

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 *State of The Art*

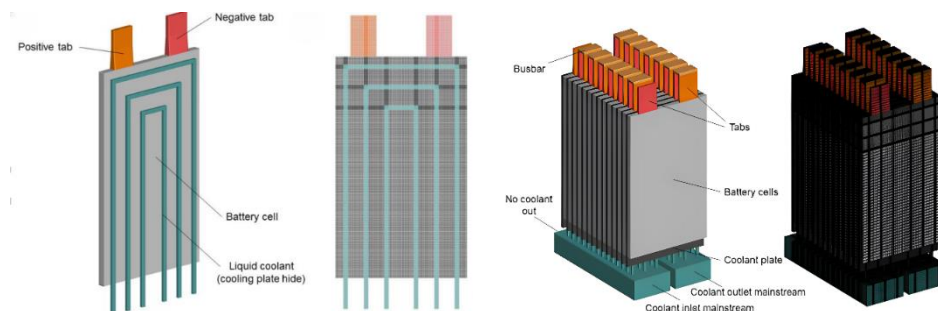
*State of the art* bertujuan untuk menganalisa penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan untuk dijadikan sebagai acuan. Dalam *state of the art* dapat meliputi judul, penulis, tujuan penelitian, metode yang digunakan, dan hasil yang dicapai. Adapun referensi yang dijadikan *state of the art* pada penelitian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

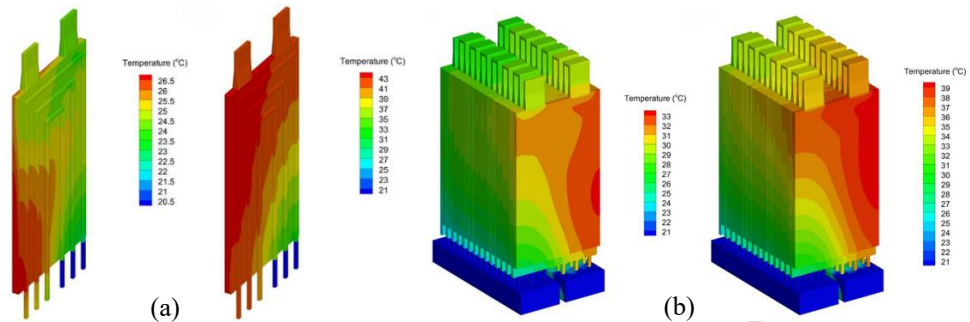


**Gambar 2.1** Model Geometri dan *Mesh* Sel Baterai dan Paket Baterai Li-ion Prismatik

(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



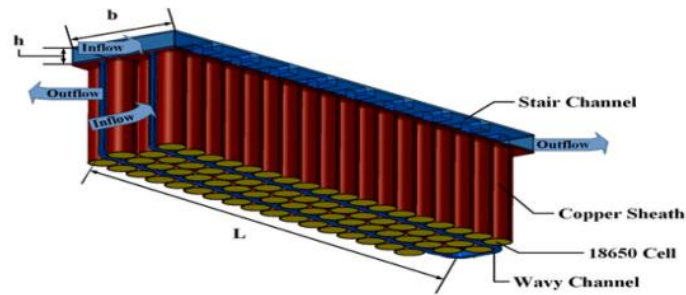
**Gambar 2.2** Kontur Suhu: (a) Sel Baterai Dengan Kecepatan Pendinginan 0,1 m/s dan 0,01 m/s, (b) Paket Baterai Dengan Kecepatan Pendinginan 0,01 m/s dan 0,005 m/s  
(Sumber: Li et al., 2019)

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*.

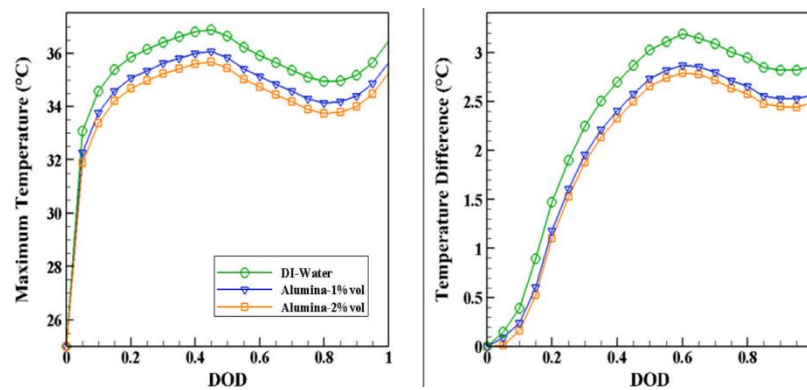
**Metode:** Model pendingin modul baterai yang terdiri dari 71 baterai Li-ion tipe 18650 silinder. Bagian pendingin meliputi *stair channel* di atas baterai dan *wavy channel* antar baterai untuk mendinginkan modul baterai Li-ion selama proses *charge/discharge*. Selubung tembaga (*copper sheath*) dipermukaan 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

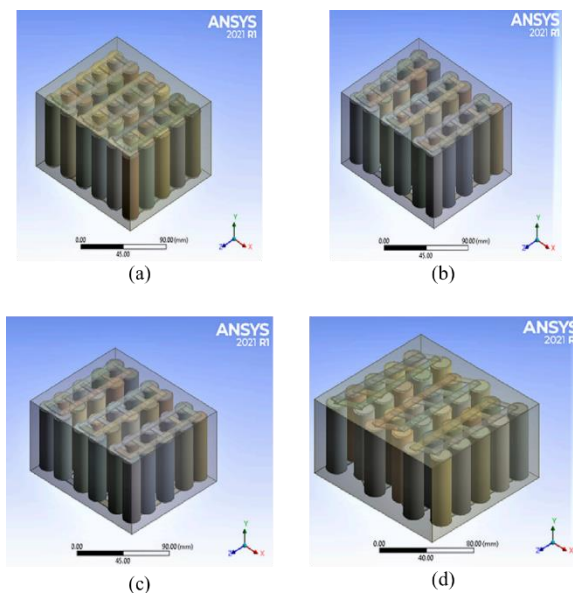
(Sumber: Sarchami et al., 2022)

- 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.

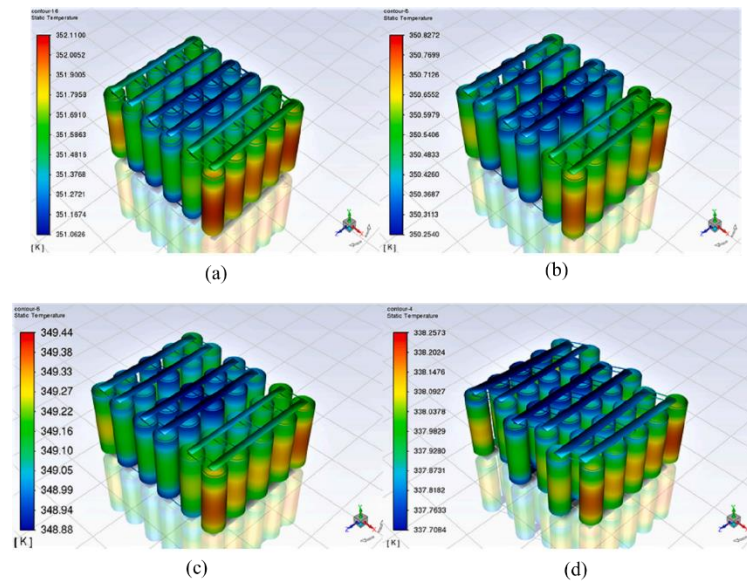
**Metode:** Paket baterai sel silinder yang disusun 6S5P dengan pendingin udara. Jarak antar sel baterai dimodifikasi melintang ( $St$ ) dan memanjang ( $Sl$ ) untuk melihat kinerja pendinginan baterai dengan tetap memperhatikan volume paket baterai. Model baterai ditunjukkan pada Gambar 2.3, (a) jarak 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.



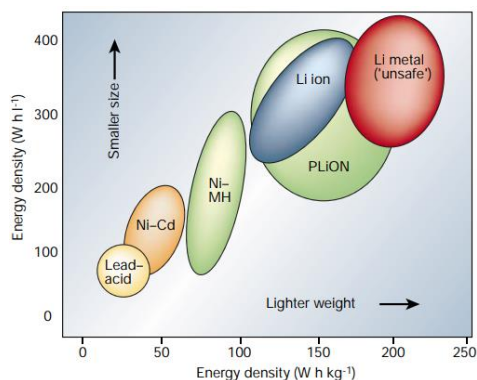
**Gambar 2.6** Kontur Suhu Pada 3C Dengan Memodifikasi Jarak Antar Sel  
(Sumber: Padalkar et al., 2023)

## 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.

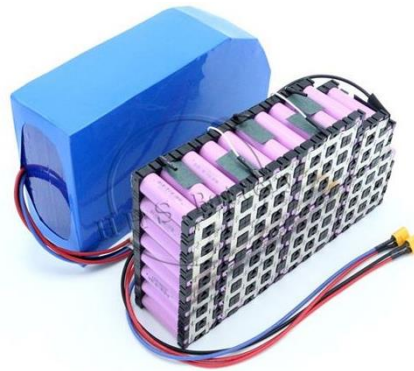
Dalam penggunaan baterai Li-ion, kebutuhan akan pengujian baterai menjadi sangat penting, terutama dalam penerapannya pada kendaraan listrik. Evaluasi pengujian dilakukan pada prototipe dalam bentuk pengujian mekanis, termal, dan listrik. Evaluasi pengujian mekanis meliputi tabrakan, jatuh, terguling, 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.



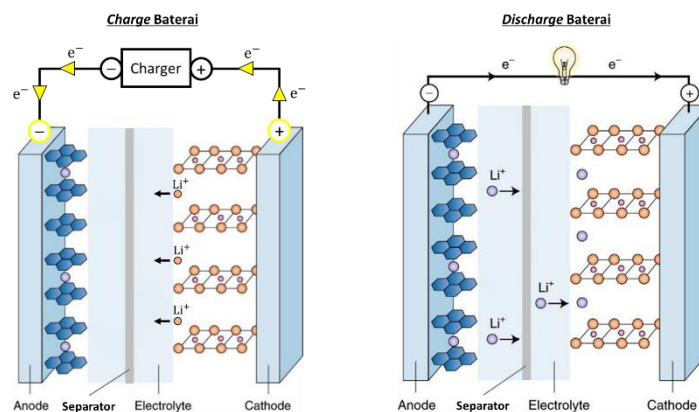
**Gambar 2.8** Paket Baterai  
(Sumber: pinterest.com)

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).



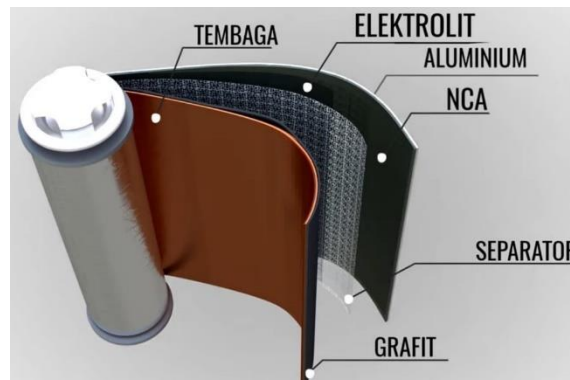
**Gambar 2.9** Ilustrasi *Charge* dan *Discharge* Baterai Li-Ion

(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.

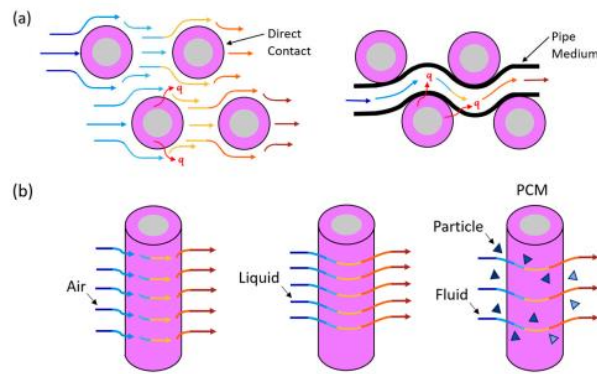


**Gambar 2.10** Struktur Baterai Lithium-Ion Silinder  
(Sumber: Lesics Indonesian, 2019)

#### 2.4 Sistem Manajemen Termal Baterai

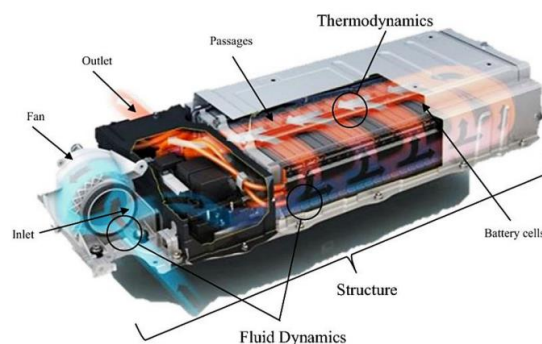
Baterai Li-ion menghasilkan panas selama proses *charge-discharge*. Panas yang dihasilkan berasal dari proses reaksi *electrochemical* dan *joule heating* selama baterai beroperasi (Kurniawan, 2020). Suhu optimal baterai Li-ion selama beroperasi berkisar antara 25 °C hingga 40 °C dengan perbedaan suhu 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).



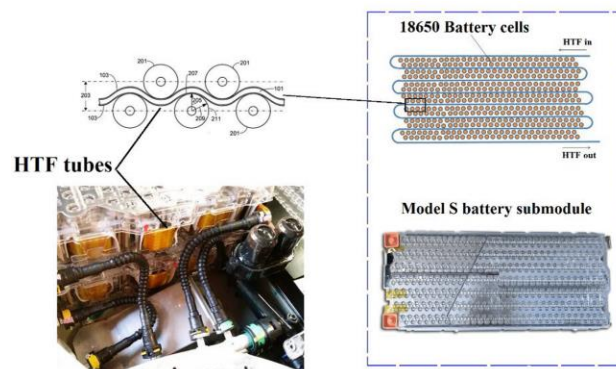
**Gambar 2.11** (a) Perpindahan panas kontak langsung dan kontak tidak langsung; (b) Jenis bahan pendingin untuk manajemen termal baterai.  
(Sumber: Widyantara et al., 2022)

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)

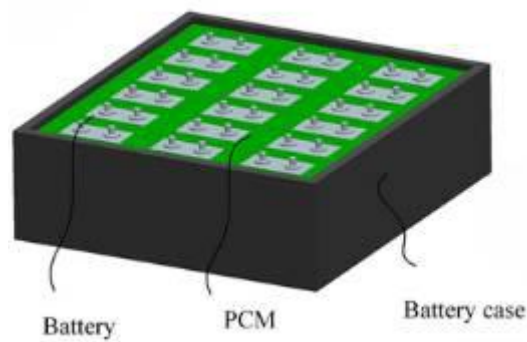
Sistem manajemen termal baterai berpendingin cair menggunakan cairan dengan kemampuan perpindahan panas yang lebih tinggi daripada udara, tetapi aplikasi praktis pada kendaraan listrik memerlukan pipa dengan konduktivitas termal yang tinggi sehingga mengarah pada konstruksi yang rumit. Pipa tersebut 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 ( $\rho$ ), viskositas ( $\mu$ ), 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).

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

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

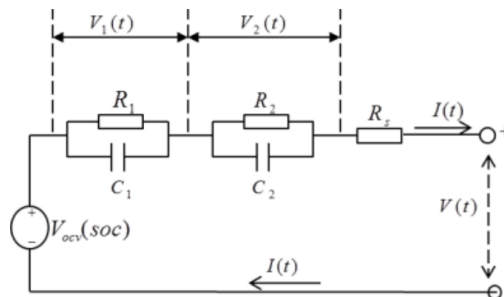
$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \phi_-) = j_{ECh} - j_{short}$$

Dimana  $\sigma_+$  dan  $\sigma_-$  adalah konduktivitas listrik efektif untuk elektroda positif dan elektroda negatif,  $\phi_+$  dan  $\phi_-$  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:

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



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

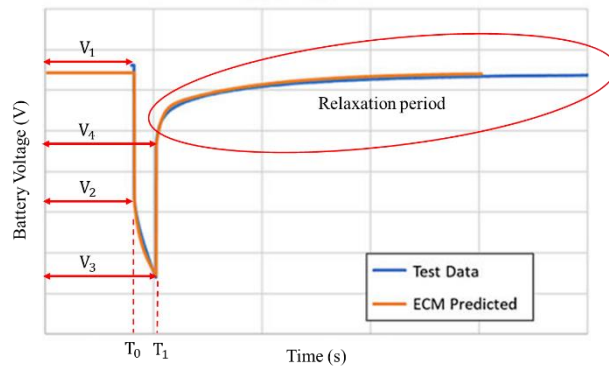
dimana  $Vol$  menunjukkan volume baterai,  $I$  adalah arus, dan  $V_{OCV}$  merupakan *open circuit voltage*. Ansys Fluent menyediakan *parameter estimation tool* untuk menghitung koefisien semua parameter ECM melalui data pengujian baterai. Data pengujian yang diperlukan adalah *hybrid pulse power 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.