengambil baris 10 mm ke depan dan menjaga baris tetap berurutan. Baterai dimodelkan dengan model *Multi-Scale Multi-Domain* (MSMD) dan sub-model *Equivalent Circuit Model* (ECM)



Gambar 2.5 Model Geometri Baterai Dengan Variasi Jarak Antar Sel
(Sumber: Padalkar et al., 2023)

Hasil: Kemampuan pendinginan paket baterai meningkat karena udara dapat menarik panas dengan lebih baik pada baris akhir. Dengan memodifikasi jarak antar sel, dapat meningkatkan kinerja pendinginan

sebesar 21,2%. Suhu baterai berhasil dikurangi tanpa memerlukan energi tambahan dan penambahan ukuran volume paket baterai.



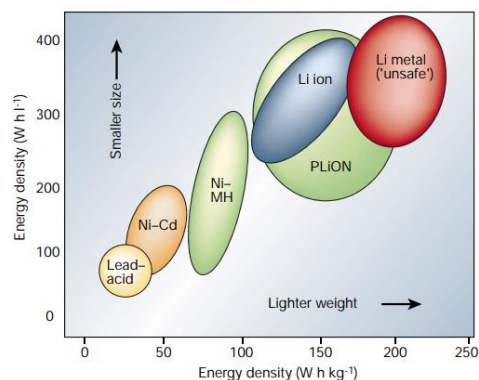
Gambar 2.6 Kontur Suhu Pada 3C Dengan Memodifikasi Jarak Antar Sel
(Sumber: Padalkar et al., 2023)

2.2 Parameter Baterai

Dalam pengembangan transportasi, penggunaan kendaraan listrik menjadi arah utama untuk mengatasi polutan dari kendaraan konvensional. Energi listrik pada kendaraan listrik bersumber dari baterai. Baterai yang tersedia di pasaran untuk aplikasi kendaraan listrik adalah Lithium-Ion (Li-ion), Nickel-Metal Hybrid (NiMH), dan Nickel-Cadmium (NiCd). Baterai yang paling sering digunakan adalah Li-ion (Yacoub et al., 2023).

Performa dari baterai Li-ion dapat ditinjau berdasarkan sejumlah parameter, seperti energi volumetrik (*volumetric energy*), energi spesifik (*specific energy*), kapasitas spesifik (*specific capacity*), siklus masa pakai (*cycle life*), keamanan (*safety*), pengujian baterai (*battery testing*), dan laju *charge/discharge* baterai (*c-rate*). Energi volumetrik (Wh/l) menyatakan jumlah energi yang dikandung baterai relatif terhadap ukurannya, yang dikenal sebagai densitas energi volumetrik (*volumetric energy density*). Sedangkan energi spesifik (Wh/kg) menyatakan jumlah energi yang dikandung baterai relatif terhadap beratnya, ini juga dikenal sebagai densitas energi gravimetri

(*gravimetric energy density*). Energi spesifik dapat diperoleh dengan mengalikan kapasitas spesifik (Ah/kg) dengan tegangan baterai (V). Kapasitas spesifik menyatakan jumlah muatan yang dapat disimpan secara reversibel per satuan massa. Tarascon & Armand (2001) membandingkan densitas energi berbagai baterai komersial yang dapat diisi ulang seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.7 Perbandingan Densitas Energi Dari Berbagai Baterai Isi Ulang
(Sumber: Tarascon & Armand, 2001)

Dari gambar tersebut menunjukkan keunggulan baterai Li-ion dibandingkan baterai lainnya. Meskipun baterai Li-metal memiliki energi yang lebih tinggi dibandingkan baterai Li-ion, kelemahannya adalah pengisian ulang yang buruk dan rentan terhadap kebakaran atau bahkan ledakan (Deng, 2015).

Siklus masa pakai baterai menyatakan jumlah siklus *charge* dan *discharge* baterai sebelum tingkat kapasitasnya turun di bawah 80% yang dianggap akhir masa pakai baterai. Secara praktis, masa pakai baterai Li-ion dipengaruhi oleh *depth of discharge* (DOD) dan *state of charge* (SOC) serta suhu pengoperasian baterai. *Depth of discharge* (DOD) menunjukkan persentase baterai yang telah di-*discharge* relatif terhadap keseluruhan kapasitas baterai. Misalnya, jika baterai 100 Ah dikosongkan selama 20 menit dengan arus 50 A, maka DOD baterai adalah $\frac{50 \times 20}{60 \times 100} = 16,7\%$. Sedangkan *state of charge* (SOC) menunjukkan kapasitas baterai yang masih tersimpan. Sehingga dari contoh tersebut baterai telah dikosongkan (DOD) sebesar 16,7% dan masih memiliki kapasitas sisa (SOC) 83,3%. Semakin sering baterai di-*charge* dan di-*discharge*, semakin pendek masa pakainya. Siklus masa pakai

baterai dapat ditingkatkan dengan memperhatikan DOD dan mengurangi perubahan SOC serta menghindari suhu tinggi.

Baterai Li-ion dengan banyak sel memiliki persyaratan keamanan yang sangat tinggi. Komponen *battery management system* (BMS) biasanya digunakan dalam baterai modul/paket untuk mencegah terjadinya pelepasan panas yang berpotensi berbahaya. Misalnya, jika terjadi kerusakan pada salah satu sel baterai dalam paket baterai, BMS memiliki kemampuan untuk menemukan dan mengisolasi sel yang terkena masalah tersebut.

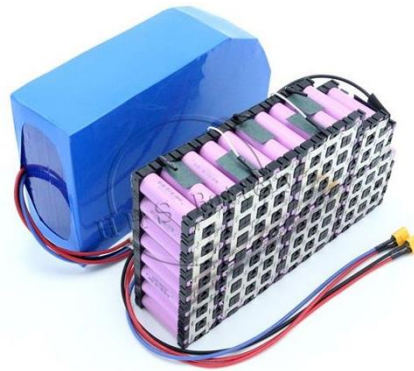
Dalam penggunaan baterai Li-ion, kebutuhan akan pengujian baterai menjadi sangat penting, terutama dalam penerapannya pada kendaraan listrik. Evaluasi pengujian dilakukan pada prototipe dalam bentuk pengujian mekanis, termal, dan listrik. Evaluasi pengujian mekanis meliputi tabrakan, jatuh, terguling, dan pengujian perendaman dalam air. Evaluasi pengujian termal mencakup pengujian panas radiasi, stabilitas termal, panas berlebih, dan suhu rendah. Evaluasi pengujian listrik meliputi uji korsleting, *charge* berlebih, dan *discharge* berlebih. Pengujian tersebut sangat penting karena kendaraan listrik diharapkan dapat bersaing dengan kendaraan konvensional yang dapat bekerja dengan baik dalam kondisi sulit.

Tingkat seberapa cepat baterai terisi penuh atau habis biasanya disebut C-Rate. Pengisian pada tingkat 1C berarti bahwa baterai diisi dari 0% hingga 100% dalam 1 jam. Rangkaian yang lebih tinggi dari 1C berarti pengisian lebih cepat. Misalnya 3C, berarti tiga kali lebih cepat sehingga pengisian penuh dalam 20 menit. Demikian pula C-Rate yang rendah berarti pengisian daya yang lebih lambat. Misalnya C/5, maka akan menjadi lima kali lebih rendah dari 1C, yaitu sebesar 5 jam (Deng, 2015).

2.3 Baterai Lithium-Ion (Li-ion)

Baterai Li-ion adalah salah satu dari kelompok baterai yang dapat diisi ulang (*rechargeable battery*). Baterai ini umumnya ditemui pada barang-barang elektronik portabel, seperti laptop, ponsel, kamera, dan lain-lain. Selain digunakan pada peralatan elektronik, baterai Li-ion juga sering digunakan oleh industri kendaraan listrik, militer, dan dirgantara.

Untuk mengoperasikan beban yang besar, seperti kendaraan listrik, sel baterai Li-ion disusun menjadi paket baterai. Paket baterai terdiri dari kumpulan sel-sel Li-ion biasa yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Sel-sel Li-ion terhubung dalam kombinasi seri dan paralel untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan untuk menjalankan kendaraan listrik. Alih-alih menggunakan beberapa sel yang besar, sel-sel kecil yang saling terhubung akan lebih menjamin pendinginan yang efektif. Metode ini meminimalkan *hotspot* termal dan distribusi suhu yang lebih merata akan tercapai sehingga mengarah pada masa pakai baterai yang lebih lama.

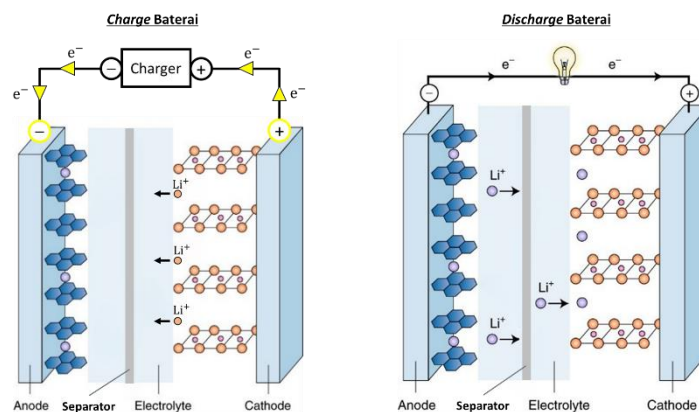


Gambar 2.8 Paket Baterai
(Sumber: pinterest.com)

Lithium adalah logam yang sangat reaktif dan tidak stabil, bahkan bereaksi dengan air dan udara. Lithium akan stabil ketika menjadi bagian dari oksida logam. Oleh sebab itu, bahan yang digunakan untuk baterai mengandung oksida logam lithium. Jika lithium dipisahkan dari oksida logam, lithium akan langsung membentuk ion lithium dan elektron. Listrik dapat dihasilkan jika dapat memberikan dua jalur berbeda untuk aliran ion lithium dan elektron.

Untuk memisahkan atom lithium dari oksida logam, baterai Li-ion menggunakan elektrolit dan grafit. Oksida logam lithium berperan sebagai katoda, grafit sebagai anoda, dan diantara katoda-anoda terdapat elektrolit. Grafit digunakan sebagai media penyimpanan ion lithium. Sedangkan elektrolit berguna sebagai pelindung dan media ion lithium untuk mengalir.

Ketika baterai Li-ion di-charge, katoda dan anoda dihubungkan secara eksternal ke suplai listrik. Elektron dipaksa untuk dilepaskan dari oksida logam lithium (katoda) dan mengalir melalui sirkuit eksternal suplai listrik menuju grafit (anoda). Secara bersamaan, ion lithium bermuatan positif mengalir melalui elektrolit menuju grafit (anoda). Elektron dan ion lithium akan terperangkap di lapisan grafit. Fenomena ini terus terjadi hingga anoda dipenuhi elektron dan ion lithium, atau suplai listrik diputus. Hal sebaliknya terjadi selama proses *discharge*, ion lithium akan kembali ke keadaan stabilnya sebagai bagian dari oksida logam. Karena kecenderungan ini, ion lithium mengalir melalui elektrolit dari grafit (anoda) menuju oksida logam lithium (katoda) dan elektron mengalir melalui sirkuit beban. Fenomena ini menyebabkan arus listrik dapat tercipta melalui beban. Dengan ini, berhasil memandu elektron melalui sirkuit beban (Deng, 2015).



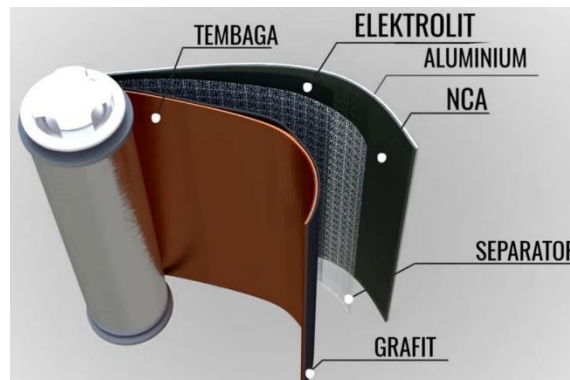
Gambar 2.9 Ilustrasi *Charge* dan *Discharge* Baterai Li-Ion

(Sumber: Goodenough, 2018)

Jika suhu internal naik karena kondisi yang tidak terduga, elektrolit cair akan mengering dan akan terjadi korsleting antara anoda dan katoda. Ini dapat menyebabkan kebakaran atau ledakan. Untuk menghindari situasi tersebut, separator ditempatkan diantara kedua elektroda.

Dalam sel praktisnya, grafit dan oksida logam lithium masing-masing dilapisi lembaran foil tembaga dan aluminium. Foil berperan sebagai kolektor dan media untuk memunculkan tab positif dan tab negatif baterai. Garam

lithium organik (umumnya karbonat) berperan sebagai elektrolit dan dilapiskan ke lembaran separator. Ketiga lembaran ini dililitkan ke silinder inti pusat.



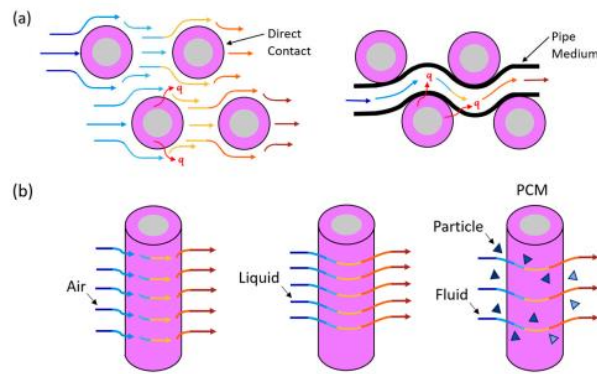
Gambar 2.10 Struktur Baterai Lithium-Ion Silinder

(Sumber: Lesics Indonesian, 2019)

2.4 Sistem Manajemen Termal Baterai

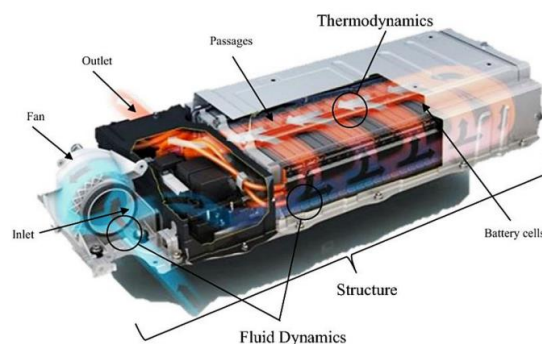
Baterai Li-ion menghasilkan panas selama proses *charge-discharge*. Panas yang dihasilkan berasal dari proses reaksi *electrochemical* dan *joule heating* selama baterai beroperasi (Kurniawan, 2020). Suhu optimal baterai Li-ion selama beroperasi berkisar antara 25 °C hingga 40 °C dengan perbedaan suhu antar tiap sel baterai tidak lebih dari 5 °C (Widyantara et al., 2022). Sehingga sistem manajemen termal baterai penting untuk mendistribusikan panas yang dihasilkan dan memperpanjang masa pakai baterai.

Sistem manajemen termal baterai dapat dikelompokkan berdasarkan prinsip kerjanya, yaitu kontak langsung dan kontak tidak langsung, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Kontak langsung yang berarti pendingin mengenai sel baterai tanpa perantara untuk melakukan perpindahan panas. Faktor signifikan yang mempengaruhinya, yaitu geometri paket baterai, ruang antar baterai, dan konfigurasi peletakan baterai. Sedangkan kontak tidak langsung yang berarti media pendingin dihantarkan melalui perantara seperti pipa sebagai media perpindahan panas. Faktor yang harus diperhatikan, yaitu bidang kontak dan dimensi pipa (tinggi dan tebal) (Widyantara et al., 2022).



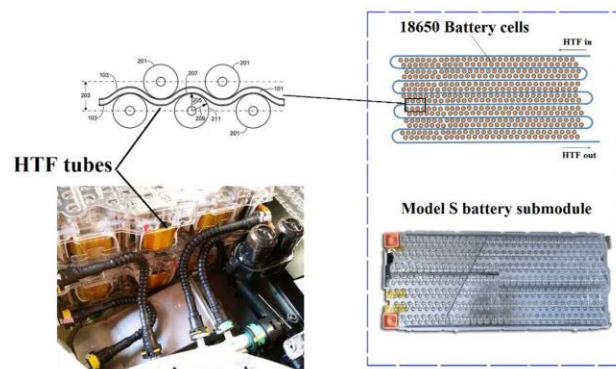
Gambar 2.11 (a) Perpindahan panas kontak langsung dan kontak tidak langsung; (b) Jenis bahan pendingin untuk manajemen termal baterai.
(Sumber: Widyantara et al., 2022)

Kategori proses manajemen termal baterai didasarkan pada bahan pendingin yang meliputi pendingin udara, pendingin cair, dan pendingin *phase change material* (PCM). Pendingin udara memiliki konstruksi sederhana yang membuatnya berbiaya rendah, mudah dalam perawatannya, dan menggunakan energi yang rendah. Namun, udara memiliki kemampuan perpindahan panas yang rendah sebagai media perpindahan panas (Widyantara et al., 2022). Sistem manajemen termal baterai dengan pendingin udara dapat berfungsi dengan baik ketika digunakan untuk paket baterai skala kecil dan suhu lingkungan normal, tetapi akan mengalami kegagalan jika digunakan untuk keluaran daya yang tinggi dan suhu lingkungan yang buruk (Yacoub et al., 2023). Teknologi pendingin udara umumnya digunakan pada kendaraan listrik komersial seperti Toyota Prius, ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Sistem Pendingin Baterai Dengan Udara Pada Toyota Prius
(Sumber: Yacoub et al., 2023)

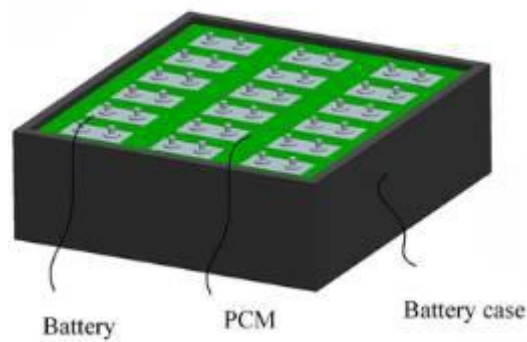
Sistem manajemen termal baterai berpendingin cair menggunakan cairan dengan kemampuan perpindahan panas yang lebih tinggi daripada udara, tetapi aplikasi praktis pada kendaraan listrik memerlukan pipa dengan konduktivitas termal yang tinggi sehingga mengarah pada konstruksi yang rumit. Pipa tersebut juga memiliki resiko kebocoran dan berpotensi menyebabkan korosi sel baterai dan bahkan korsleting (Wang et al., 2018). Sehingga diperlukan desain paket baterai dan konstruksi yang baik. Teknologi pendingin cair digunakan dalam Tesla Model S seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Pendinginan Baterai Dengan Cairan Pada Tesla Model S

(Sumber: Yacoub et al., 2023)

Sistem manajemen termal baterai dengan *phase change material* (PCM) bekerja secara berbeda dibandingkan pendingin udara dan pendingin cair. PCM bekerja dengan memanfaatkan perubahan wujud dari padat menjadi cair atau sebaliknya dengan menyerap dan melepaskan panas. Ketika baterai beroperasi dan mencapai suhu baterai yang tinggi, PCM menyerap panas dari baterai dan menyimpannya dalam bentuk panas laten (jumlah panas untuk mengubah fasa) sehingga PCM mengalami perubahan fasa dengan cara meleleh. PCM akan kembali ke bentuk padatan ketika suhu normal atau baterai tidak beroperasi (Yacoub et al., 2023). Ilustrasi manajemen termal baterai dengan PCM ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Ilustrasi Manajemen Termal Baterai Dengan PCM

(Sumber: Lin & Zhang 2021)

2.5 Nanofluida

Nanofluida adalah cairan yang mengandung partikel berukuran nanometer, yang disebut nanopartikel. Cairan ini terdiri dari campuran nanopartikel yang tersuspensi dalam basis cairan. Menambahkan nanopartikel ke dalam cairan dapat meningkatkan konduktivitas termal dari fluida tersebut. Nanopartikel yang digunakan dalam nanofluida biasanya terbuat dari logam, oksida, karbida, dan *carbon nanotubes*. Basis cairan yang umum digunakan untuk nanofluida, yaitu air, etilen glikol, dan minyak/oli (Kakac et al., 2012).

Nanofluida berpotensi dalam banyak aplikasi dalam perpindahan panas termasuk pada pendinginan baterai. Selain menggunakan material nanopartikel yang telah disebutkan sebelumnya, potensi penggunaan material nabati juga dapat dipertimbangkan untuk mengembangkan cairan pendingin yang lebih baik dan ramah lingkungan. Farhana et al. (2020) meneliti tentang material nabati nanofluida, berupa *cellulose nanocrystal* (CNC) yang tersuspensi dengan *ethylene glycol* (EG) dan *water* (W). Mereka menyatakan bahwa pendingin tersebut memiliki konduktivitas termal yang sangat baik yang dapat meningkatkan efisiensi dalam perpindahan panas. Dalam penelitian tugas akhir ini, digunakan nanofluida *cellulose nanocrystal* (CNC) - *ethylene glycol* (EG) + *water* (W) sebagai pendingin baterai. *Properties* utama dari nanofluida yang digunakan untuk simulasi numerik adalah konduktivitas termal (k), densitas (ρ), viskositas (μ), dan panas spesifik (C_p) yang nilainya mengacu pada penelitian Farhana et al. (2020).

2.6 Model Baterai *Multi-Scale Multi-Domain* (MSMD)

Model *multi-scale multi domain* (MSMD) diperkenalkan oleh tim pemodelan baterai di National Renewable Energy Lab (NREL) (Kim et al., 2011). Model MSMD adalah metode yang digunakan untuk menghitung reaksi elektrokimia dalam skala mikrometer dan membuat pemetaan dari reaksi tersebut (Schmidt et al., 2021). MSMD digunakan untuk menganalisis baterai dengan menghubungkan fisika baterai yang terjadi pada anoda-separator-katoda ketika *charge-discharge* baterai. Dalam melakukan analisis termal, tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi distribusi suhu pada baterai.

Medan termal dan listrik baterai diselesaikan dalam domain sel baterai menggunakan persamaan diferensial berikut (Canonsburg, 2015).

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \sigma_+ |\nabla \phi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \phi_-|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short} + \dot{q}_{abuse} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \phi_+) = -(j_{ECh} - j_{short}) \quad (2.4)$$

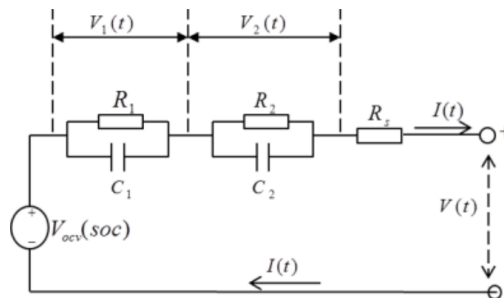
$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \phi_-) = j_{ECh} - j_{short}$$

Dimana σ_+ dan σ_- adalah konduktivitas listrik efektif untuk elektroda positif dan elektroda negatif, ϕ_+ dan ϕ_- adalah potensial fasa untuk elektroda positif dan elektroda negatif, j_{ECh} dan \dot{q}_{ECh} adalah laju perpindahan arus volumetrik dan pembangkitan panas akibat reaksi elektrokimia, j_{short} dan \dot{q}_{short} adalah laju perpindahan arus dan laju pembangkitan panas akibat korsleting (*short-circuit*) internal baterai, dan \dot{q}_{abuse} adalah pembangkitan panas akibat reaksi termal yang tidak terkendali. Untuk operasi normal, \dot{q}_{abuse} adalah nol. Sumber panas (*source terms*) j_{ECh} dan \dot{q}_{ECh} dihitung menggunakan sub-model elektrokimia. Jika tidak ada korsleting (*short-circuit*) internal baterai, maka j_{short} dan \dot{q}_{short} adalah nol.

Untuk model MSMD, ada beberapa sub-model untuk merepresentasikan elektrokimia baterai. Beberapa pendekatan utama, antara lain model ECM (*Equivalent Circuit Model*), NTGK (Newman, Tiedemann, Gu, dan Kim), dan Newman P2D (*Pseudo Two Dimensional*). Model tersebut telah diintegrasikan ke dalam berbagai platform pemodelan numerik untuk pemodelan termal baterai (Li et al., 2019). Pada penelitian tugas akhir ini, digunakan model ECM untuk merepresentasikan elektrokimia dalam baterai Li-ion (j_{ECh} dan \dot{q}_{ECh}) di platform Ansys Fluent.

2.7 Pendekatan *Equivalent Circuit Model* (ECM)

Equivalent Circuit Model (ECM) merupakan sebuah metode dimana sifat baterai dimodelkan menjadi sebuah rangkaian listrik yang terdiri dari resistor dan kapasitor sehingga tidak perlu mendefinisikan reaksi elektrokimia. Dalam Ansys Fluent, diadopsi model ECM dengan enam parameter mengikuti penelitian (Chen & Rincon, 2006). Gambar 2.15 di bawah ini menunjukkan rangkaian *equivalent circuit model* (ECM).



Gambar 2.15 *Equivalent Circuit Model* (ECM)

(Sumber: Canonsburg, 2015)

Model ECM memiliki enam komponen yang terdiri dari V_{ocv} , R_s , dan dua kombinasi polarisasi paralel RC, yaitu R_1 , R_2 , C_1 , dan C_2 . Setiap komponen mewakili aspek baterai yang berbeda. V_{ocv} adalah *open circuit voltage* dan salah satu parameter terpenting baterai. R_s adalah resistansi ohmik, mewakili resistansi internal di dalam sel baterai dan berperan dalam penurunan atau kenaikan tegangan ketika baterai *charge* atau *discharge*. R_1 , C_1 , R_2 , dan C_2 adalah dua elemen polarisasi paralel, yang berperan atas respons transien baterai. R_1 dan C_1 menggambarkan kecepatan perubahan pada baterai yang menunjukkan pengaruh permukaan pada elektroda. R_1 adalah resistansi untuk mengalirkan muatan dan C_1 mewakili kapasitansi elektrokimia. R_2 dan C_2 mewakili pergerakan sel yang lebih lambat dalam jam. Semua parameter ini adalah fungsi dari *State of Charge* (SOC) baterai (Thanagasundram et al., 2012). Dengan kata lain, resistor menunjukkan seberapa mudahnya baterai mengeluarkan arus dan kapasitor sebagai penyimpan muatan pada baterai.

Misalnya terdapat sebuah baterai dengan kapasitansi besar dan resistansi kecil, artinya adalah baterai tersebut akan lebih cepat mengeluarkan arus.

Hubungan tegangan-arus pada Gambar 2.15 dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan rangkaian listrik sebagai berikut (Canonsburg, 2015).

$$V(t) = V_{OCV}(soc) - V_1 - V_2 - R_s(soc)I(t) \quad (2.5)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{1}{R_1(soc)C_1(soc)}V_1 - \frac{1}{C_1(soc)}I(t) \quad (2.6)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{1}{R_2(soc)C_2(soc)}V_2 - \frac{1}{C_2(soc)}I(t) \quad (2.7)$$

$$\frac{d(soc)}{dt} = \frac{I(t)}{3600Q_{Ah}} \quad (2.8)$$

Fungsi-fungsi di atas dapat dinyatakan dalam dua cara berbeda di Ansys Fluent, yaitu dalam bentuk polinomial orde kelima dan bentuk fungsi yang diajukan oleh Chen & Rincon (2006).

a. Bentuk polinomial orde kelima

$$R_s = a_0 + a_1(soc) + a_2(soc)^2 + a_3(soc)^3 + a_4(soc)^4 + a_5(soc)^5 \quad (2.9)$$

$$R_1 = b_0 + b_1(soc) + b_2(soc)^2 + b_3(soc)^3 + b_4(soc)^4 + b_5(soc)^5 \quad (2.10)$$

$$C_1 = c_0 + c_1(soc) + c_2(soc)^2 + c_3(soc)^3 + c_4(soc)^4 + c_5(soc)^5 \quad (2.11)$$

$$R_2 = d_0 + d_1(soc) + d_2(soc)^2 + d_3(soc)^3 + d_4(soc)^4 + d_5(soc)^5 \quad (2.12)$$

$$C_2 = e_0 + e_1(soc) + e_2(soc)^2 + e_3(soc)^3 + e_4(soc)^4 + e_5(soc)^5 \quad (2.13)$$

$$V_{OCV} = f_0 + f_1(soc) + f_2(soc)^2 + f_3(soc)^3 + f_4(soc)^4 + f_5(soc)^5 \quad (2.14)$$

b. Bentuk fungsi yang diajukan oleh Chen & Rincon (2006)

$$R_s = a_0 + a_1 \exp[-a_2(soc)] \quad (2.15)$$

$$R_1 = b_0 + b_1 \exp[-b_2(soc)] \quad (2.16)$$

$$C_1 = c_0 + c_1 \exp[-c_2(soc)] \quad (2.17)$$

$$R_2 = d_0 + d_1 \exp[-d_2(soc)] \quad (2.18)$$

$$C_2 = e_0 + e_1 \exp[-e_2(soc)] \quad (2.19)$$

$$V_{OCV} = f_0 + f_1(soc) + f_2(soc)^2 + f_3(soc)^3 + f_4 \exp[-f_5(soc)] \quad (2.20)$$

Source terms untuk Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4 dihitung sebagai:

$$j_{ECh} = \frac{I}{Vol} \quad (2.21)$$

$$\dot{q}_{ECH} = \frac{I}{Vol} \left[V_{OCV} - (\varphi_+ - \varphi_-) - T \frac{dU}{dT} \right] \quad (2.22)$$

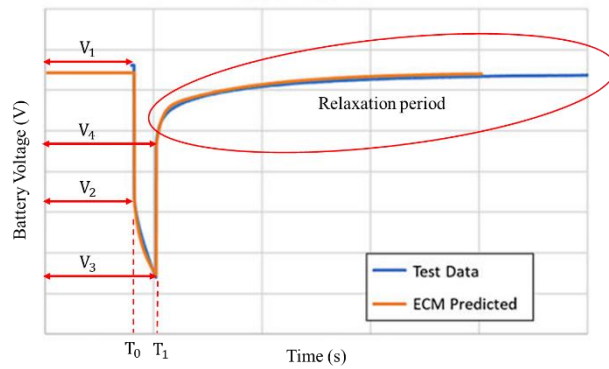
dimana Vol menunjukkan volume baterai, I adalah arus, dan V_{OCV} merupakan *open circuit voltage*. Ansys Fluent menyediakan *parameter estimation tool* untuk menghitung koefisien semua parameter ECM melalui data pengujian baterai. Data pengujian yang diperlukan adalah *hybrid pulse power characterization* (HPPC). Data ini merepresentasikan karaktersistik sel baterai (Canonsburg, 2015).

2.8 Hybrid Pulse Power Characterization (HPPC)

Hybrid pulse power characterization (HPPC) adalah metode yang digunakan untuk memperoleh informasi tentang karakteristik kemampuan daya dinamis baterai. Metode ini mengukur kemampuan daya dinamis baterai dengan memeriksa respon tegangan atau voltase sel baterai. Uji HPPC banyak digunakan untuk mengidentifikasi parameter sifat elektrokimia sel baterai yang diperlukan untuk simulasi baterai (Alsharif et al., 2023).

Dalam uji HPPC, serangkaian pulsa *discharge* pada berbagai *state of charge* (SOC) baterai dilakukan dan voltase baterai diukur. Pengujian ini dapat digunakan sebagai parameter model ECM (*Equivalent Circuit Model*) untuk mensimulasikan baterai. Untuk melakukan pengujian HPPC, baterai di-charge penuh hingga SOC 100%, kemudian di-*discharge* secara bertahap 10% dengan arus listrik konstan hingga baterai habis atau SOC 0%. Selain itu, diambil waktu relaksasi 10 menit setiap setelah periode 10% *discharge*. Selama pengujian tersebut voltase baterai diukur terhadap waktu (Shichun et al., 2022).

Setelah data HPPC didapat, kurva voltase-waktu yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengekstrak enam parameter untuk digunakan dalam model ECM (Gambar 2.15). Contoh kurva voltase-waktu data HPPC pada SOC tertentu ditunjukkan pada Gambar 2.16. Parameter yang ada, yaitu V_{ocv} , R_s , R_1 , C_1 , R_2 , dan C_2 . V_{ocv} menyatakan *open circuit voltage* dari baterai ($V_{ocv} = V_1$). R_s menyatakan resistansi seri sesaat baterai berdasarkan penurunan voltase pada T_0 ($R_s = (V_1 - V_2)/I$). Sedangkan R_1 , C_1 , R_2 , dan C_2 menyatakan resistansi dan kapasitansi berdasarkan penyesuaian kurva voltase kuadrat terkecil selama periode relaksasi.



Gambar 2.16 Parameter HPPC

(Sumber: ansys.com)

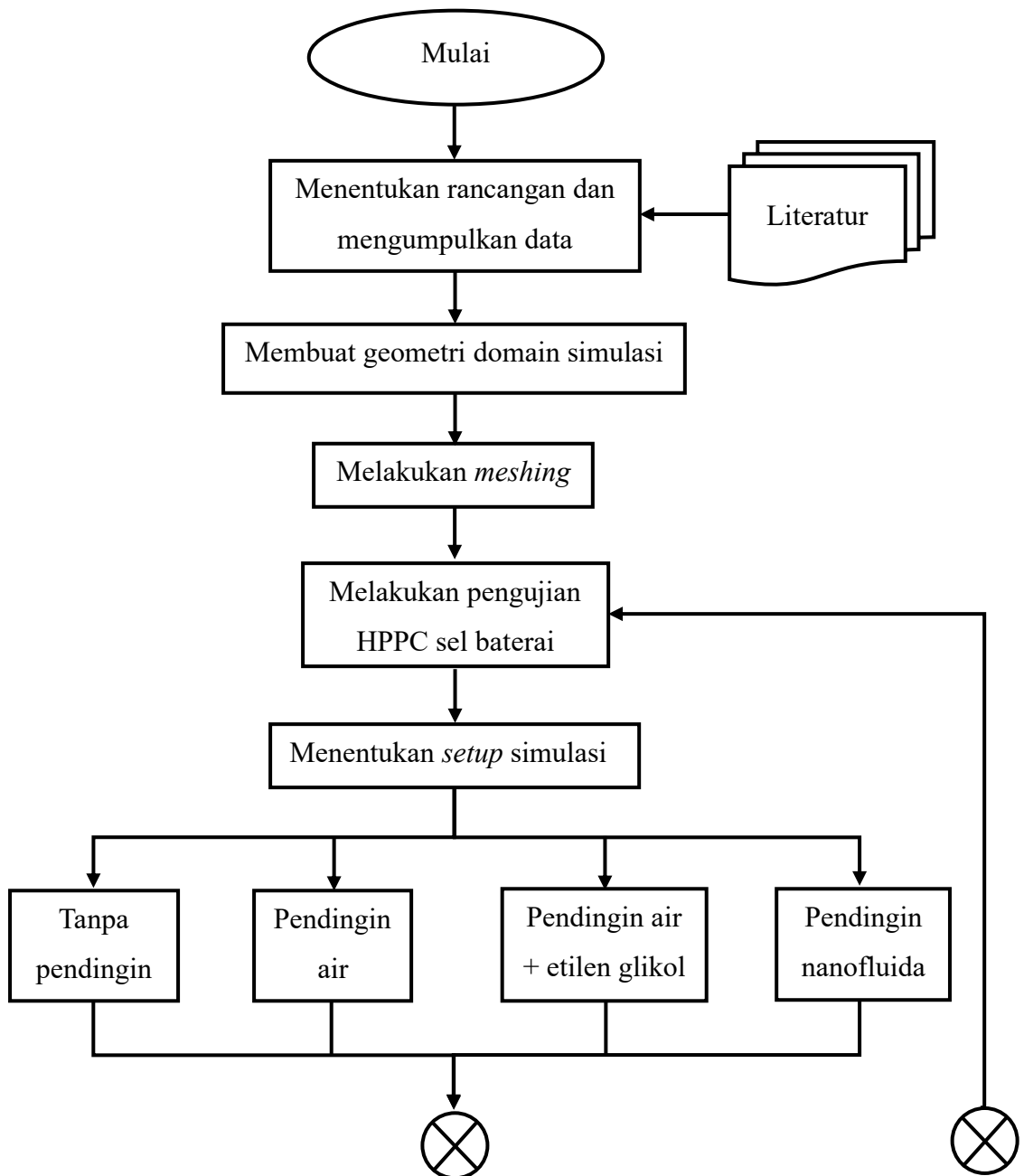
Model baterai dengan menggunakan ECM memerlukan data HPPC untuk mencerminkan kinerja sel baterai secara akurat. Model matematis ECM dapat digunakan untuk mensimulasikan dan memprediksi kinerja baterai dalam berbagai kondisi lingkungan dan beban. Nilai prediksi ECM (garis warna oranye di atas) ditampilkan relatif terhadap data pengujian (garis warna biru di atas) untuk memprediksi keakuratan profil kurva yang ditampilkan data pengujian.

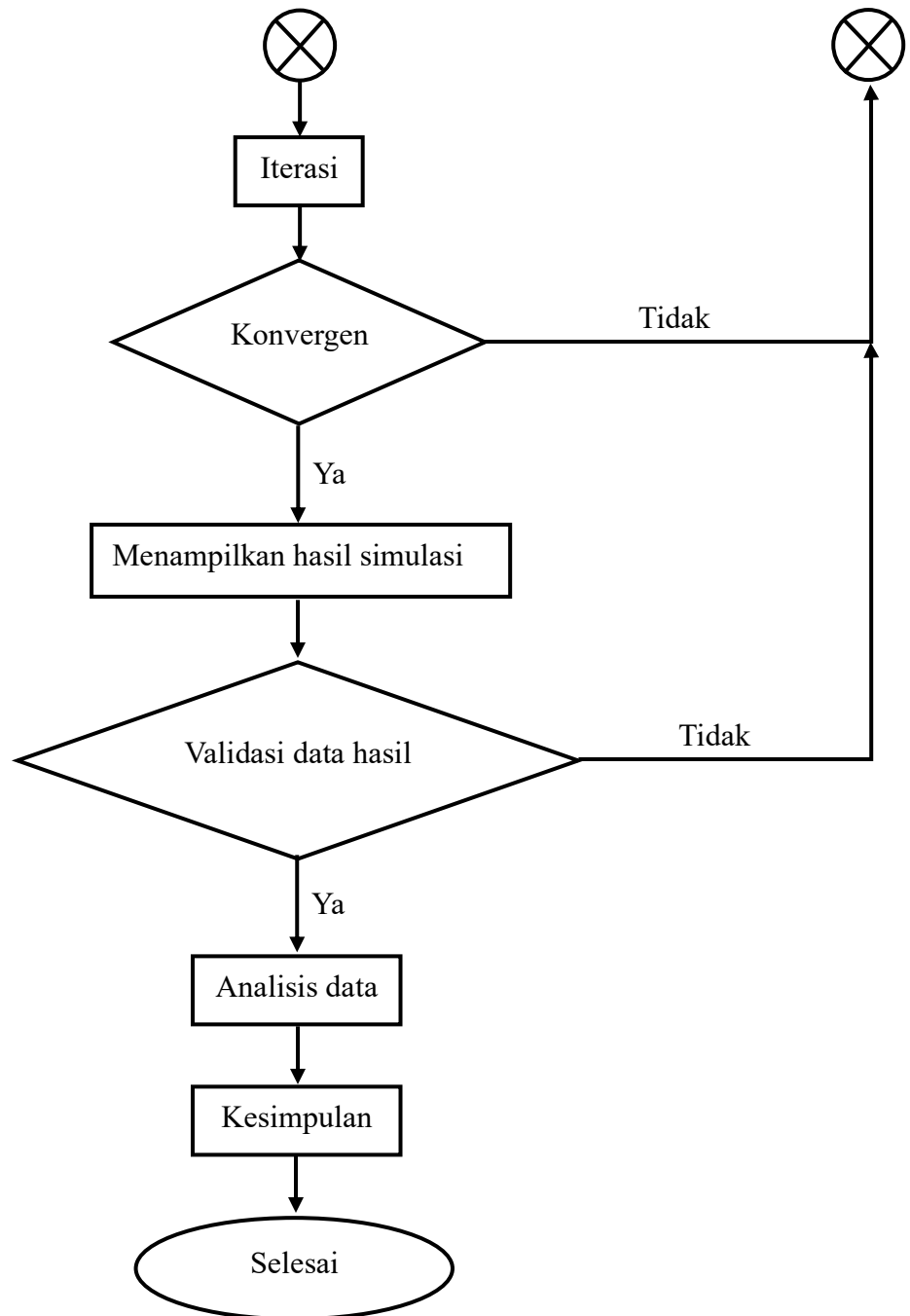
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian tugas akhir ini, penulis menyusun diagram alir yang bertujuan untuk menjadi acuan dalam pengerjaan tugas akhir. Adapun diagram alir yang telah disusun adalah sebagai berikut.

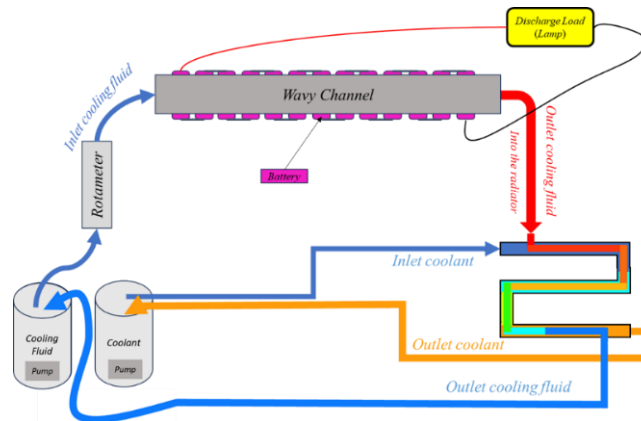




Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Perancangan dan Pengumpulan Data

Sistem pendingin baterai dirancang untuk mengatasi akumulasi panas saat baterai beroperasi. Sistem ini digunakan untuk mendinginkan baterai Li-ion tipe 18650 yang disusun 13 seri dan 1 paralel (13S1P). Skematik sistem pendingin baterai ditunjukkan pada Gambar 3.2.



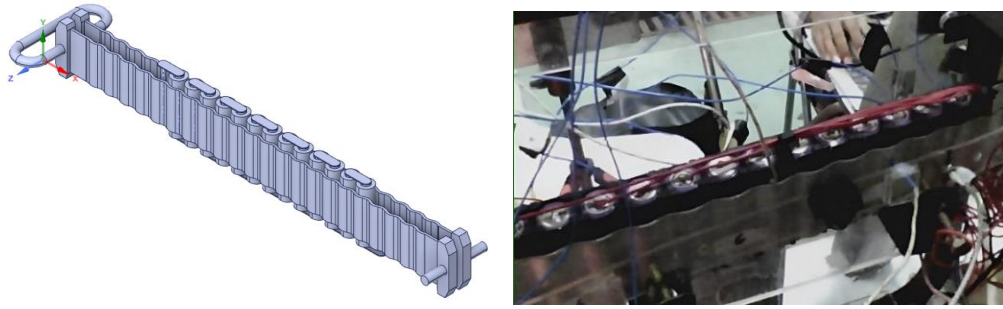
Gambar 3.2 Skematik Sistem Pendingin Baterai

Rangkaian baterai diapit dengan *wavy channel tube*. Baterai dihubungkan ke beban lampu, saat *switch* dinyalakan maka lampu akan terhubung dan menyala. Ini dilakukan untuk *discharge* baterai. Saat baterai di-*discharge* terjadi proses *electrochemical* dan *joule heating* (Kurniawan, 2020). Ini menyebabkan baterai dapat menghasilkan panas.

Fluida pendingin ditampung di dalam tangki, yang kemudian dialirkan ke *wavy channel tube* melalui inlet menggunakan pompa sehingga fluida pendingin mengalir di sepanjang *tube* tersebut. Ini bertujuan untuk menyerap akumulasi panas yang dihasilkan modul baterai. Fluida pendingin kemudian keluar melalui outlet dengan suhu yang lebih tinggi, yang kemudian melewati radiator untuk didinginkan kembali menggunakan *coolant*. Lalu, fluida pendingin ditampung kembali di tangki. Adapun sistem pendingin baterai untuk pengujian eksperimen yang telah dibuat ditunjukkan pada Gambar 3.3. Untuk penelitian tugas akhir ini, model yang digunakan hanya *wavy channel tube* dan modul baterai Li-ion 18650 silinder, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.3 Alat Eksperimen Sistem Pendingin Baterai



Gambar 3.4 Model Simulasi

3.2.1 Spesifikasi Sel Baterai Lithium-Ion 18650

Dalam penelitian tugas akhir ini, baterai Li-ion umum tipe 18650 digunakan dengan spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Data spesifikasi tersebut mengacu pada data spesifikasi pembelian baterai (Lampiran 2) dan penelitian Sarchami et al. (2022).

Tabel 3.1 Spesifikasi Baterai Lithium-Ion (Li-ion) 18650

Spesifikasi	Nilai	Satuan
Kapasitas Nominal	1,26	Ah (ampere-hour)
Tegangan Nominal	3,7	V (volt)
Tinggi Baterai	65	mm (milimeter)
Diameter Baterai	18	mm (milimeter)
Massa	45	g (gram)
Material Anoda	Grafit	-
Material Katoda	LiNiCoAlO ₂	-
Material Elektrolit	Lithium salt (LiPF ₆)	-

3.2.2 *Properties* Sel Baterai Lithium-Ion

Properties sel baterai merujuk pada penelitian Li et al., (2019). Nilai tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 *Properties* Sel Baterai

Besaran	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas	ρ	2092	kg/m ³
Panas Spesifik	C_p	678	J/(kg · K)
Konduktivitas Termal	k	18,2	W/(m · K)
Konduktivitas Listrik Elektroda Positif	σ_+	1190000	S/m
Konduktivitas Listrik Elektroda Negatif	σ_-	983000	S/m

3.2.3 *Properties* Busbar

Busbar digunakan sebagai penghantar listrik dan menghubungkan antar baterai sehingga tercipta rangkaian baterai 13S1P (13 Seri dan 1 Paralel). Material busbar yang digunakan adalah tembaga (*copper*) dengan *properties* material yang ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 *Properties* Busbar Tembaga

Besaran	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas	ρ	8978	kg/m ³
Panas Spesifik	C_p	381	J/(kg · K)
Konduktivitas Termal	k	387,6	W/(m · K)
Konduktivitas Listrik	σ	$5,8 \times 10^7$	S/m

3.2.4 *Properties* Wavy Channel Tube

Wavy channel tube digunakan sebagai tempat untuk mengalirkan fluida pendingin. Material yang digunakan adalah aluminium dengan *properties* ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 *Properties* Wavy Channel Tube Aluminium

Besaran	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas	ρ	2719	kg/m ³
Panas Spesifik	C_p	871	J/(kg · K)
Konduktivitas Termal	k	202,4	W/(m · K)

3.2.5 *Properties Air (W)*

Berikut data *properties* air yang ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.5 *Properties Air*

Besaran	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas	ρ	998,2	kg/m ³
Panas Spesifik	C_p	4182	J/(kg · K)
Konduktivitas Termal	k	0,6	W/(m · K)
Viskositas	μ	0,001003	kg/(m · s)

3.2.6 *Properties Air (W) 60% + Etilen Glikol (EG) 40%*

Campuran air dan etilen glikol juga digunakan sebagai fluida pendingin. Komposisi yang digunakan dalam fluida ini adalah air (W) 60% dan etilen glikol (EG) 40%. *Properties* dari fluida tersebut merujuk pada penelitian Farhana et al., (2020) yang ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3.6 *Properties 60% Air + 40% Etilen Glikol*

Besaran	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas	ρ	1051,5	kg/m ³
Panas Spesifik	C_p	2661	J/(kg · K)
Konduktivitas Termal	k	0,4110	W/(m · K)
Viskositas	μ	0,0021	kg/(m · s)

3.2.7 *Properties Nanofluida*

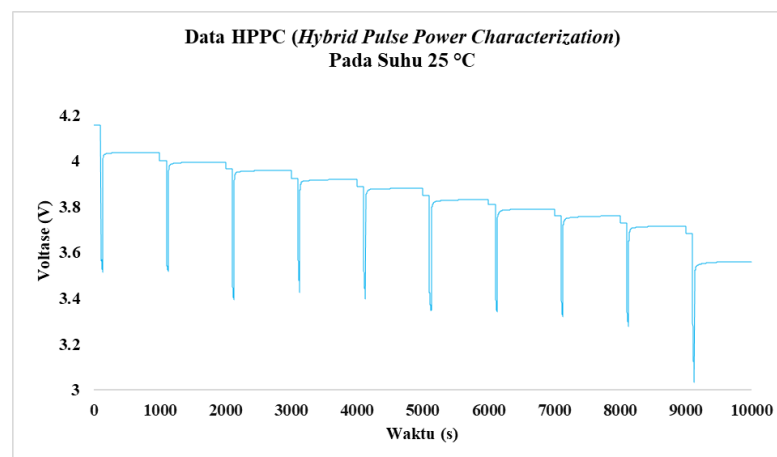
Nanofluida yang digunakan adalah *cellulose nanocrystal* (CNC) - air (W) + etilen glikol (EG). Nanofluida tersebut merujuk pada penelitian Farhana et al., (2020) yang berjudul “*Experimental Studies on Thermo-Physical Properties of Nanocellulose–Aqueous Ethylene Glycol Nanofluids*”. Pada penelitian ini, digunakan nanofluida berupa nanopartikel *cellulose nanocrystal* (CNC) dengan konsentrasi 0,5% yang disuspensikan menggunakan basis fluida dari campuran air (W) 60% dan etilen glikol (EG) 40%. *Properties* dari nanofluida CNC-W+EG ditunjukkan pada Tabel 3.8.

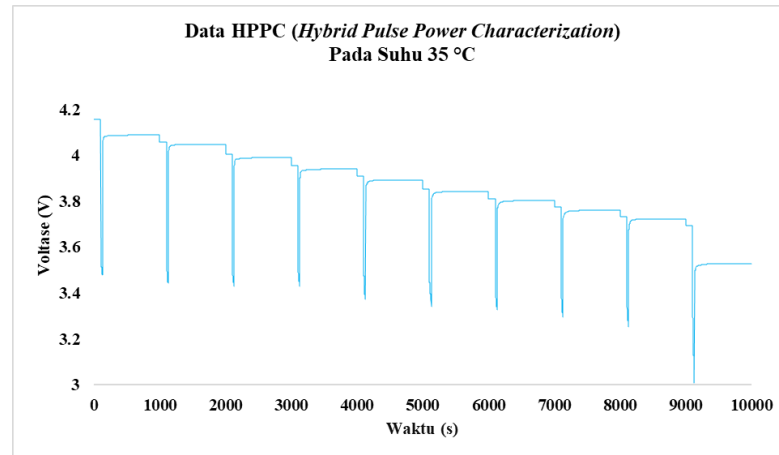
Tabel 3.7 *Properties* Nanofluida CNC-W+EG

Besaran	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas	ρ	1052,3	kg/m ³
Panas Spesifik	C_p	2512,5	J/(kg · K)
Konduktivitas Termal	k	0,4120	W/(m · K)
Viskositas	μ	0,00223	kg/(m · s)

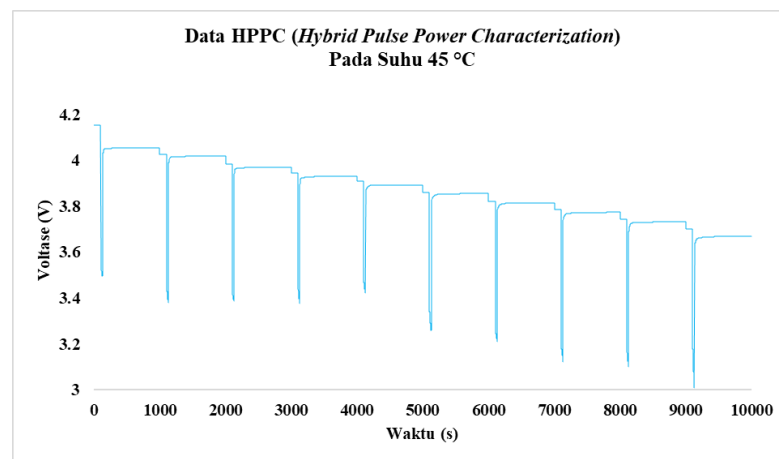
3.3 Pengujian *Hybrid Pulse Power Characterization* (HPPC) Sel Baterai

Pengujian HPPC bertujuan untuk memperoleh data yang digunakan untuk mengidentifikasi parameter model ECM (detail pada sub bab 2.7 dan 2.8). Pada penelitian ini, pengujian HPPC dilakukan dengan uji eksperimen sel baterai pada tiga variasi kondisi suhu ruang yang berbeda, yaitu 25 °C, 35 °C, dan 45 °C. Pada masing-masing kondisi suhu, baterai di-charge penuh hingga SOC 100%, kemudian di-discharge secara bertahap 10% dengan arus listrik konstan hingga baterai habis atau SOC 0%. Selain itu, diambil waktu relaksasi 10 menit setiap setelah periode 10% discharge. Selama pengujian tersebut voltase baterai diukur terhadap waktu. Data HPPC yang diperoleh untuk masing-masing kondisi suhu 25 °C, 35 °C, dan 45 °C ditunjukkan pada gambar di bawah ini, yang direpresentasikan dalam bentuk kurva.

**Gambar 3.5** Data HPPC Pada Suhu 25 °C



Gambar 3.6 Data HPPC Pada Suhu 35 °C



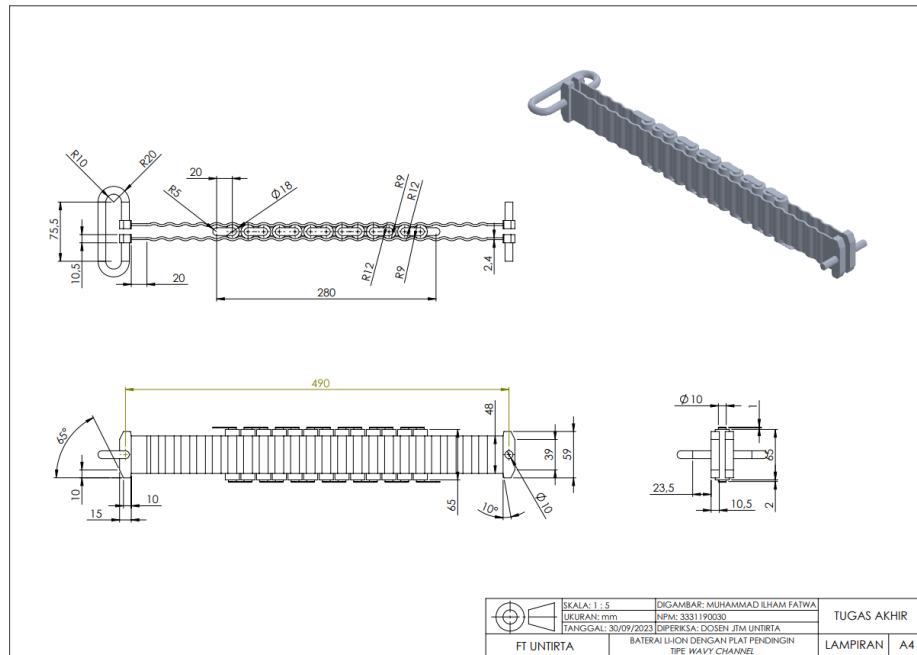
Gambar 3.7 Data HPPC Pada Suhu 45 °C

3.4 Geometri Model Simulasi

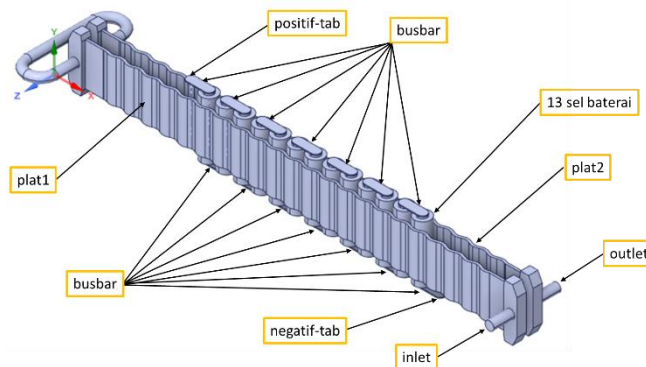
Model simulasi terdiri dari baterai Li-ion silinder 18650 yang disusun 13S1P (13 seri dan 1 paralel) dan *wavy channel tube*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8. Selain itu, pada model simulasi ini terbagi menjadi dua domain, yaitu domain solid dan domain fluida. Domain solid terdiri dari baterai, busbar, positif tab, dan negatif tab. Sedangkan domain fluida hanya terdiri dari *wavy channel tube*. Ini ditunjukkan pada Gambar 3.9.

Dalam pembuatan geometri model simulasi, perlu diperhatikan dalam mendefinisikan bagian-bagian yang dibuat. Hal ini dikarenakan dapat mempengaruhi tahap berikutnya. Bagian-bagian dari geometri perlu didefinisikan dengan memberi “nama” pada tiap *surface*-nya. Penamaan ini

akan menjadi acuan dalam menentukan kondisi batas (*boundary condition*) pada tahap *setup*. Adapun bagian-bagian dari model simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.8 Geometri Baterai Li-Ion Dengan *Wavy Channel Tube*

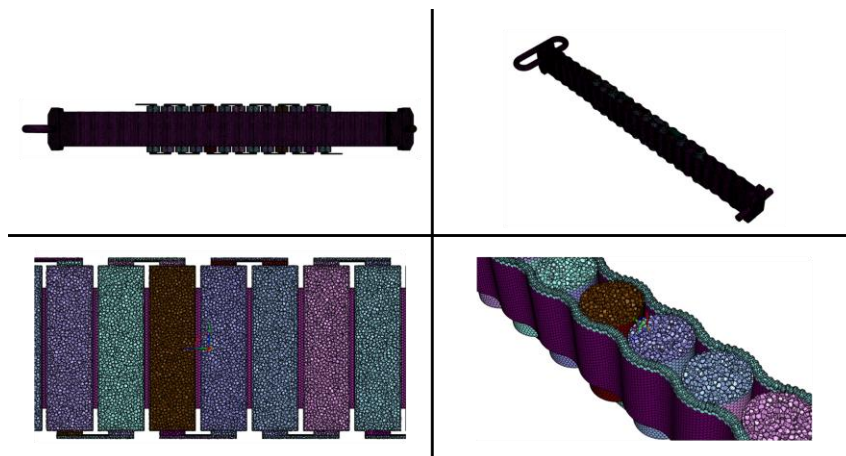


Gambar 3.9 Bagian-Bagian Model Simulasi

3.5 Pemodelan *Meshing*

Pemodelan *meshing* adalah proses dimana domain komputasi, yaitu volume kontrol yang telah dibuat dalam bentuk geometri, dibagi menjadi sub-volume yang sangat kecil. Dalam sub-volume ini, dilakukan perhitungan berbagai persamaan matematis. Pada penelitian ini, jumlah *mesh* yang

digunakan untuk simulasi sebanyak 983069 sel dengan tipe *polyhedra*. Adapun model *mesh* tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Model *Mesh* Domain Simulasi

3.5 Penentuan Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Model simulasi terdiri dari beberapa bagian, diantaranya adalah baterai, busbar, positif tab, negatif tab, *wavy channel tube*, inlet, dan outlet seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9. Bagian-bagian tersebut didefinisikan dengan menerapkan kondisi batas yang sesuai dengan aktualnya. Baterai ditentukan sebagai *active component* untuk pembangkitan panas akibat reaksi elektrokimia dalam baterai dan *joule heating*. Busbar ditentukan sebagai *passive component* untuk menghubungkan antar baterai dan berperan sebagai konduktor yang menghantarkan arus listrik. Positif tab dan negatif tab, masing-masing ditentukan sebagai kutub positif dan kutub negatif modul baterai yang secara aktualnya dihubungkan ke suatu beban. *Wavy channel tube* adalah tempat fluida mengalir dan ditentukan sebagai *no-slip wall*. Inlet adalah aliran masuk fluida ke dalam *wavy channel tube* yang ditentukan sebagai *mass flow inlet*. Outlet ditentukan sebagai *outflow*, dimana aliran keluar dari *wavy channel tube*.

3.6 Penentuan *Setup* Simulasi

Pengaturan model fisika yang tepat memungkinkan untuk mensimulasikan kondisi realistis, saat menganalisis modul baterai yang sebenarnya. Namun, dalam simulasi ini reaksi elektrokimia di dalam baterai

tidak dipertimbangkan, melainkan direpresentasikan menggunakan data HPPC. Simulasi penelitian tugas akhir ini menggunakan Ansys Fluent.

Pembangkitan panas dari modul baterai menggunakan model MSMD (*Multi Scale - Multi Domain*) dengan sub-model ECM (*Equivalent Circuit Model*) di Ansys Fluent. Parameter yang diinputkan meliputi *nominal capacity cell* (1.26 Ah), *C-Rate* (4C), *active component* (13 sel baterai), *passive component* (busbar), *negative tab* (negatif tab), *positive tab* (positif tab), dan parameter baterai yang digunakan (data HPPC). Dinding (*surface*) sel baterai ditetapkan memiliki koefisien perpindahan panas konveksi $5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ dan perpindahan panas radiasi diabaikan karena variasi suhu yang kecil (Sarchami et al., 2022).

Material yang sesuai diinputkan pada domain model simulasi untuk merepresentasikan modul baterai yang digunakan pada eksperimen. Material sel baterai ditunjukkan pada Tabel 3.2 digunakan untuk domain 13 sel baterai. Domain busbar menggunakan material tembaga (*copper*) dengan *properties* pada Tabel 3.3. Aluminium dengan *properties* pada Tabel 3.4 digunakan untuk dinding *tube* pendingin. Adapun fluida pendingin air, campuran air (W) 60% + etilen glikol (EG) 40%, dan nanofluida *cellulose nanocrystal* (CNC) – air (W) + etilen glikol (EG) dengan *properties*-nya masing-masing digunakan untuk domain fluida di dalam *tube* pendingin.

Saat baterai beroperasi, baterai secara berkala akan mengakumulasi panas karena adanya reaksi *electrochemical* di dalam baterai dan *joule heating*. Untuk mengatasi panas tersebut, fluida pendingin dialirkan masuk melalui inlet dengan variasi laju aliran massa $5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, $10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, dan $15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ pada suhu 30 °C dan keluar melalui outlet (*outflow*). Fluida pendingin bertujuan untuk menyerap panas yang dihasilkan oleh baterai. Dinding (*surface*) kedua plat/*tube* pendingin diatur menjadi *no-slip wall* untuk mempertimbangkan tegangan geser fluida terhadap dinding, dengan *wall thickness* $0,45 \times 10^{-3} \text{ m}$.

3.7 Penentuan *Solver* Simulasi

Setelah *setup* dilakukan, maka selanjutnya dapat menentukan *solver* simulasi untuk memecahkan atau menyelesaikan persamaan-persamaan matematis dari parameter yang telah diinputkan. Model *energy* diaktifkan untuk menangkap perpindahan panas yang terjadi. *Pressure based* dipilih sebagai tipe *solver* untuk aliran inkompresibel dengan model aliran *laminar* dan kondisi waktu *transient*. Skema SIMPLE digunakan sebagai algoritma untuk perhitungan yang dilakukan Ansys Fluent, dengan diskritisasi *second order* untuk *pressure* dan *second order upwind* untuk *momentum*, *turbulent kinetic energy*, *specific dissipation rate*, dan *energy*. Berikutnya diatur *patch*, *time step*, dan *number of time step*, dan kemudian menjalankan simulasi (*running*).

3.8 Hasil Simulasi

Tahap ini merupakan tahap dimana ditampilkannya hasil dari proses iterasi yang telah dilakukan pada Ansys Fluent. Hasil simulasi yang didapat adalah data suhu maksimum modul baterai dan suhu outlet. Selain itu juga didapat kontur distribusi suhu pada modul baterai dan fluida pendingin.

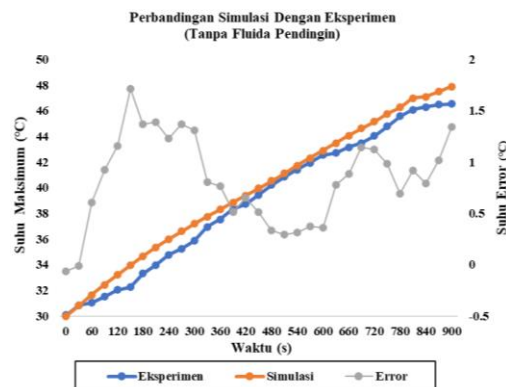
BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Data Awal

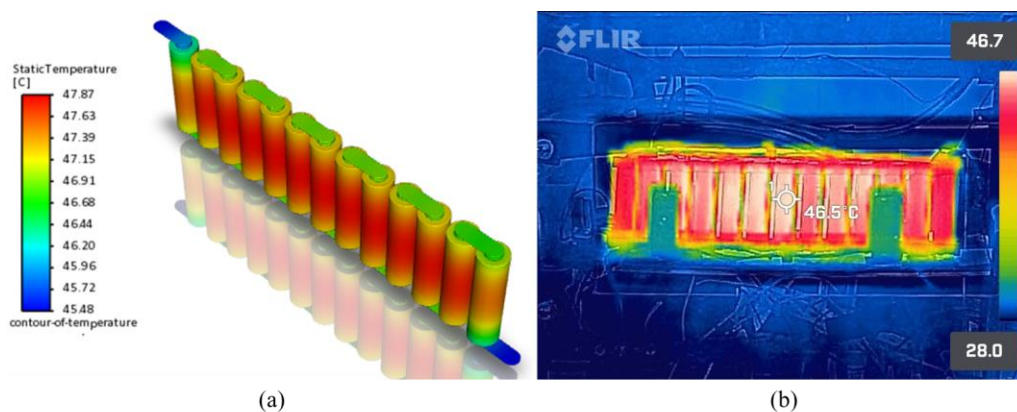
Panas yang dihasilkan modul baterai didinginkan oleh *wavy channel tube* yang menjepit modul baterai tersebut. Laju pendinginan modul baterai dipengaruhi oleh jenis fluida pendingin dan laju aliran yang diterapkan. Pada penelitian ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan tiga jenis fluida pendingin, yaitu air (W), campuran air (W) 60% + etilen glikol (EG) 40%, dan nanofluida berupa nanopartikel *cellulose nanocrystal* (CNC) 0,5% yang disuspensikan dengan campuran air (W) 60% + etilen glikol (EG) 40%. Selain itu, pengaruh laju aliran, menggunakan 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s. Pengaruh suhu awal juga dipertimbangkan, suhu awal aliran masuk dan suhu awal seluruh domain diatur menjadi 30 °C yang diasumsikan sebagai suhu ruang. Keseluruhan simulasi dilakukan untuk proses *discharge* dengan laju *discharge* 4C (detail pada sub bab 2.2).

Hasil simulasi perlu dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk mendapatkan parameter baterai yang sesuai. Dalam penelitian ini, perbandingan dilakukan tanpa menggunakan fluida pendingin. Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan modul baterai tanpa fluida pendingin dari hasil simulasi dengan hasil eksperimen.



Gambar 4.1 Perbandingan Hasil Simulasi Dengan Hasil Eksperimen
Modul Baterai Tanpa Fluida Pendingin

Dari gambar tersebut, suhu modul baterai meningkat seiring dengan waktu secara bertahap. Peningkatan suhu dari hasil simulasi dengan hasil eksperimen dikaitkan. Modul baterai di-*discharge* tanpa fluida pendingin dengan laju *discharge* 4C dan habis dalam waktu 900 s, didapat prediksi yang cocok antara simulasi dengan eksperimen. Suhu maksimum dari hasil simulasi dan eksperimen masing-masing sebesar 47,87 °C dan 46,7 °C dengan persentase *error* 2,44%. Gambar 4.2 menunjukkan kontur distribusi suhu pada modul baterai yang di-*discharge* tanpa fluida pendingin. Dapat diamati bahwa suhu modul baterai terdistribusi merata antar sel dan melebihi kisaran suhu optimal (detail pada sub bab 2.4).



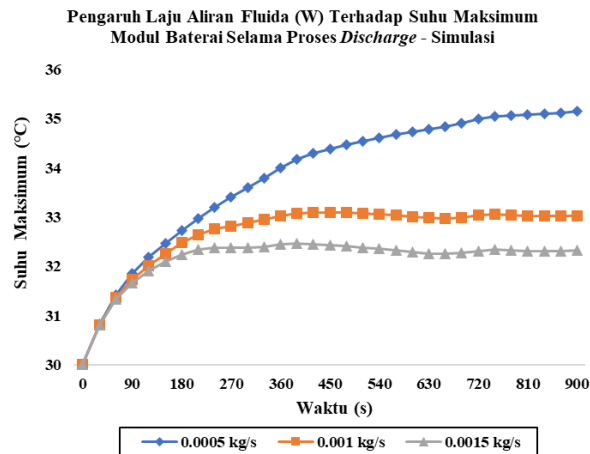
Gambar 4.2 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai (a) Hasil Simulasi & (b) Hasil Eksperimen Tanpa Fluida Pendingin

4.2 Air (W) Sebagai Fluida Pendingin

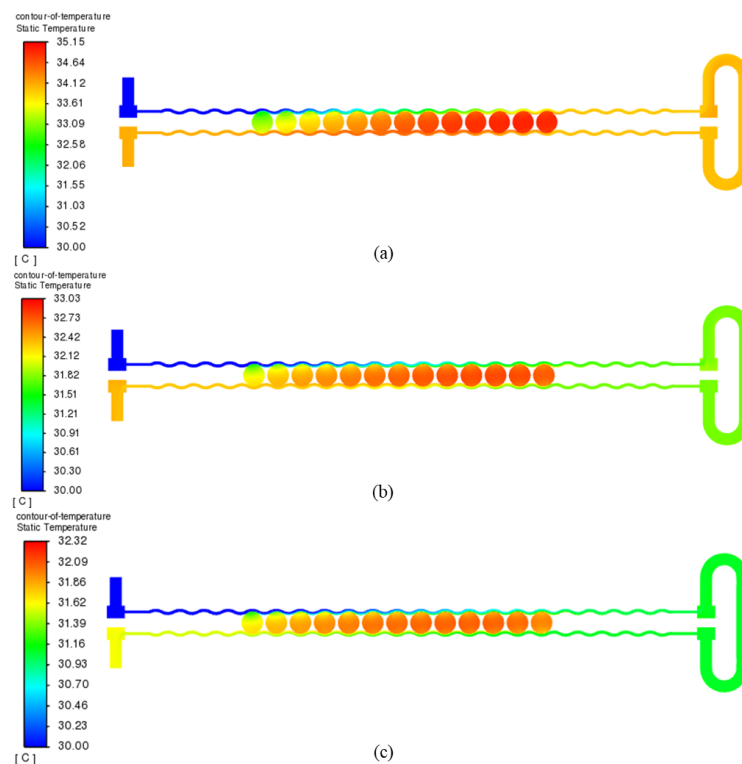
Beberapa simulasi pendinginan baterai dengan menggunakan fluida pendingin telah dilakukan. Pengaruh air sebagai fluida pendingin ditampilkan dengan variasi laju aliran fluida yang berbeda. Modul baterai di-*discharge* dengan laju *discharge* 4C dan didinginkan oleh air dengan variasi laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s. Gambar 4.3 menunjukkan hasil simulasi pengaruh air dalam mendinginkan modul baterai selama proses *discharge*.

Pada gambar 4.3 didapat bahwa penurunan suhu maksimum modul baterai dibandingkan dengan tanpa fluida pendingin mengalami penurunan

12,72 °C pada laju aliran fluida terendah. Modul baterai yang didinginkan dengan air, pada laju aliran fluida 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, masing-masing memiliki nilai suhu maksimum 35,16 °C, 33,03 °C, dan 32,32 °C. Adapun distribusi suhu pada modul baterai dan fluida pendingin ditunjukkan pada Gambar 4.4.

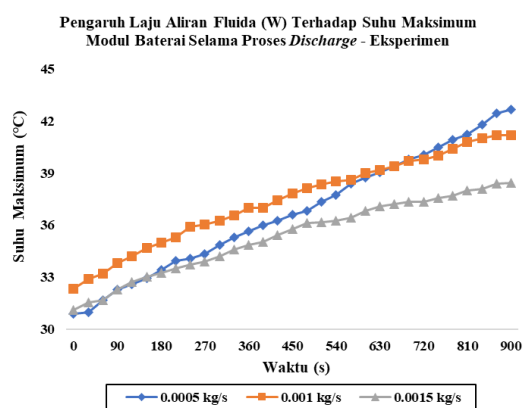


Gambar 4.3 Pengaruh Air (W) Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Simulasi



Gambar 4.4 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai dan Fluida Pendingin Laju Aliran: (a) 5×10^{-4} kg/s, (b) 10×10^{-4} kg/s, (c) 15×10^{-4} kg/s

Uji eksperimen dilakukan untuk mengetahui kinerja alat sistem pendingin baterai yang telah dibuat (Gambar 3.3). Gambar 4.5 menunjukkan hasil eksperimen pengaruh air dalam mendinginkan modul baterai selama proses *discharge*. Dari gambar tersebut didapat penurunan suhu maksimum modul baterai dibandingkan tanpa fluida pendingin mengalami penurunan 3,86 °C pada laju aliran fluida terendah. Pada laju aliran $5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, $10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, dan $15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, masing-masing pengujian dimulai pada suhu 30,8 °C, 32,3 °C, dan 31,1 °C, kemudian meningkat mencapai suhu maksimum berturut-turut 42,6 °C, 41,7 °C, dan 38,43 °C. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran dapat meningkatkan penurunan suhu maksimum modul baterai, dimana sesuai dengan hasil simulasi. Namun, hasil simulasi dan eksperimen air sebagai fluida pendingin berbeda jauh, hal ini disebabkan oleh beberapa faktor yang dijelaskan pada sub bab 4.6.

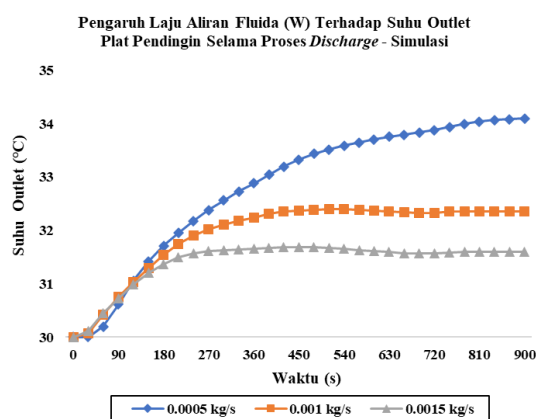


Gambar 4.5 Pengaruh Air (W) Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Eksperimen

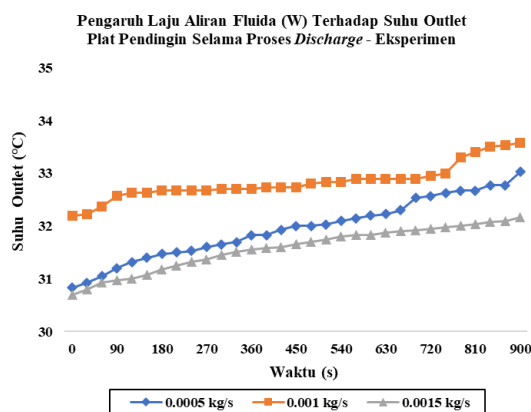
Tren grafik Gambar 4.3 dan Gambar 4.5 menunjukkan kinerja pendingin yang menyerap akumulasi panas modul baterai. Panas yang dihasilkan baterai mulai terakumulasi secara bertahap saat baterai mulai beroperasi. Baterai mulai beroperasi terukur pada detik ke-30, pengaruh dari fluida pendingin air terlihat dari penurunan suhu maksimum modul baterai. Sedangkan pengaruh laju aliran diamati ketika setiap grafik laju aliran fluida mulai terpisah yang membentuk delta suhu, ini dapat dilihat pada Gambar 4.3. Pada detik ke-900 baterai telah habis, delta suhu dapat diamati dan ditemukan bahwa semakin tinggi laju aliran

fluida, semakin berkurang delta suhunya. Penurunan delta ini sesuai dengan referensi pada penelitian Li et al., (2019) dan Sarchami et al., (2022). Namun, hal ini tidak terjadi pada eksperimen (detail pada sub bab 4.6).

Distribusi suhu modul baterai dengan fluida pendingin air ditunjukkan pada Gambar 4.4. Air mengalir di dalam *wavy channel tube* dan menyerap panas yang dihasilkan baterai, sehingga suhu air lebih tinggi pada outlet. Adapun tren peningkatan suhu outlet ditunjukkan pada Gambar 4.6 (hasil simulasi) dan Gambar 4.7 (hasil eksperimen). Dari gambar tersebut menunjukkan, tren suhu outlet eksperimen berbeda dengan hasil simulasi (dijelaskan pada sub bab 4.6). Hasil simulasi menunjukkan nilai suhu maksimum air pada outlet dengan laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, masing-masing adalah 34,1 °C, 32,35 °C, dan 31,6 °C. Sedangkan hasil eksperimen berturut-turut adalah 33,03 °C, 33,57 °C, dan 32,17 °C.



Gambar 4.6 Suhu Outlet Air Selama Proses *Discharge* - Simulasi

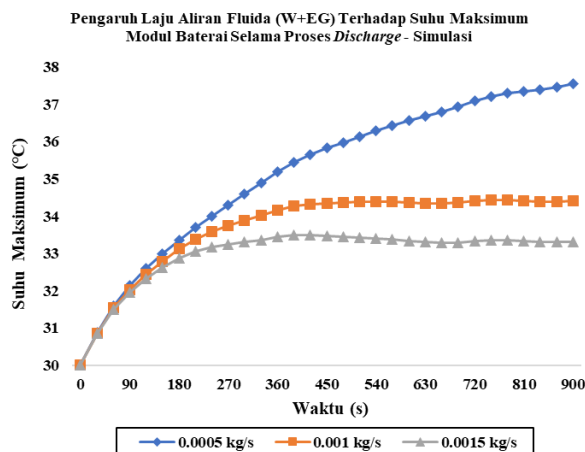


Gambar 4.7 Suhu Outlet Air Selama Proses *Discharge* – Eksperimen

4.3 Air (W) 60% + Etilen Glikol (EG) 40% Sebagai Fluida Pendingin

Fluida W+EG digunakan sebagai basis cairan untuk nanofluida CNC-W+EG. Perannya sebagai fluida pendingin juga dipertimbangkan dalam penelitian ini. Pengaruh pendinginan baterai menggunakan fluida pendingin W+EG ditunjukkan pada Gambar 4.8 (hasil simulasi) dan Gambar 4.9 (hasil eksperimen).

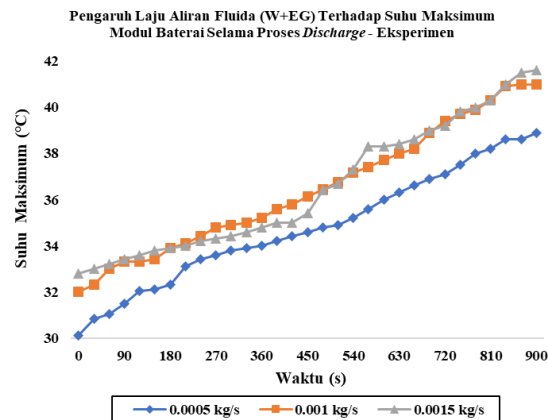
Hasil simulasi menunjukkan penurunan suhu maksimum modul baterai menggunakan fluida pendingin W+EG adalah 10,33 °C pada laju aliran terendah. Hasil ini lebih rendah dari fluida pendingin air untuk mendinginkan modul baterai. Modul baterai yang didinginkan dengan W+EG pada laju aliran fluida 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, masing-masing memiliki nilai suhu maksimum 37,54 °C, 34,4 °C, dan 33,32 °C. Adapun distribusi suhu pada modul baterai dan fluida pendingin ditunjukkan pada Gambar 4.10.



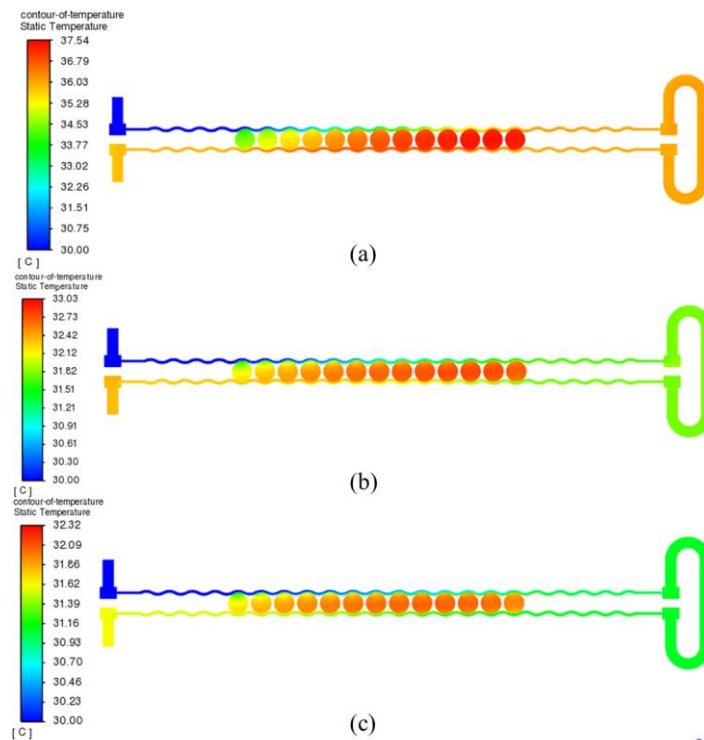
Gambar 4.8 Pengaruh W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Simulasi

Uji eksperimen dilakukan untuk mengetahui kinerja alat sistem pendingin baterai yang telah dibuat (Gambar 3.3). Hasil eksperimen pada Gambar 4.9 menunjukkan pengaruh penggunaan campuran fluida W+EG sebagai fluida pendingin untuk menurunkan suhu modul baterai selama proses *discharge*. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa dengan menggunakan fluida pendingin W+EG terjadi penurunan suhu maksimum modul baterai 7,63

°C pada laju aliran fluida terendah. Pada laju aliran $5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, $10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, dan $15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, masing-masing pengujian dimulai pada suhu 30,1 °C, 32 °C, dan 32,8 °C, kemudian meningkat mencapai suhu maksimum berturut-turut 38,9 °C, 41 °C, dan 41,6 °C. Hasil simulasi dan eksperimen menghasilkan hasil yang sangat berbeda, karena dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dijelaskan dalam sub bab 4.6.



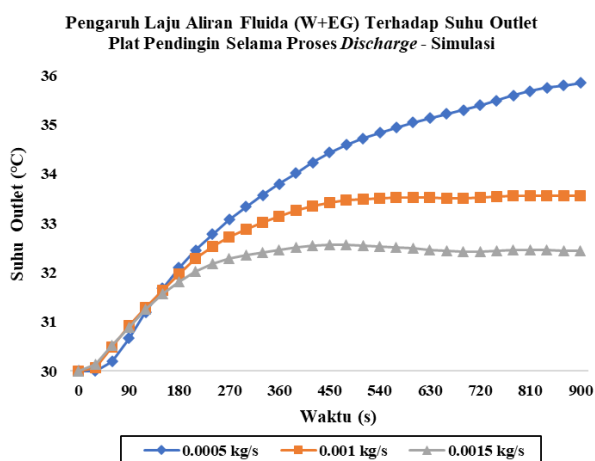
Gambar 4.9 Pengaruh W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Eksperimen



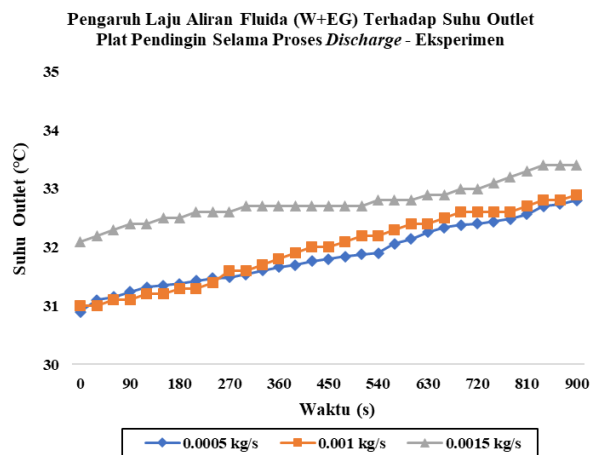
Gambar 4.10 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai dan Fluida Pendingin Laju Aliran: (a) $5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, (b) $10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, (c) $15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$

Tren grafik Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 menunjukkan kinerja pendingin dalam menyerap panas yang terakumulasi dari modul baterai. Modul baterai mulai menghasilkan panas secara bertahap saat baterai mulai beroperasi. Baterai mulai beroperasi terukur pada detik ke-30, pengaruh dari penggunaan W+EG sebagai fluida pendingin dapat diamati dari penurunan suhu maksimum modul baterai. Sedangkan pengaruh laju aliran diamati ketika setiap grafik laju aliran fluida mulai terpisah yang membentuk delta suhu, ini dapat dilihat pada Gambar 4.8. Saat mencapai detik ke-900, kapasitas baterai telah habis dan delta suhu dapat diamati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi laju aliran fluida, semakin kecil delta suhunya. Penurunan delta ini sesuai dengan referensi pada penelitian Li et al., (2019) dan Sarchami et al., (2022). Namun, hal ini tidak terjadi pada eksperimen (detail pada sub bab 4.6).

Pada Gambar 4.10, terlihat distribusi suhu modul baterai yang didinginkan menggunakan fluida pendingin W+EG. Fluida pendingin W+EG mengalir di dalam *wavy channel tube* yang kemudian menyerap panas yang dihasilkan oleh baterai, sehingga suhu fluida W+EG menjadi lebih tinggi saat keluar dari *wavy channel* tersebut. Seperti yang terlihat dalam Gambar 4.11 dan



Gambar 4.11 Suhu Outlet W+EG Selama Proses *Discharge* - Simulasi



Gambar 4.12 Suhu Outlet W+EG Selama Proses *Discharge* - Eksperimen

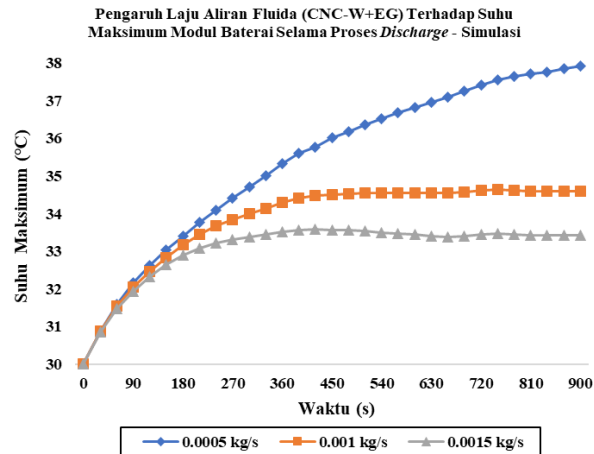
Gambar 4.12, terdapat peningkatan suhu outlet yang terjadi, baik dalam hasil simulasi maupun hasil eksperimen. Dari gambar tersebut menunjukkan, tren suhu outlet eksperimen berbeda dengan hasil simulasi (dijelaskan pada sub bab 4.6). Hasil simulasi menunjukkan nilai suhu maksimum W+EG pada outlet dengan laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, masing-masing adalah 35,84 °C, 33,55 °C, dan 32,44 °C. Sedangkan hasil eksperimen berturut-turut adalah 32,8 °C, 32,9 °C, dan 33,4 °C.

4.4 Nanofluida *Cellulose Nanocrystal* (CNC) – Air (W) + Etilen Glikol (EG) Sebagai Fluida Pendingin

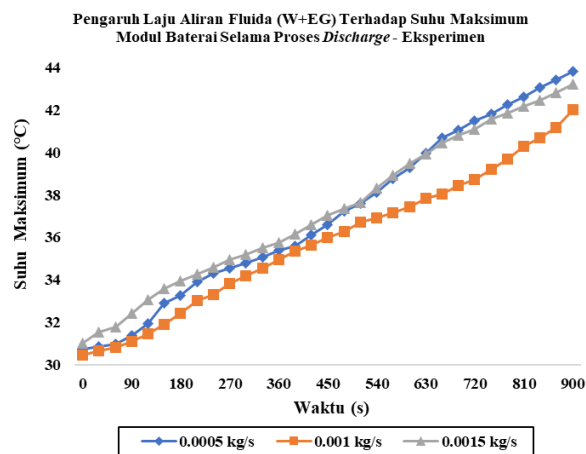
Selain basis cairan W+EG, nanofluida CNC-W+EG juga digunakan untuk mendinginkan baterai. *Properties* yang digunakan untuk merepresentasikan nanofluida tersebut mengacu pada penelitian Farhana et al., (2020). Pengaruh pendinginan baterai menggunakan fluida pendingin CNC-W+EG ditunjukkan pada Gambar 4.13 (hasil simulasi) dan Gambar 4.14 (hasil eksperimen).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketika menggunakan fluida pendingin W+EG, terdapat penurunan suhu maksimum modul baterai sebesar 9,94 °C pada laju aliran terendah. Hasil ini lebih rendah dari fluida pendingin W+EG sebagai basis cairannya untuk mendinginkan baterai. Namun, hasil yang didapat masih berada dalam kisaran suhu optimal baterai (detail pada sub bab 2.4). Pada laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s,

nanofluida ini mampu mengontrol suhu modul baterai, masing-masing pada 37,93 °C, 34,6 °C, dan 33,42 °C. Adapun distribusi suhu pada modul baterai dan fluida pendingin CNC-W+EG ditunjukkan pada Gambar 4.15.



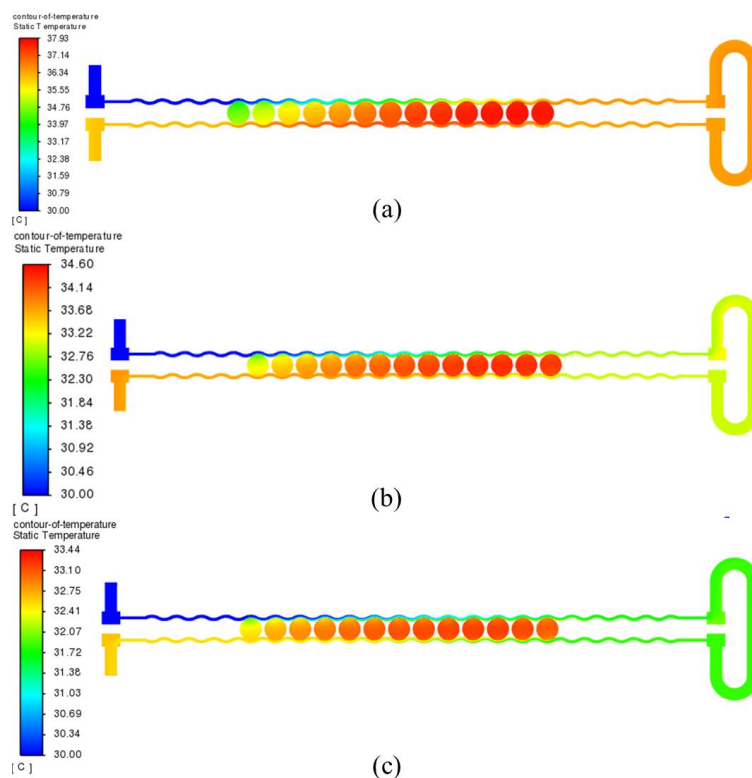
Gambar 4.13 Pengaruh CNC-W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Simulasi



Gambar 4.14 Pengaruh CNC-W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Eksperimen

Uji eksperimen dilakukan untuk mengetahui kinerja alat sistem pendingin baterai yang telah dibuat (Gambar 3.3). Hasil eksperimen pada Gambar 4.9 menunjukkan pengaruh penggunaan fluida pendingin CNC-W+EG untuk mendinginkan modul baterai selama proses *discharge*. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa penggunaan fluida pendingin CNC-W+EG

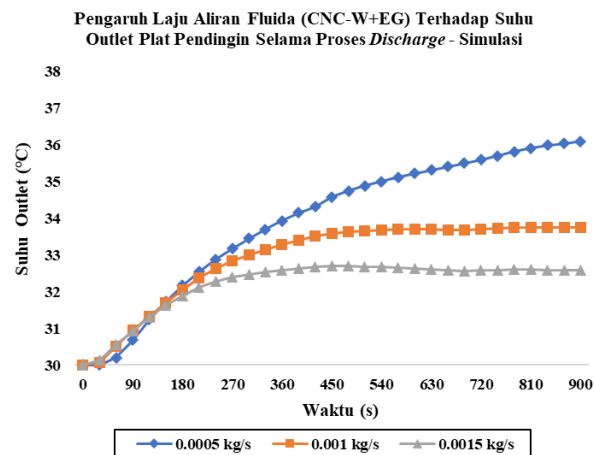
menyebabkan turunnya suhu maksimum modul baterai sebesar $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada laju aliran fluida terendah. Penurunan suhu ini lebih rendah dari fluida pendingin W+EG. Pada laju aliran $5 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$, $10 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$, dan $15 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$, masing-masing pengujian dimulai pada suhu $30,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan $31\text{ }^{\circ}\text{C}$, kemudian meningkat mencapai suhu maksimum berturut-turut $43,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $42\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan $43,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Simulasi dan eksperimen menghasilkan hasil yang sangat berbeda, dikarenakan adanya beberapa faktor yang dijelaskan dalam sub bab 4.6.



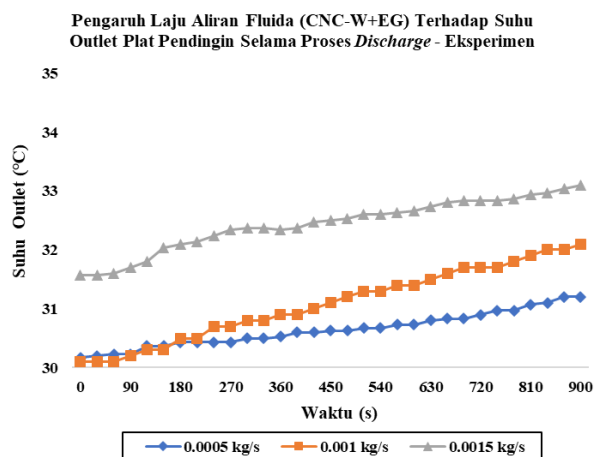
Gambar 4.15 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai dan Fluida Pendingin Laju Aliran (a) $5 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$, (b) $10 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$, (c) $15 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$

Grafik pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 menunjukkan kinerja pendingin dalam menyerap panas yang terakumulasi dari modul baterai. Saat baterai mulai beroperasi, modul baterai secara bertahap akan menghasilkan panas. Baterai mulai beroperasi terukur pada detik ke-30. Pengaruh penggunaan fluida pendingin CNC-W+EG dapat terlihat melalui penurunan suhu maksimum modul baterai. Sedangkan pengaruh laju aliran diamati ketika setiap grafik laju aliran fluida mulai terpisah yang membentuk delta suhu, ini dapat

dilihat pada Gambar 4.13. Saat mencapai detik ke-900, kapasitas baterai telah habis dan delta suhu dapat diamati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin cepat laju aliran fluida, semakin kecil delta suhunya. Penurunan delta ini sesuai dengan referensi pada penelitian Li et al., (2019) dan Sarchami et al., (2022). Namun, hal ini tidak terjadi pada eksperimen (detail pada sub bab 4.6).



Gambar 4.16 Suhu Outlet CNC-W+EG Selama Proses *Discharge* - Simulasi



Gambar 4.17 Suhu Outlet CNC-W+EG Selama Proses *Discharge* - Eksperimen

Pada Gambar 4.15, dapat diamati distribusi suhu pada modul baterai dan fluida pendingin CNC-W+EG. Aliran fluida pendingin CNC-W+EG melewati *wavy channel tube* yang menjepit modul baterai. Fluida pendingin menyerap panas untuk mendinginkan modul baterai, sehingga suhu fluida meningkat dan

keluar dengan suhu yang lebih tinggi. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17, terjadi kenaikan suhu outlet pada hasil simulasi maupun hasil eksperimen. Dari gambar tersebut menunjukkan, grafik suhu outlet eksperimen berbeda dengan hasil simulasi (dijelaskan pada sub bab 4.6). Hasil simulasi menunjukkan nilai suhu maksimum CNC-W+EG pada outlet dengan laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, masing-masing adalah 36,09 °C, 33,74 °C, dan 32,58 °C. Sedangkan hasil eksperimen berturut-turut adalah 31,2 °C, 32,1 °C, dan 33,1 °C.

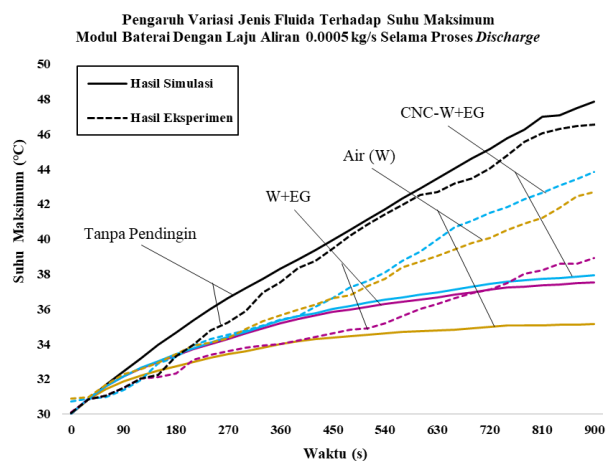
4.5 Pembahasan

Baterai Li-ion menghasilkan panas saat beroperasi karena adanya reaksi elektrokimia di dalam baterai, yaitu pergerakan ion lithium dan elektron (detail pada sub bab 2.3). Seiring waktu baterai beroperasi, panas modul baterai meningkat bertahap hingga suhu tertentu yang dipengaruhi juga pada beban listrik yang disuplai, ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pada gambar tersebut laju *discharge* atau beban ditetapkan menjadi 4C dan ini berlaku untuk keseluruhan simulasi dan eksperimen.

Fluida pendingin yang mengalir di sepanjang *wavy channel tube* berfungsi untuk mengontrol panas yang dihasilkan oleh modul baterai. Variasi laju aliran massa dan jenis fluida dipelajari untuk melihat pengaruhnya dalam penurunan suhu modul baterai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran massa menurunkan suhu maksimum modul baterai dan suhu *outlet*. Hasil ini sejalan dengan referensi dari penelitian Li et al., (2019) dan Sarchami et al., (2022). Namun, dengan semakin tinggi laju aliran yang dibutuhkan, juga berbanding lurus dengan energi yang dibutuhkan untuk mengalirkan fluida pendingin. Ini juga berujung pada *cost* yang lebih besar. Sementara itu, hasil eksperimen tidak menunjukkan pengaruh yang konsisten dari variasi fluida pendingin dan laju aliran fluida yang digunakan terhadap penurunan suhu maksimum modul baterai. Akan tetapi, dengan adanya fluida pendingin terbukti bahwa penurunan suhu maksimum modul baterai terjadi pada eksperimen. Hal ini dikarenakan beberapa faktor yang mempengaruhi hasil eksperimen (dijelaskan pada sub bab 4.6).

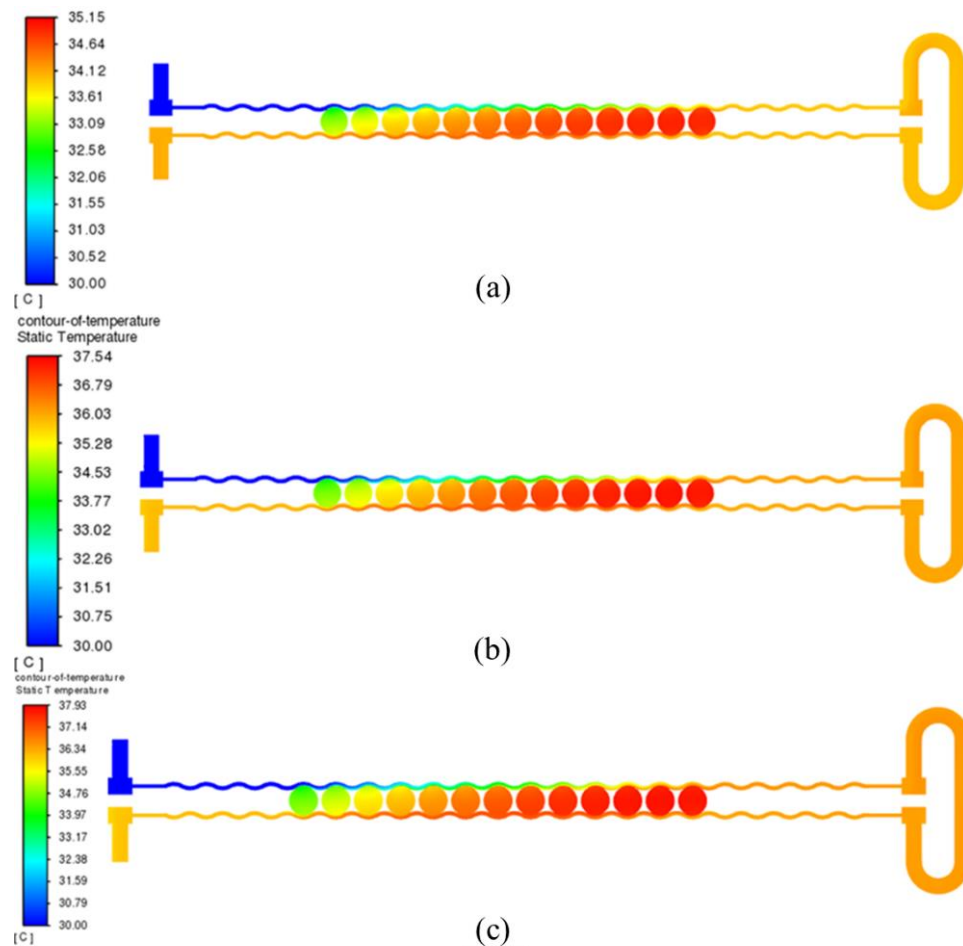
Dengan adanya fluida pendingin, suhu maksimum modul baterai dapat dikontrol agar tidak melebihi kisaran suhu optimal baterai beroperasi (detail pada sub bab 2.4). Gambar 4.18 menunjukkan pengaruh jenis fluida terhadap suhu maksimum modul baterai selama proses *discharge* pada laju aliran 5×10^{-4} kg/s. Berdasarkan gambar tersebut, hasil simulasi menunjukkan bahwa fluida yang digunakan mampu mengontrol suhu maksimum modul baterai tetap dalam kisaran suhu optimal pada laju aliran terendah. Selain itu, dari hasil ini juga diprediksi dengan meningkatkan laju aliran fluida, dapat menurunkan suhu modul baterai dengan lebih efektif. Namun, hasil yang didapat dari eksperimen berbeda dengan hasil simulasi. Hal ini disebabkan karena beberapa faktor yang mempengaruhi eksperimen, sehingga hasil yang didapat kurang relevan dengan hasil simulasi maupun referensi yang ditemukan. Beberapa faktor yang mempengaruhi hasil eksperimen dijelaskan pada sub bab 4.6.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa air menjadi fluida yang mampu mengontrol suhu maksimum modul baterai paling rendah, diikuti dengan W+EG dan CNC-W+EG. Namun, disamping baiknya performa fluida cairan dalam mendinginkan baterai, juga dibutuhkan konstruksi yang lebih rumit dan membutuhkan *cost* yang lebih besar, dibandingkan dengan udara. Hal ini dikarenakan fluida cairan membutuhkan sistem dan media untuk mengalirkannya, seperti pada penelitian tugas akhir ini.



Gambar 4.18 Pengaruh Variasi Jenis Fluida Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Dengan Laju Aliran 5×10^{-4} kg/s Selama Proses *Discharge*

Distribusi suhu pada variasi fluida yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.20. Airan fluida pendingin memasuki *wavy channel tube* melalui inlet dengan suhu 30 °C (berwarna biru). Fluida pendingin mengalir dan menyerap panas dari modul baterai. Panas tersebut dibawa oleh fluida pendingin menuju outlet, sehingga suhu outlet lebih tinggi dari inlet. Dapat diamati bahwa baterai dengan suhu lebih rendah ditemukan pada baterai ke-1 dari inlet, dan diikuti baterai setelahnya dengan suhu yang meningkat. Namun, baterai terjauh dari inlet (baterai ke-13) tidak menjadi yang paling tinggi suhunya. Ini diprediksi karena setelah fluida sirkulasi, fluida menyerap panas baterai tersebut sebagai yang pertama, kemudian diikuti baterai lainnya. Pada fluida pendingin air, W+EG, dan CNC-W+EG, suhu maksimum modul baterai didapat pada baterai ke-12 dari inlet.

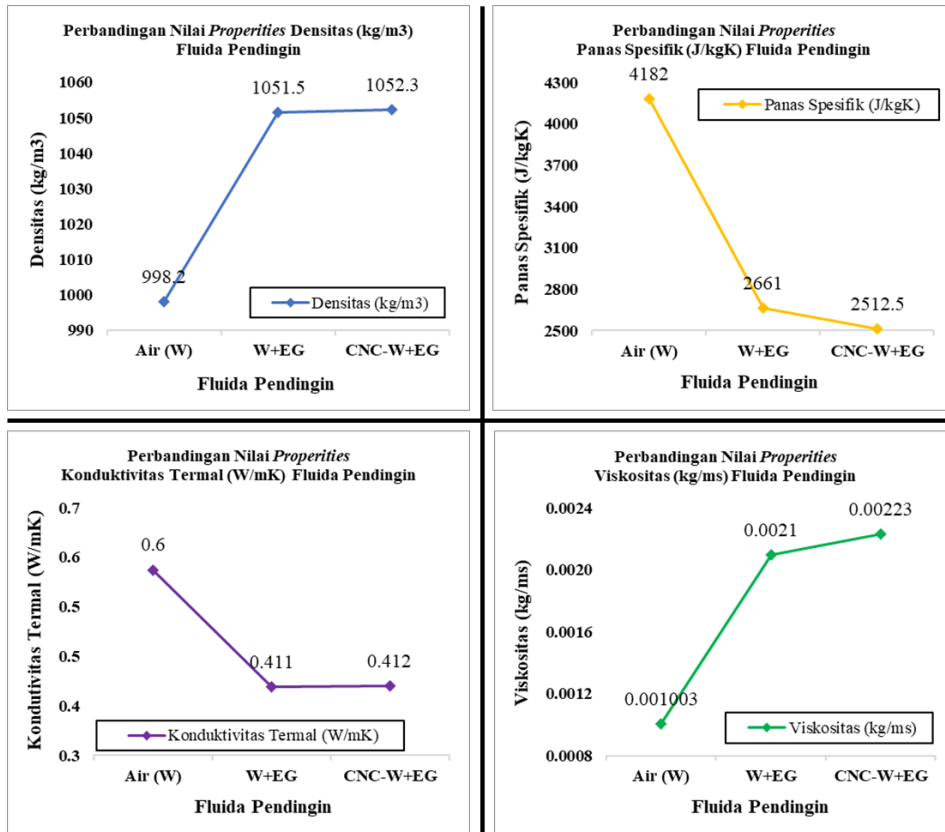


Gambar 4.19 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai Variasi Fluida Pendingin: (a) Air, (b) W+EG, (c) CNC-W+EG

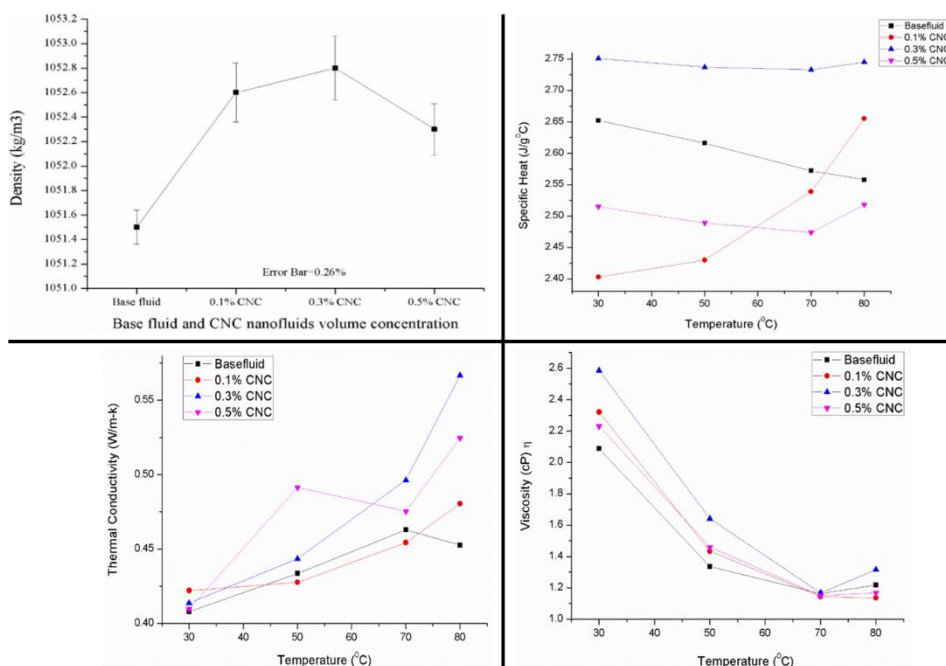
Kinerja fluida terhadap penurunan suhu maksimum baterai bergantung pada kemampuan fluida tersebut dalam menyerap dan membawa panas yang dihasilkan modul baterai. Dalam penelitian ini, hal tersebut direpresentasikan menggunakan *properties* fluida, seperti densitas, panas spesifik, konduktivitas termal, dan viskositas. *Properties* yang paling mempengaruhi dalam memindahkan panas adalah konduktivitas termal dan panas spesifik.

Air sebagai fluida pendingin memiliki densitas dan viskositas yang lebih rendah dibandingkan W+EG dan CNC-W+EG, namun memiliki konduktivitas termal dan panas spesifik yang lebih tinggi (Tabel 3.6). W+EG adalah 60% air yang dicampur dengan 40% etilen glikol sehingga menghasilkan *properties* fluida baru (Tabel 3.7), yang nilainya mengacu pada penelitian Farhana et al. (2020). W+EG memiliki densitas dan viskositas yang lebih tinggi dari air, namun konduktivitas dan panas spesifik lebih rendah. Sedangkan nanofluida CNC-W+EG merupakan nanopartikel *cellulose nanocrystal* (CNC) dengan konsentrasi 0,5% yang disuspensikan menggunakan basis fluida W+EG. Nilai *properties* dari nanofluida ini (Tabel 3.8) juga mengacu pada penelitian Farhana et al. (2020). Hal serupa juga untuk nanofluida ini, densitas dan viskositas lebih tinggi dari air, namun konduktivitas termal dan panas spesifik lebih rendah. Perbandingan nilai *properties* fluida pendingin yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.20. Sedangkan nilai *properties* yang mengacu pada penelitian Farhana et al., (2020) ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Oleh sebab itu, diprediksi nanofluida CNC-W+EG belum menjadi yang paling efektif dalam kasus ini, namun hasil menunjukkan bahwa nanofluida tersebut mampu mengontrol suhu modul baterai pada suhu optimalnya (detail pada sub bab 2.4). Setiap fluida mempunyai keunggulan dan kekurangannya bergantung pada kebutuhan dan penggunaannya. Dalam penelitian Samylingam et al. (2018), nanofluida CNC-W+EG digunakan sebagai cairan pendingin untuk proses pemesinan bubut dan terbukti efisien mentransfer panas yang dihasilkan pada alat potong sehingga umur alat potong meningkat signifikan dan menjadi cairan pendingin yang lebih unggul dibandingkan variasi yang lain.



Gambar 4.20 Perbandingan Nilai *Properties* Fluida Pendingin



Gambar 4.21 Perbandingan Nilai *Properties* W+EG (*Basefluid*) dan CNC-W+EG (0.5% CNC) Mengacu Pada Penelitian Farhana et al., (2020)
(Sumber: Farhana et al., 2020)

4.6 Faktor Kesalahan Eksperimen

Pengaruh fluida pendingin dan laju aliran dalam menurunkan suhu maksimum modul baterai dipelajari dengan melakukan simulasi komputasi numerik dan eksperimen. Simulasi dilakukan menggunakan Ansys Fluent dengan menginputkan parameter yang akan dilakukan pengujian eksperimen. Sedangkan eksperimen dilakukan menggunakan alat pendinginan baterai yang telah dibuat, ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dalam upaya meminimalkan *error*, validasi data awal dilakukan tanpa menggunakan fluida pendingin, yaitu membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen, ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hal ini dilakukan untuk menghindari pengaruh lain yang dapat mempengaruhi hasil eksperimen. Dengan hasil tersebut, seluruh simulasi dan eksperimen dilakukan dengan menggunakan fluida pendingin.

Setelah seluruh simulasi dan eksperimen dilakukan, hasil simulasi dan hasil eksperimen dibandingkan. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada sub bab 4.2 (air sebagai fluida pendingin), sub bab 4.3 (W+EG sebagai fluida pendingin), dan sub bab 4.3 (CNC-W+EG sebagai fluida pendingin). Didapat perbedaan yang jauh antara hasil simulasi dan hasil eksperimen. Hasil simulasi sudah menunjukkan hasil yang sejalan dengan referensi lainnya tentang pendinginan baterai, namun hasil eksperimen tidak menunjukkan hal tersebut. Ada beberapa faktor kesalahan dalam eksperimen yang menyebabkan hasil yang didapat tidak relevan. Sehingga menghasilkan terbentuknya grafik seperti pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.7 (air sebagai fluida pendingin), Gambar 4.9 dan Gambar 4.12 (W+EG sebagai fluida pendingin), serta Gambar 4.14 dan Gambar 4.17 (CNC-W+EG sebagai fluida pendingin). Beberapa faktor kesalahan eksperimen tersebut diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Penggunaan Pompa

Pompa digunakan untuk mengalirkan fluida pendingin pada alat eksperimen pendinginan modul baterai. Gambar 3.2 menunjukkan skematik dari alat eksperimen tersebut. Pompa yang digunakan adalah jenis pompa celup atau rendam. Pompa ini ditempatkan di dalam tangki fluida pendingin dan *coolant* radiator, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.22. Pompa menghasilkan panas ketika beroperasi. Akibatnya, fluida pendingin dan

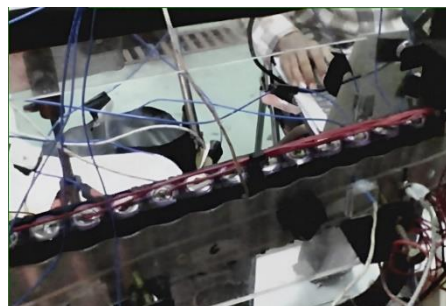
coolant di dalam tangki juga mengalami pemanasan, sehingga suhu fluida pendingin dan *coolant* meningkat. Ini menyebabkan fluida pendingin tidak optimal dalam mendinginkan modul baterai. Selain itu, *coolant* juga menjadi tidak optimal mendinginkan fluida pendingin di dalam radiator.



Gambar 4.22 Penggunaan Pompa Pada Alat Eksperimen Pendinginan Modul Baterai

2. Geometri dan Pemasangan *Wavy Channel Tube*

Wavy channel tube yang terpasang pada modul baterai ditunjukkan pada Gambar 4.23. Geometri dan pemasangan *wavy channel tube* dapat mempengaruhi penyerapan panas modul baterai. *Wavy channel tube* harus dipasang dengan menjepit modul baterai. Selain itu, juga dipastikan permukaan modul baterai dan permukaan *wavy channel tube* saling kontak atau menyentuh. Namun, saat menjepit terdapat celah antara permukaan *wavy channel tube* dan modul baterai. Hal ini dikarenakan geometri *wavy channel* kurang cocok dengan tipe baterai yang digunakan dan konfigurasi penjepit pada alat eksperimen perlu dioptimalkan.



Gambar 4.23 *Wavy Channel Tube* Pada Modul Baterai

3. Suhu Ruang

Kondisi suhu awal eksperimen mengikuti suhu ruang dimana pengujian eksperimen dilakukan. Hal ini menyebabkan grafik hasil eksperimen yang terbentuk berawal dengan suhu yang berbeda. Selain itu, peningkatan suhu maksimum modul baterai relatif lebih cepat, sehingga penyerapan panas dengan fluida pendingin relatif lebih lambat.

4. Pengukuran Suhu

Suhu modul baterai diukur dengan FLIR (*Forward Looking Infrared*). FLIR dapat mengukur suhu rendah dan suhu tinggi pada suatu objek yang ditampilkan pada *display*. Pengukuran dilakukan dengan cara menghadapkan FLIR ke arah objek yang akan diukur. Pada saat pengujian, pengukuran dilakukan tiap 30 detik dan tidak diambil pada posisi yang sama, sehingga flir membutuhkan waktu untuk kalibrasi dan tidak selalu terpantau perubahan suhu modul baterai.

5. Konfigurasi Radiator

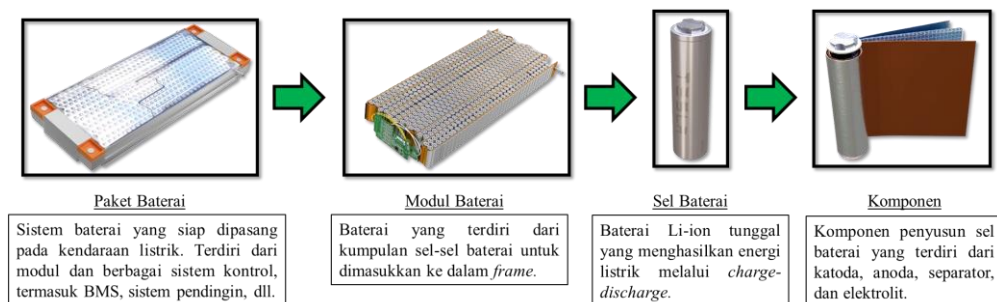
Radiator digunakan untuk mendinginkan fluida pendingin yang keluar dari outlet *wavy channel tube* dengan membawa panas modul baterai, kemudian mengalir di dalam radiator. Di dalam radiator mengalir fluida keluaran *wavy channel* dengan suhu lebih tinggi dan *coolant* dengan suhu yang lebih rendah. *Coolant* tersebut mendinginkan fluida untuk kemudian ditampung kembali di dalam tangki fluida pendingin. Radiator yang digunakan pada alat eksperimen pendinginan modul baterai ditunjukkan pada Gambar 4.24. Pada radiator tersebut hanya terjadi dua kali sirkulasi, dan diprediksi kurang sehingga dibutuhkan lebih banyak sirkulasi untuk mendinginkan fluida.



Gambar 4.24 Radiator Pada Alat Eksperimen Pendinginan Modul Baterai

4.7 Pengaruh Efektivitas Pendingin Terhadap Kinerja Baterai

Sistem baterai terdiri dari kumpulan sel-sel baterai yang terhubung dalam kombinasi seri dan paralel untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan. Sel-sel tersebut disusun sebagai modul yang dapat dilepas pasang, ditunjukkan pada Gambar 4.25. Setiap sel baterai silinder memiliki voltase 3 – 4,2 V. Jumlah sel silinder untuk kendaraan listrik sangat bervariasi, dalam *nationalgrid.com* umumnya sekitar lebih dari 2000 sel baterai Li-ion.



Gambar 4.25 Paket Baterai Ke Komponen Individual

Pengaturan suhu yang tepat pada baterai kendaraan listrik sangat penting untuk menjaga kinerja dan daya tahan baterai. Reaksi elektrokimia di dalam baterai sangat dipengaruhi oleh perubahan suhu. Dalam kondisi pengoperasian, suhu optimal baterai berkisar antara 20 °C hingga 40 °C. Pada suhu yang rendah, gerakan ion di dalam elektrolit baterai melambat. Kelambatan tersebut menghambat kapasitas baterai untuk menghasilkan daya dan energi secara maksimal, sehingga menyebabkan kinerja dan penurunan efisiensi secara keseluruhan. Untuk mengatasi hal tersebut, pada wilayah dingin, sistem manajemen termal baterai tidak hanya menggunakan pendingin baterai, elemen pemanas juga digunakan untuk meningkatkan suhu baterai. Di sisi lain, suhu tinggi berdampak buruk pada kinerja dan masa pakai baterai. Peningkatan suhu yang tinggi mempercepat laju reaksi elektrokimia di dalam sel baterai, hal ini dapat mempercepat degradasi elektroda dan elektrolit. Seiring waktu, degradasi tersebut akan mengurangi kapasitas baterai sehingga memperpendek masa pakai baterai. Selain itu, suhu tinggi dapat menyebabkan pertumbuhan dendrit internal, yaitu struktur logam konduktif kecil yang dapat

menyebabkan korsleting baterai. Fenomena *thermal runaway* juga dapat terjadi pada suhu baterai yang lebih tinggi dan tidak terkontrol berkisar antara 70 °C hingga 100 °C yang dapat menyebabkan kerusakan baterai, atau bahkan kebakaran dan ledakan.

Kendaraan listrik memerlukan sistem pendingin yang efektif untuk memastikan kinerja, masa pakai, dan keamanan baterai yang optimal. Sistem pendingin mengontrol suhu baterai untuk mencegah modul baterai terlalu panas selama pengoperasian. Suhu baterai diluar kisaran optimal, dapat menyebabkan penurunan kapasitas, efisiensi, dan masa pakai baterai secara keseluruhan. Sistem pendingin yang efektif memastikan kinerja yang konsisten, terutama ketika terdapat beban berat seperti kecepatan tinggi atau pada jalan menanjak. Selain itu, pendinginan yang efektif membantu menghilangkan panas berlebih yang dapat memungkinkan proses *charging* lebih cepat dan aman. Masa pakai baterai ditunjukkan dengan jumlah siklus *charge-discharge* yang mampu dicapai baterai. Sistem pendingin yang efektif berfungsi untuk mempertahankan kondisi baterai tetap optimal, dalam *evexpert.com* biasanya baterai akan bertahan 1000 – 1500 siklus dengan sistem pendingin yang baik.

Dalam kasus penelitian ini, modul baterai yang digunakan hanya terdiri dari 13S1P (13 Seri dan 1 Paralel) sel baterai yang menghasilkan 54 V. Jumlah sel baterai yang digunakan masih belum merepresentasikan modul baterai untuk kendaraan listrik. Namun, dapat digunakan untuk menyelidiki fluida pendingin yang ditetapkan pada penelitian ini. Hal ini dapat dilihat dari pengaruh masing-masing fluida pendingin terhadap penurunan suhu maksimum modul baterai (sub bab 4.2, 4.3, dan 4.4). Fluida pendingin air (W) menjadi yang paling efektif, dibandingkan fluida pendingin W+EG dan CNC-W+EG. Di sisi lain, jika yang digunakan modul baterai yang sebenarnya dari kendaraan listrik, maka panas yang dihasilkan baterai menjadi lebih tinggi. W+EG sebagai fluida pendingin dan basis fluida dari CNC memiliki titik uap yang lebih tinggi dari pada air (W) sehingga dapat menyerap panas pada suhu yang lebih tinggi tanpa mendidih. Selain itu, titik beku W+EG juga jauh lebih rendah dari air (W) sehingga dapat digunakan pada wilayah atau daerah yang dingin tanpa membeku.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan, diantaranya sebagai berikut.

1. Berdasarkan percobaan simulasi yang telah dilakukan, didapat bahwa peningkatan suhu modul baterai tanpa menggunakan fluida pendingin diprediksi cocok dengan hasil eksperimen. Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen, suhu maksimum yang dicapai oleh modul baterai adalah 47,87 °C dan 46,7 °C, dengan persentase *error* 2,44%. Dengan hasil validasi ini, seluruh simulasi dengan menggunakan fluida pendingin dilakukan.
2. Penurunan suhu maksimum modul baterai yang diperoleh dengan menggunakan fluida pendingin CNC-W+EG adalah 9,94 °C untuk hasil simulasi dan 2,7 °C untuk hasil eksperimen, pada laju aliran fluida terendah. Pada laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, hasil simulasi menunjukkan bahwa nanofluida ini mampu menjaga suhu modul baterai pada suhu optimal. Suhu modul baterai pada masing-masing laju aliran fluida tersebut adalah 37,93 °C, 34,6 °C, dan 33,42 °C, dengan suhu outlet 36,09 °C, 33,74 °C, dan 32,58 °C. Sedangkan hasil eksperimen dengan laju aliran tersebut menunjukkan suhu modul baterai berturut-turut 43,8 °C, 42 °C, dan 43,2 °C, dengan suhu outlet 31,2 °C, 32,1 °C, dan 33,1 °C.
3. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, ditemukan bahwa meningkatkan laju aliran massa dapat menurunkan suhu maksimum modul baterai dan suhu pada outlet. Ini karena fluida semakin cepat membawa panas keluar. Tetapi, semakin besar aliran fluida pendingin yang diperlukan, dibutuhkan semakin banyak pula energi untuk mengalirkan fluida tersebut. Hal ini juga menyebabkan *cost* yang lebih tinggi.
4. Hasil simulasi dan eksperimen menggunakan fluida pendingin memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan adanya *error* pada eksperimen ketika menggunakan fluida pendingin. *Error* eksperimen

disebabkan karena *setup* eksperimen yang masih perlu dievaluasi, seperti pompa yang digunakan, geometri dan *wavy channel tube* yang disesuaikan dengan modul baterai, suhu awal eksperimen, pengukuran suhu yang dilakukan, dan konfigurasi radiator yang perlu ditingkatkan.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat penulis berikan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut.

1. Dapat melakukan percobaan variasi jumlah *mesh* atau yang dikenal dengan *grid independent test* untuk mengetahui resolusi *mesh* yang sesuai.
2. Dapat melakukan pengujian *hybrid pulse power characterization* (hppc) sel baterai dengan ketelitian yang memadai dan meminimalkan *error* untuk mendapatkan parameter baterai yang lebih sesuai.
3. Dapat menambahkan rangkaian baterai lebih banyak sehingga dapat merepresentasikan modul baterai pada kendaraan listrik.
4. Dapat mengevaluasi dan meminimalkan kesalahan sehingga diperoleh hasil yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelkareem, M. A., Maghrabie, H. M., Abo-Khalil, A. G., Adhari, O. H. K., Sayed, E. T., Radwan, A., & Olabi, A. G. (2022). Battery thermal management systems based on nanofluids for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, *50*, 104385.
- Alsharif, K. I., Pesch, A. H., Borra, V., Cortes, P., MacDonald, E., Li, F. X., & Choo, K. (2023). Transient Thermal and Electrical Characteristics of a Cylindrical LiFeS₂ Cell with Equivalent Circuit Model. *arXiv preprint arXiv:2311.02095*.
- Belt, J. R. (2010). *Battery test manual for plug-in hybrid electric vehicles* (No. INL/EXT-07-12536). Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States).
- Canonsburg, A. D. (2015). ANSYS Fluent Advanced Add-On Modules. *vol*, *15317*, 724-746.
- Chen, M., & Rincon-Mora, G. A. (2006). Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and IV performance. *IEEE transactions on energy conversion*, *21*(2), 504-511.
- Choi, S. U., & Eastman, J. A. (1995). *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles* (No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29). Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States).
- Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, *3*(5), 385-418.
- Evarts, E. C. (2015). Lithium batteries: To the limits of lithium. *Nature*, *526*(7575), S93-S95.
- Farhana, K., Kadirgama, K., Ramasamy, D., Samykano, M., & Najafi, G. (2020). Experimental Studies on Thermo-Physical Properties of Nanocellulose–Aqueous Ethylene Glycol Nanofluids. *Journal of Advanced Research in Materials Science*, *69*(1), 1-15.
- Goodenough, J. B. (2018). How we made the Li-ion rechargeable battery. *Nature Electronics*, *1*(3), 204-204.

- Gu, H. (1983). Mathematical analysis of a Zn/NiOOH cell. *Journal of the Electrochemical Society*, 130(7), 1459.
- Hasan, H. A., Togun, H., Abed, A. M., Qasem, N. A., Abderrahmane, A., Guedri, K., & Eldin, S. M. (2023). Numerical investigation on cooling cylindrical lithium-ion-battery by using different types of nanofluids in an innovative cooling system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 103097.
- Kakac, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2012). *Heat exchangers: selection, rating, and thermal design*. CRC press.
- Killiny, R. (2019). Lithium ion battery. *lithiumbatterychina.com*.
- Kim, G. H., Smith, K., Lee, K. J., Santhanagopalan, S., & Pesaran, A. (2011). Multi-domain modeling of lithium-ion batteries encompassing multi-physics in varied length scales. *Journal of the electrochemical society*, 158(8), A955.
- Kim, U. S., Shin, C. B., & Kim, C. S. (2008). Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources*, 180(2), 909-916.
- Koniak, M., & Czerepicki, A. (2017, June). Selection of the battery pack parameters for an electric vehicle based on performance requirements. In *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 211, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
- Kurniawan, A. (2020). Analisis Laju Perpindahan Panas pada Baterai Ion Lithium 18650 terhadap Beban Keluarannya dengan Metode Numerik. *Journal of Mechanical Design and Testing*, 2(2), 87-102.
- Lesics Indonesian. (2019, Juli 3). Baterai Li-ion, Bagaimana cara kerjanya? [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=EH8ztg-8SuY>.
- Li, C., Zhang, H., Zhang, R., Lin, Y., & Fang, H. (2021). On the characteristics analysis and tab design of an 18650 type cylindrical LiFePO4 battery. *Applied Thermal Engineering*, 182, 116144.
- Li, Y., Zhou, Z., & Wu, W. T. (2019). Three-dimensional thermal modeling of Li-ion battery cell and 50 V Li-ion battery pack cooled by mini-channel cold plate. *Applied Thermal Engineering*, 147, 829-840.

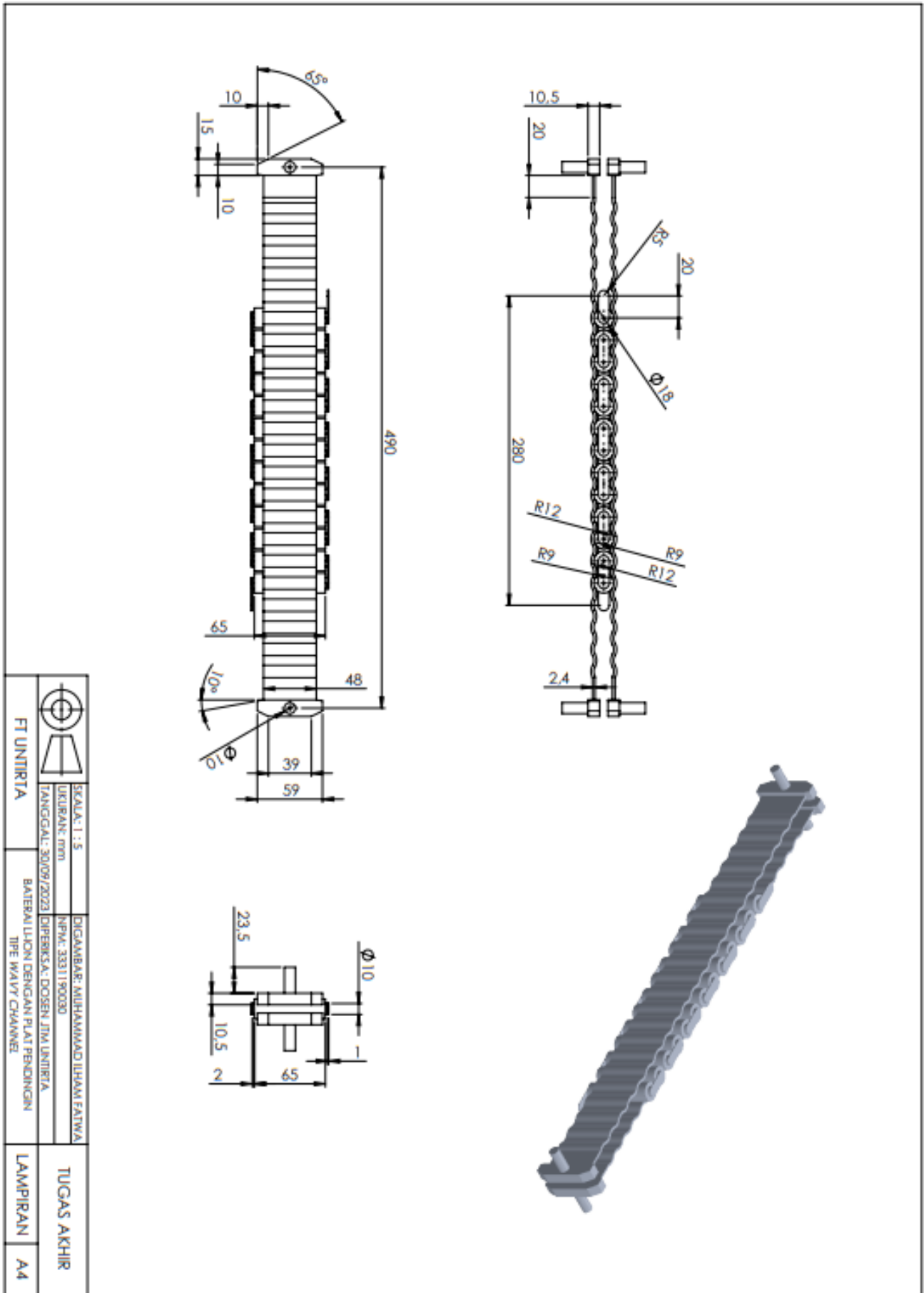
- Liaw, B. Y., Nagasubramanian, G., Jungst, R. G., & Doughty, D. H. (2004). Modeling of lithium ion cells—A simple equivalent-circuit model approach. *Solid state ionics*, 175(1-4), 835-839.
- Lin, X., & Zhang, X. (2021). Research progress of phase change storage material on power battery thermal management. *Energy Technology*, 9(4), 2000940.
- M.Y. Pour. (2015). Electro-thermal modeling of lithium-ion batteries, Doctor of Philosophy Thesis, Simon Fraser University.
- Ma, S., Jiang, M., Tao, P., Song, C., Wu, J., Wang, J., & Shang, W. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. *Progress in Natural Science: Materials International*, 28(6), 653-666.
- Malik, M., Dincer, I., Rosen, M., & Fowler, M. (2017). Experimental investigation of a new passive thermal management system for a Li-ion battery pack using phase change composite material. *Electrochimica Acta*, 257, 345-355.
- Newman, J., & Tiedemann, W. (1993). Potential and Current Distribution in Electrochemical Cells: Interpretation of the Half-Cell Voltage Measurements as a Function of Reference-Electrode Location. *Journal of The Electrochemical Society*, 140(7), 1961.
- Padalkar, A. B., Chaudhari, M. B., & Funde, A. M. (2023). Computational investigation for reduction in auxiliary energy consumption with different cell spacing in battery pack. *Journal of Energy Storage*, 65, 107265.
- Petzl, M., Kasper, M., & Danzer, M. A. (2015). Lithium plating in a commercial lithium-ion battery—A low-temperature aging study. *Journal of power sources*, 275, 799-807.
- Roe, C., Feng, X., White, G., Li, R., Wang, H., Rui, X., ... & Wu, B. (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries—A review. *Journal of Power Sources*, 525, 231094.
- Samyalingam, L., Anamalai, K., Kadirgama, K., Samykano, M., Ramasamy, D., Noor, M. M., & Sidik, N. A. C. (2018). Thermal analysis of cellulose nanocrystal-ethylene glycol nanofluid coolant. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 173-181.

- Sarchami, A., Tousi, M., Kiani, M., Arshadi, A., Najafi, M., Darab, M., & Houshfar, E. (2022). A novel nanofluid cooling system for modular lithium-ion battery thermal management based on wavy/stair channels. *International Journal of Thermal Sciences*, 182, 107823.
- Schmidt, A., Oehler, D., Weber, A., Wetzel, T., & Ivers-Tiffée, E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 393, 139046.
- Schumm, B. (2023). *Battery*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/technology/battery-electronics>.
- Shichun, Y., Sida, Z., Xinan, Z., Yu, L., Xinhua, L., Yang, H., ... & Panpan, H. (2022). All-climate state-of-charge estimation and equilibrium management for lithium-ion batteries based on diffusion equivalent model. *Journal of Energy Storage*, 52, 104700.
- Tarascon, J. M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *nature*, 414(6861), 359-367.
- Thanagasundram, S., Arunachala, R., Makinejad, K., Teutsch, T., & Jossen, A. (2012, November). A cell level model for battery simulation. In *European Electric Vehicle Congress* (pp. 1-13).
- Wang, Y., Gao, Q., Wang, G., Lu, P., Zhao, M., & Bao, W. (2018). A review on research status and key technologies of battery thermal management and its enhanced safety. *International Journal of Energy Research*, 42(13), 4008-4033.
- Wibowo, A. (2019). *Perancangan Sistem Pendingin Baterai Lithium-Ion Pada Mobil Listrik FSAE Menggunakan Metode Vapor-Compression Cooling* (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- Widyantara, R. D., Zulaikah, S., Juangsa, F. B., Budiman, B. A., & Aziz, M. (2022). Review on battery packing design strategies for superior thermal management in electric vehicles. *Batteries*, 8(12), 287.
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy conversion and management*, 182, 262-281.

- Xiong, R., He, H., Guo, H., & Ding, Y. (2011). Modeling for lithium-ion battery used in electric vehicles. *Procedia Engineering*, 15, 2869-2874.
- Yacoub Al Shdaifat, M., Zulkifli, R., Sopian, K., & Adel Salih, A. (2023). Basics, properties, and thermal issues of EV battery and battery thermal management systems: Comprehensive review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 237(2-3), 295-311.
- Zhang, H., Li, C., Zhang, R., Lin, Y., & Fang, H. (2020). Thermal analysis of a 6s4p Lithium-ion battery pack cooled by cold plates based on a multi-domain modeling framework. *Applied Thermal Engineering*, 173, 115216.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Gambar Modul Baterai Li-Ion Dengan *Wavy Channel Tube*



Lampiran 2. Data Spesifikasi Pembelian Baterai Lithium-Ion

<https://shope.ee/LKiw2W609>



Spesifikasi

Stok, Masa Garansi, J... >

Deskripsi

Toko : KROYO SHOP

Tipe Baterai : 18650

Seri : Li-ion

Daya : 3000mAh

Voltase : 3.7volt

Warna : UNGU

Isi : 4 Pics Baterai

Jenis : Rata/ Flattop

Panjang ; 6.5cm

Lebar : 1.8cm

Harga Untuk 4 pcs Baterai

Bisa di isi Ulang

Produk di jamin 100% baru

Biasa di pakai untuk .MIC WIRELES, POWER BANK, VAPE, DLL

PERHATIAN..

Sebelum pemesanan Harap samakan tipe beterei dengan perangkat yang anda miliki, dan kami tidak menerima komplain atas kesalahan pesanan dari costamer sendiri
Bila ada kesalahan pengiriman produk,atau kekurangan quantity Silahkan chat admin kita ,dan kami tidak akan menerima komplain jika telah memberi bintang1 dan penilaian buruk di ulasan
Dan Wajib di ikut sertakan vidio unboxing / vidio paket pas penerimaan barang dari kurir
terima kasih

Untuk produk sendiri di jamin 100% real picr dan ready akan stock,

Dan untuk produk yang akan di kirim kami selalu melakukan pengecekan

dan memastikan produk sudah berfungsi dengan baik

Lampiran 3. Perhitungan Persentase *Error*

Perhitungan persentase *error* dari hasil simulasi dilakukan dengan membandingkannya terhadap hasil eksperimen. Persentase *error* ini hanya dihitung pada modul baterai tanpa fluida pendingin untuk mengetahui parameter baterai yang digunakan sesuai.

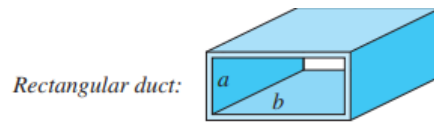
$$\begin{aligned}\% \text{ Error} &= \frac{\text{Hasil Eksperimen} - \text{Hasil Simulasi}}{\text{Hasil Eksperimen}} \times 100\% \\ &= \frac{47,87 \text{ }^\circ\text{C} - 46,7 \text{ }^\circ\text{C}}{47,87 \text{ }^\circ\text{C}} \times 100\% \\ &= 2,44\%\end{aligned}$$

Lampiran 4. Perhitungan Bilangan Reynolds

Bergantung pada kondisi alirannya, aliran dalam *tube* dapat bersifat laminar atau turbulen. Sebagian besar kondisi praktis, aliran dalam *tube* bersifat laminar untuk $Re < 2300$, transisi $2300 < Re < 4000$, dan turbulen > 4000 . (Cengel & Ghajar, 2015). Berikut persamaan dalam mencari bilangan Re:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Dalam model simulasi, *duct* dari fluida berupa *wavy channel* dengan tipe *rectangular duct*, maka nilai D didapat dari *hydraulic diameter* (D_h). Nilai D_h pada *rectangular duct*, didapat dengan persamaan:



$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b}$$

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2(0,0015)(0,049)}{(0,0015 + 0,049)} = 0,0029 \text{ m}$$

Pada persamaan Re dibutuhkan kecepatan fluida (v), maka laju aliran massa $5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, $10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, dan $15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ diubah menjadi kecepatan fluida (v). Persamaan untuk mengubah laju aliran massa menjadi kecepatan adalah:

$$Q = \frac{V}{t} = A \cdot v \rightarrow V = A \cdot v \cdot t \quad ; \quad \rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho}$$

$$\frac{m}{\rho} = A \cdot v \cdot t \rightarrow \frac{m}{t} = A \cdot v \cdot \rho \rightarrow \dot{m} = A \cdot v \cdot \rho \rightarrow \dot{m} = a \cdot b \cdot v \cdot \rho$$

$$v = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot \rho}$$

A. Air

- Laju aliran massa $5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$

$$v = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot \rho} = \frac{5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{(0,0015 \text{ m}) \cdot (0,049 \text{ m}) \cdot (998,2 \text{ kg/m}^3)} = 0,0068 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{(998,2 \text{ kg/m}^3) \cdot (0,0068 \text{ m/s}) \cdot (0,0029 \text{ m})}{0,001003 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}}$$

$$Re = 19,62 \text{ (Laminar)}$$

- Laju aliran massa 10×10^{-4} kg/s

$$v = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot \rho} = \frac{10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{(0,0015 \text{ m}) \cdot (0,049 \text{ m}) \cdot (998,2 \text{ kg/m}^3)} = 0,0136 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{(998,2 \text{ kg/m}^3) \cdot (0,0136 \text{ m/s}) \cdot (0,0029 \text{ m})}{0,001003 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}}$$

$$Re = 39,25 \text{ (Laminar)}$$

- Laju aliran massa 15×10^{-4} kg/s

$$v = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot \rho} = \frac{15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{(0,0015 \text{ m}) \cdot (0,049 \text{ m}) \cdot (998,2 \text{ kg/m}^3)} = 0,02 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{(998,2 \text{ kg/m}^3) \cdot (0,02 \text{ m/s}) \cdot (0,0029 \text{ m})}{0,001003 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}}$$

$$Re = 57,72 \text{ (Laminar)}$$

B. Air 60% + Etilen Glikol 40%

- Laju aliran massa 5×10^{-4} kg/s

$$v = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot \rho} = \frac{5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{(0,0015 \text{ m}) \cdot (0,049 \text{ m}) \cdot (1051,5 \text{ kg/m}^3)} = 0,0064 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{(1051,5 \text{ kg/m}^3) \cdot (0,0064 \text{ m/s}) \cdot (0,0029 \text{ m})}{0,0021 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}}$$

$$Re = 9,3 \text{ (Laminar)}$$

- Laju aliran massa 10×10^{-4} kg/s

$$v = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot \rho} = \frac{10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{(0,0015 \text{ m}) \cdot (0,049 \text{ m}) \cdot (1051,5 \text{ kg/m}^3)} = 0,013 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{(1051,5 \text{ kg/m}^3) \cdot (0,013 \text{ m/s}) \cdot (0,0029 \text{ m})}{0,0021 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}}$$

$$Re = 18,88 \text{ (Laminar)}$$

- Laju aliran massa 15×10^{-4} kg/s

$$v = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot \rho} = \frac{15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{(0,0015 \text{ m}) \cdot (0,049 \text{ m}) \cdot (1051,5 \text{ kg/m}^3)} = 0,019 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{(1051,5 \text{ kg/m}^3) \cdot (0,019 \text{ m/s}) \cdot (0,0029 \text{ m})}{0,0021 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}}$$

$$Re = 27,59 \text{ (Laminar)}$$

C. Nanofluida Cellulose Nanocrystal (CNC) – Air (W) + Etilen Glikol (EG)

- Laju aliran massa 5×10^{-4} kg/s

$$v = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot \rho} = \frac{5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{(0,0015 \text{ m}) \cdot (0,049 \text{ m}) \cdot (1052,3 \text{ kg/m}^3)} = 0,0065 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{(1052,3 \text{ kg/m}^3) \cdot (0,0065 \text{ m/s}) \cdot (0,0029 \text{ m})}{0,00223 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}}$$

$$Re = 8,9 \text{ (Laminar)}$$

- Laju aliran massa 10×10^{-4} kg/s

$$v = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot \rho} = \frac{10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{(0,0015 \text{ m}) \cdot (0,049 \text{ m}) \cdot (1052,3 \text{ kg/m}^3)} = 0,013 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{(1052,3 \text{ kg/m}^3) \cdot (0,013 \text{ m/s}) \cdot (0,0029 \text{ m})}{0,00223 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}}$$

$$Re = 17,8 \text{ (Laminar)}$$

- Laju aliran massa 15×10^{-4} kg/s

$$v = \frac{\dot{m}}{a \cdot b \cdot \rho} = \frac{15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}}{(0,0015 \text{ m}) \cdot (0,049 \text{ m}) \cdot (1052,3 \text{ kg/m}^3)} = 0,02 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{(1052,3 \text{ kg/m}^3) \cdot (0,02 \text{ m/s}) \cdot (0,0029 \text{ m})}{0,00223 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}}$$

$$Re = 27,37 \text{ (Laminar)}$$

Lampiran 5. Cellulose Nanocrystal (CNC) Data Sheet



Technical Data Sheet

CelluForce NCC® NCV100-NASD90

Description

CelluForce NCC® NCV100-NASD90 which is extracted from cellulose, the main building block of trees and plants, is a redispersible powder of uniform acyclic nanometric crystals. Their size, shape, and charge lead to unique behavior in suspensions. The high chemical reactivity of the crystal surfaces makes CelluForce NCC customizable for various applications.

Features and Benefits

- Bio-based and readily biodegradable
- Non-irritating and non-toxic
- High temperature stability
- Thickens fluids and suspends other particles
- Stabilises emulsions and foams
- Forms impermeable barriers
- Strengthens structures
- Lubricates surfaces

Typical Properties

Property	Unit	Result
Product Form		Spray dried powder
Appearance (color)		White to Off-White Powder
Density	g.cm ⁻³	0.4 - 0.6
Moisture content	wt. %	≤ 6
Particle Size (powder)	µm	1 - 50
Particle size ¹	nm	< 150
Conductivity ¹	µS.cm ⁻¹	< 350
pH ¹		5.0 - 8.0
Viscosity ¹	mPa.s	> 5
Shelf Life	year	4

¹Analysis made on dispersed powder at 2wt% in deionized water

How to use

CelluForce NCC®, an easy-to-use powder, is hydrophilic and can be easily incorporated into water or the aqueous phase of an emulsion. Please contact CelluForce for specific guidance.

Usable Life and Storage

This product has a 4-year shelf life after the production date for an unopened container.

Store at room temperature and away from ignition sources. Store in dry conditions with relative humidity < 50%.

Health and Environmental Information

Product safety, health and environmental information is not included in this document. Please read the safety datasheet for the relevant information. To support customers in their product safety needs, CelluForce has product stewardship, safety, and regulatory resources available to assist our customers.

Disposal

Dispose container and unused contents in accordance with federal, provincial/territorial, and local requirements.

NOTICE: CelluForce assumes no responsibility for the information contained in this document. NO WARRANTY IS GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF QUALITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.

Section 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking**1.1. Product identifier**

Trade Name: CelluForce NCC® NCV100-NASD90
Synonyms: Cellulose nanocrystals; Nanocrystalline cellulose; NCV102-NASD90.
Product Code: Not available.

1.2. Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Identified uses: Rheology modifier, strengthening agent, suspending agent, film former.
Uses advised against: Not available.

1.3. Details of the supplier of the safety data sheet

Name: CelluForce Inc.
Address: 609 Rang 12 C.P. 3
Windsor, QC, J1S 2L7
Canada
Phone Number: +1 (514) 360-1023
E-mail of competent person responsible for SDS in the EU: info@celluforce.com

1.4. Emergency telephone number:

Emergency Phone: +1 (819) 481-0529 ext. 52804 (Mon-Fri / 8 AM - 5 PM (GMT-5))

Section 2: Hazards identification**2.1. Classification of the substance or mixture****2.1.1. Classification according to CLP (Regulation (EC) No 1272/2008)**

CLP Classification: Not hazardous according to CLP (Regulation (EC) No 1272/2008) criteria.

2.1.3 Additional information:

For full text of Hazard- and EU Hazard-statements: see SECTION 16.

2.2. Label elements**Labelling according to CLP (Regulation (EC) No 1272/2008)**

Hazard None.
Pictogram(s):
Signal Word: None.
Hazard Statements: Not applicable.

Precautionary Statements
Prevention: Not applicable.

Response: Not applicable.

Storage: Not applicable.

Disposal: Not applicable.

2.3. Other hazards

Not Classified as PBT/vPvB by EU criteria.

Section 3: Composition / information on ingredients
3.2. Mixtures

Ingredient(s)	CAS No.	EC No.	Wt. %	Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008 (CLP) ⁺
Cellulose, nanocrystalline	9004-34-6	232-674-9	80 - 100	Not hazardous.

⁺ See section 16 for the full text of the hazard phrases. Occupational exposure limits, if available, are listed in section 8.

Section 4: First aid measures
4.1. Description of first aid measures

Inhalation:	If inhaled: Call a poison center or doctor if you feel unwell.
Eye Contact:	If in eyes: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing. Call a poison center or doctor if you feel unwell.
Skin Contact:	If on skin: Wash with plenty of water. Call a poison center or doctor if you feel unwell.
Ingestion:	If swallowed: Call a poison center or doctor if you feel unwell. If vomiting occurs naturally, have victim lean forward to reduce the risk of aspiration. Do NOT induce vomiting unless directed to do so by medical personnel. Never give anything by mouth to an unconscious person.

4.2. Most important symptoms and effects, both acute and delayed

Inhalation:	No adverse effects are anticipated from single exposure to mist. Inhalation of large amounts of dust may cause respiratory irritation. Signs/symptoms may include cough, sneezing, nasal discharge, headache, hoarseness, and nose and throat pain.
Eye Contact:	May cause eye irritation. Signs/symptoms may include redness, swelling, pain, tearing, and blurred or hazy vision.
Skin Contact:	Brief contact is essentially non-irritating to skin. (Primary irritation index: 0.0) Prolonged skin contact is unlikely to result in absorption of harmful amounts.
Ingestion:	Low toxicity if swallowed. Small amounts swallowed incidentally as a result of normal handling operations are not likely to cause injury; however, swallowing larger amounts may cause injury.

4.3. Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

Note to Physicians: Symptoms may not appear immediately.

Section 5: Firefighting measures**5.1. Extinguishing media**

Suitable Extinguishing Media: Small Fire: Dry chemical, CO₂, water spray or regular foam.
Large Fire: Water spray, fog or regular foam. Move containers from fire area if you can do it without risk.

Unsuitable Extinguishing Media: Not available.

5.2. Special hazards arising from the substance or mixture

Hazardous combustion products: Oxides of carbon.

5.3. Advice for firefighters

Protection of Firefighters: May form combustible dust concentrations in air.
Fire may produce irritating, corrosive and/or toxic gases.
Runoff from fire control or dilution water may cause pollution.
Wear positive pressure self-contained breathing apparatus (SCBA). Structural firefighters' protective clothing will only provide limited protection.

Section 6: Accidental release measures**6.1. Personal precautions, protective equipment and emergency procedures**

6.1.1. For non-emergency personnel: Do not touch or walk through spilled material. Use personal protection recommended in Section 8. Keep away from heat, sparks and flame. Keep container closed (and grounded). Prevent dust accumulation (to minimize explosion hazard).

6.1.2. For emergency responders: Keep unauthorized personnel away. Stay upwind. Keep out of low areas. Ventilate closed spaces before entering. ELIMINATE all ignition sources (no smoking, flares, sparks or flames in immediate area).

6.2. Environmental precautions

Keep out of drains, sewers, ditches, and waterways.

6.3. Methods and material for containment and cleaning up

6.3.1. Methods for Containment: Do not flush to sewer or allow to enter waterways.

6.3.2. Methods for Clean-Up: Use explosion-proof equipment. Dust can be a fire or explosion hazard. Sweep up and shovel into suitable containers for disposal. Cleaning methods (e.g. compressed air) which can generate potentially combustible dust clouds should not be used.

6.3.3. Other Information: Dispose of contents and container according to applicable regional, national and local regulations.

6.4. Reference to other sections

See Section 8 for occupational exposure limits and risk management measures. Refer to Section 13 for disposal considerations.

Section 7: Handling and storage**7.1. Precautions for safe handling**

Minimize dust generation and accumulation. Airborne dusts are potentially explosive. Avoid significant deposits of material, especially on horizontal surfaces, which may become airborne and form combustible dust clouds and may contribute to secondary explosions. Handling and processing operations should be conducted in accordance with 'best practices' (e.g. NFPA-654). Dry powders can build static electricity charges when subjected to the friction of transfer and mixing operations. To avoid fire or explosion, ground and bond container and receiving equipment (and ground personnel) before transferring material. Do not swallow. See Section 8 for information on Personal Protective Equipment.

7.2. Conditions for safe storage, including any incompatibilities

Routine housekeeping should be instituted to ensure that dusts do not accumulate on surfaces. Store away from incompatible materials. See Section 10 for information on Incompatible Materials. Keep out of the reach of children.

7.3. Specific end use(s)

No specific instructions required.

Section 8: Exposure controls / personal protection**8.1. Control parameters**

Cellulose, nanocrystalline [CAS No. 9004-34-6]

ACGIH: 10 mg/m³ (TWA); (1985)

MAK: No MAK established.

WEL: 10 mg/m³ (TWA) (Inhalable); 4 mg/m³ (TWA) (Respirable); 20 mg/m³ (STEL) (Inhalable)

VLEP: 10 mg/m³ (VLEP 8h); (1987)

TWA: Time-Weighted Average

STEL: Short-Term Exposure Limit

MAK: Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen (Maximum workplace concentrations)

WEL: Workplace Exposure Limit

VLEP: Valeurs limites d'exposition professionnelle (Occupational exposure limit values)

8.2. Exposure controls**8.2.1. Appropriate Engineering Controls:**

It is recommended that all dust control equipment such as local exhaust ventilation and material transport systems involved in handling of this product contain explosion relief vents or an explosion suppression system or an oxygen-deficient environment. Ensure that dust-handling systems (such as exhaust ducts, dust collectors, vessels, and processing equipment) are designed in a manner to prevent the escape of dust into the work area (i.e., there is no leakage from the equipment). Use explosion-proof electrical, ventilating, and lighting equipment.

8.2.2. Personal Protection Equipment


Eye/Face Protection:	Wear safety glasses. Use equipment for eye protection according to European Standard EN 166.
Skin Protection:	
Hand Protection:	Wear protective gloves. Consult manufacturer specifications for further information.
Body Protection:	Wear protective clothing.
Respiratory Protection:	If engineering controls and ventilation are not sufficient to control exposure to below the allowable limits then a half mask particulate respirator (NIOSH type N95 or better filters) must be worn. Supplied air breathing apparatus must be used when oxygen concentrations are low or if airborne concentrations exceed the limits of the air-purifying respirators.
Thermal Hazards:	Not applicable.
General Hygiene Considerations:	Handle according to established industrial hygiene and safety practices. Consult a competent industrial hygienist to determine hazard potential and/or the PPE manufacturers to ensure adequate protection.

8.2.3. Environmental exposure controls:

Follow all applicable environmental protection legislation.

Section 9: Physical and chemical properties

Appearance:	White crystalline powder.
Odour:	Odourless.
Odour Threshold:	Not available.
Physical State:	Liquid.
pH (2% dispersion in water):	5 to 8 at 25 °C (77 °F)
Particle characteristic:	Microform (nanoform once dispersed in water).
Particle size distribution (volume weighted):	d(0.1) ≥ 0.1 µm (Cellulose, nanocrystalline) d(0.9) ≤ 50 µm (Cellulose, nanocrystalline)
Particle Shape (once dispersed in water):	Sticks.
Primary particle size (crystallite):	Mean Length: 76 nm (Cellulose, nanocrystalline) Mean Width: 3.4 nm (20:1 ratio) (Cellulose, nanocrystalline)
Specific surface area (crystallite):	500 m ² /g (Cellulose, nanocrystalline)
Crystallinity:	88% by x-ray diffraction (Cellulose, nanocrystalline)

SAFETY DATA SHEET according to 1907/2006/EC (REACH) and 1272/2008/EC (CLP) and their amendments

Surface functionalization/treatment:	Not applicable.
Melting Point / Freezing Point:	Not available.
Initial Boiling Point:	Not available.
Boiling Point:	Not available.
Flash Point:	Not available.
Evaporation Rate:	Not available.
Flammability (solid, gas):	See Section 5. May form combustible dust concentrations in air.
Lower Flammability Limit:	Not available.
Upper Flammability Limit:	Not available.
Vapour Pressure:	Not available.
Vapour Density:	Not available.
Relative Density:	Not available.
Solubilities:	Dispersible in water.
Partition Coefficient: n-Octanol/Water:	Not available.
Auto-ignition Temperature:	410 °C (770 °F)
Decomposition Temperature:	Not available.
Viscosity:	Not available.
Explosive Properties:	Not available.
Oxidising Properties:	Not considered as oxidising.
Bulk Density:	0.7 g/cc
Weight Percent < 1,000 Daltons:	0.6
Weight Percent < 500 Daltons:	<0.1
Coefficient of Water/Oil Distribution:	Not available.
Minimum Ignition Energy, MIE:	55 mJoule (ASTM E2019)
Dust Deflagration Index, Kst:	185 bar·m/s (ST class 1) (ASTM E1226)
Pmax:	8.8 bar (128 psig) (ASTM E1226)

Section 10: Stability and reactivity

<u>10.1. Reactivity</u>	Contact with incompatible materials. Sources of ignition. Exposure to heat. Flowing product can create electrical charge, resulting sparks may ignite dust or cause an explosion in some concentration ranges.
<u>10.2. Chemical stability</u>	Stable under normal storage conditions.

<u>10.3. Possibility of hazardous reactions</u>	A high concentration of dust may form an explosive mixture in air.
<u>10.4. Conditions to avoid</u>	Contact with incompatible materials. Sources of ignition. Exposure to heat. Avoid dust formation and deposits.
<u>10.5. Incompatible materials</u>	Strong oxidizers. Generated dust may ignite at temperatures in excess of 400 °C (752 °F).
<u>10.6. Hazardous decomposition products</u>	Not available.

Section 11: Toxicological information
--

11.1. Information on toxicological effects
Acute Toxicity:

Inhalation: No adverse effects are anticipated from single exposure to mist. Inhalation of large amounts of dust may cause respiratory irritation. Signs/symptoms may include cough, sneezing, nasal discharge, headache, hoarseness, and nose and throat pain.

Eye: May cause eye irritation. Signs/symptoms may include redness, swelling, pain, tearing, and blurred or hazy vision.

Skin: Brief contact is essentially non-irritating to skin. (Primary irritation index: 0.0)
Prolonged skin contact is unlikely to result in absorption of harmful amounts.

Ingestion: Low toxicity if swallowed. Small amounts swallowed incidentally as a result of normal handling operations are not likely to cause injury; however, swallowing larger amounts may cause injury.

Component	CAS No.	LD₅₀ oral	LD₅₀ dermal	LC₅₀ inhalation
Cellulose, nanocrystalline	9004-34-6	> 3160 mg NCC/kg (rat)	> 2000 mg/kg (rabbit)	> 5800 mg/m ³ (rat); 4H

Skin corrosion / irritation: Not expected to cause skin irritation.

Serious eye damage/irritation: Not expected to cause eye irritation.

Respiratory or skin sensitisation: Not expected to cause respiratory or skin sensitisation.

Germ cell mutagenicity: Not mutagenic at 5 mg NCC/plate to *S. typhimurium* strains TA98, TA100, TA1535, TA1537 and *E. coli* strain WP2 uvrA. Does not induce chromosome aberration at 5 mg NCC/mL in cultured WBL Chinese hamster ovary cells. No effect in mouse micronucleus test at 2,000 mg NCC/kg.

Carcinogenicity: This product does not contain any carcinogens or potential carcinogens above reportable thresholds as listed by ACGIH, IARC, OSHA, or NTP.

Reproductive toxicity: Not available.

STOT-single exposure: Not available.

SAFETY DATA SHEET according to 1907/2006/EC (REACH) and 1272/2008/EC (CLP) and their amendments

STOT-repeated exposure: Not available.
Aspiration hazard: Not an aspiration hazard.
Chronic Effects: Prolonged or repeated contact may dry skin and cause irritation.
Other information on adverse health effects: No other adverse effects expected.

Section 12: Ecological information

12.1. Toxicity Acute lethal toxicity fish – Rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) (96-h) LC50: > 10 g NCC/L;
 Acute lethal toxicity invertebrate – Daphnia magna (48-h) LC50: > 1 g NCC/L Ceriodaphnia dubia (48-h) LC50: > 1 g NCC/L;
 Chronic, sublethal growth inhibition algae – Pseudokirchneriella (Raphidocelis) subcapitata (72-h) IC25: > 2.5 g NCC/L;
 Chronic, sublethal reproduction inhibition invertebrates – C. dubia (7-d) IC25: > 1 g NCC/L.

12.2. Persistence and degradability Ready biodegradability: 42%.

12.3. Bioaccumulative potential Not available.

12.4. Mobility in soil Not available.

12.5. Results of PBT and vPvB assessment Not applicable.

12.6. Other adverse effects Not available.

Section 13: Disposal considerations

13.1. Waste treatment methods

Disposal Instructions: Disposal should be in accordance with applicable regional, national and local laws and regulations. Local regulations may be more stringent than regional or national requirements.

Section 14: Transport information

ADR / RID

14.1. UN number: Not applicable.
14.2. UN proper shipping name: Not regulated.
14.3. Transport hazard class(es): Not applicable.
14.4. Packing group: Not applicable.
14.5. Environmental hazards: Not applicable.
14.6. Special precautions for user: Not available.
14.7. Transport in bulk according to Annex II of MARPOL73/78 and the IBC Code: Not applicable.

Section 15: Regulatory information**15.1. Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture**

Authorisations: Not applicable.
Restrictions on use: Use only as intended.
Other EU regulations: Not available.
National regulations: Not applicable.

15.2. Chemical safety assessment

Chemical Safety Assessment: No Chemical Safety Assessments have been carried out for this substance.

Section 16: Other information

Classification and procedure used to derive the classification for mixtures according to Regulation (EC) 1272/2008 [CLP]:

Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008

Not hazardous.

Classification procedure

Self-classification.

Relevant H-statements (number and full text):

Not applicable.

Disclaimer:

The information contained in this document applies to this specific material as supplied. It may not be valid for this material if it is used in combination with any other materials. It is the user's responsibility to satisfy oneself as to the suitability and completeness of this information for their own particular use.

Date of Preparation of SDS: January 4, 2023

Version: 1.0

SDS Prepared by: **Aegis Regulatory Inc.**

Phone: (519) 488-0351

www.aegisreg.com