Studi Numerik Pengaruh Konfigurasi Inlet Pada Sistem Flow Immersion Cooling Satu Fasa Baterai Li-Ion
Sel Tunggal
Muhammad Zuhdi, Dr.-Ing Ir. Ryan Anugerah Putra S.T., M.Sc., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transisi menuju energi terbarukan telah mendorong permintaan terhadap sistem penyimpanan energi yang andal, efisien, dan berkelanjutan. Baterai *Lithium-ion* (Li-ion) telah menjadi teknologi penyimpanan energi elektrokimia yang paling dominan dalam apliilkasi kendaraan listrik dan sistem penyimpanan stasioner, karena memiliki densitas energi yang tinggi, efisiensi konversi energi mencapai 85–100%, serta umur siklus yang panjang dibandingkan teknologi baterai sekunder lainnya (Ngoy et al., 2025). Namun demikian, kinerja elektrokimia, laju degradasi material, dan aspek keselamatan baterai Li-ion sangat sensitif terhadap kondisi termal selama operasi. Suhu di luar rentang optimal 15–35 °C dapat menyebabkan penurunan kapasitas yang signifikan serta memicu reaksi yang mempercepat *thermal runaway* (Liu et al., 2017).

Mengingat sensitivitas tinggi tersebut, penerapan *Battery Thermal Management System* (BTMS) menjadi syarat mutlak untuk menjaga operasi sel dalam batas aman (Akkuş & Işık, 2025). Berbagai strategi pendinginan konvensional telah dikembangkan, mulai dari *air cooling*, *indirect liquid cooling*, *phase change material (PCM)*, hingga *heat pipe*. Namun, metode-metode ini sering kali dibatasi oleh koefisien perpindahan panas yang relatif rendah dan resistansi termal yang tinggi (Liu et al., 2017). Sebagai alternatif yang lebih efisien, *immersion cooling* menarik perhatian karena merendam sel baterai secara langsung ke dalam fluida dielektrik sehingga resistansi termal lebih rendah. Penelitian (Roe et al., 2022) melaporkan bahwa sistem *immersion cooling* satu-fasa mampu meningkatkan perpindahan kalor hingga 1.000 kali lipat dibandingkan *air cooling*, sementara konfigurasi dua-fasa dapat melampaui angka 10.000 kali dengan memanfaatkan kalor laten evaporasi. Lebih lanjut, Xin et al. (2025) menekankan bahwa sistem ini tidak hanya unggul dalam kapasitas disipasi panas, tetapi juga mampu mempertahankan suhu rata-rata dan keseragamannya dalam rentang ideal bahkan pada laju pengisian/pengosongan yang tinggi hingga 20C.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
**Studi Numerik Pengaruh Konfigurasi Inlet Pada Sistem Flow Immersion Cooling Satu Fasa Baterai Li-Ion
Sel Tunggal**
Muhammad Zuhdi, Dr.-Ing Ir. Ryan Anugerah Putra S.T., M.Sc., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Untuk mengoptimalkan potensi sistem tersebut, rekayasa pola aliran melalui aliran *swirl* menjadi strategi yang efektif guna meningkatkan performa pendinginan tanpa menuntut konsumsi daya pompa yang berlebihan. Aliran *swirl* menciptakan komponen kecepatan tangensial yang kuat dan menginduksi aliran sekunder yang meningkatkan pencampuran fluida serta koefisien perpindahan kalor secara signifikan (Bergman & Levine, 2019). Fenomena ini mengganggu lapisan batas termal, meningkatkan pencampuran fluida, serta menaikkan koefisien perpindahan kalor konvektif. Integrasi mekanisme ini ke dalam sistem *immersion cooling* diprediksi dapat mengatasi keterbatasan pendinginan konvensional dengan mendistribusikan panas lebih merata di seluruh permukaan sel, tanpa memerlukan penambahan luas permukaan pertukaran panas atau peningkatan laju aliran yang signifikan (Bergman & Levine, 2019).

Meskipun mekanisme aliran *swirl* secara teoritis diprediksi dapat meningkatkan performa perpindahan panas, tetapi penerapannya dalam konteks FIC cukup terbatas. Sebagian besar studi yang ada masih berfokus pada karakterisasi sifat termofisik fluida dan variasi laju aliran dengan konfigurasi *inlet* aksial konvensional. Optimasi geometri dan rekayasa *inlet* untuk menciptakan efek *swirl* guna meningkatkan turbulensi, mencampurkan lapisan batas termal, serta menyeimbangkan *trade-off* antara performa termal dan hidrodinaik masih terbatas. Padahal, pendekatan ini sangat relevan untuk aplikasi BTMS kendaraan listrik yang mengutamakan efisiensi energi sistemik, mengingat kemampuan aliran *swirl* dalam meningkatkan koefisien perpindahan kalor.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi numerik guna menganalisis pengaruh konfigurasi *inlet* tangensial dan laju aliran terhadap performa termohidrolik sistem *immersion cooling* pada baterai Li-ion sel tunggal menggunakan fluida dielektrik HFE-7100. Secara spesifik, penelitian ini mengoptimasi dua parameter geometris kunci, yaitu sudut injeksi nosel relatif terhadap sumbu vertikal dan jumlah nosel, guna mencapai *trade-off* yang optimal.

Studi Numerik Pengaruh Konfigurasi Inlet Pada Sistem Flow Immersion Cooling Satu Fasa Baterai Li-Ion
Sel Tunggal
Muhammad Zuhdi, Dr.-Ing Ir. Ryan Anugerah Putra S.T., M.Sc., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah belum optimalnya performa perpindahan panas pada sistem FIC baterai Li-ion dengan konfigurasi *inlet* konvensional. *Inlet* aksial yang selama ini digunakan dinilai kurang efektif dalam memaksimalkan koefisien perpindahan kalor. Sementara itu, *inlet* tangensial yang menghasilkan aliran *swirl* berpotensi meningkatkan kinerja termal sistem. Namun, penelitian terkait pengaruh aliran *swirl* terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panas BTMS masih belum dieksplorasi secara komprehensif.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Objek penelitian adalah baterai Li-ion tipe LFP 18650 dengan tegangan nominal 3,2 V dan kapasitas 1,8 Ah.
2. Fluida kerja yang digunakan adalah HFE-7100 dengan sifat termofisik (massa jenis, kalor spesifik, viskositas, dan lainnya) yang dianggap konstan.
3. Temperatur awal fluida, temperatur *inlet*, temperatur awal baterai, dan validasi hasil simulasi menggunakan data eksperimen Kurniawan (2025).
4. Temperatur lingkungan ditetapkan sebesar 25°C dengan koefisien perpindahan panas konveksi antara dinding luar kontainer dan lingkungan sebesar 5 W/m²K.
5. Perpindahan kalor radiasi diabaikan dalam simulasi ini.
6. Simulasi dalam kondisi *transient* untuk merepresentasikan dinamika waktu selama pengosongan baterai dengan DoD sebesar 80%.
7. Peralatan tambahan seperti kabel DC *loader,* termokopel, dan penyangga baterai yang terdapat dalam eksperimen tidak dimodelkan.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis pengaruh variasi sudut *inlet* tangensial (30°, 60°, dan 90° terhadap sumbu vertikal) terhadap performa termal dan hidrolik pada sistem *FIC* konfigurasi satu nosel.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Studi Numerik Pengaruh Konfigurasi Inlet Pada Sistem Flow Immersion Cooling Satu Fasa Baterai Li-Ion Sel Tunggal
Muhammad Zuhdi, Dr.-Ing Ir. Ryan Anugerah Putra S.T., M.Sc., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2. Menentukan sudut *inlet* tangensial optimal yang memberikan *trade-off* terbaik antara performa termal (*heat transfer coefficient*) dan performa hidrolik (*pressure drop*) untuk konfigurasi satu nosel.
3. Menganalisis pengaruh variasi laju aliran (0,25; 0,5; dan 0,75 LPM) terhadap performa termal dan hidrolik pada konfigurasi satu, dua, dan tiga nosel dengan menerapkan sudut *inlet* tangensial optimal yang telah diperoleh dari poin 2.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini sedikit-banyaknya diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Penelitian ini dapat menjadi sarana pembelajaran dalam memahami proses penelitian secara nyata. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu menumbuhkan minat mahasiswa terhadap topik yang dikaji serta memberikan kesempatan untuk mengimplementasikan materi yang telah diperoleh selama perkuliahan.
2. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai rujukan bagi penelitian selanjutnya, khususnya yang berkaitan dengan simulasi dan metode numerik pendinginan baterai dengan pendekatan *computational fluid dynamics*. Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur khususnya terkait dengan perpindahan panas dan aliran *swirl*.
3. Penelitian ini diharapkan juga dapat memberikan manfaat sebagai referensi dalam pengembangan sistem manajemen termal baterai, sehingga dapat mendukung peningkatan dan perkembangan teknologi di bidang terkait.