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/

INTISARI

Baterai *Lithium-ion* (Li-ion) telah menjadi teknologi penyimpanan energi elektrokimia yang paling dominan pada aplikasi kendaraan listrik dan penyimpanan energi stasioner. Namun, kinerjanya sangat dipengaruhi oleh kondisi termal, karena operasi di luar rentang suhu optimal dapat menurunkan kapasitas sel secara signifikan bahkan berpotensi memicu *thermal runaway*. Oleh karena itu, penerapan *Battery Thermal Management System* (BTMS) menjadi sangat penting. Di antara berbagai BTMS, *Flow Immersion Cooling* (FIC) dapat meningkatkan perpindahan kalor melalui perendaman langsung dan aliran fluida dielektrik di sekitar baterai. Meskipun demikian, performa perpindahan panas pada sistem FIC dengan konfigurasi *inlet* konvensional masih belum optimal. Oleh karena itu, penerapan *inlet* tangensial yang menghasilkan aliran *swirl* menjadi alternatif untuk dikaji lebih lanjut guna meningkatkan karakteristik aliran dan kinerja termal sistem.

Penelitian ini melakukan studi numerik pada sistem FIC baterai Li-ion tunggal menggunakan fluida dielektrik HFE-7100. Mekanisme aliran *swirl* dimanfaatkan untuk meningkatkan koefisien perpindahan kalor melalui induksi komponen kecepatan tangensial yang mengganggu lapisan batas termal. Parameter yang divariasikan mencakup sudut injeksi nosel terhadap sumbu vertikal (30°, 60°, dan 90°) pada laju aliran konstan 0,5 LPM dan jumlah nosel (1, 2, dan 3) pada tiga laju aliran berbeda (0,25; 0,5; dan 0,75 LPM). Simulasi dijalankan pada ANSYS Fluent menggunakan model elektro-termal MSMD-NTGK dengan validasi terhadap data eksperimen yang menghasilkan *error* maksimum 3,80%.

Hasil simulasi menunjukan bahwa peningkatan sudut *inlet* dari 30° ke 90° secara konsisten meningkatkan *Heat Transfer Coefficient* (HTC). Konfigurasi A90N1 mencatatkan HTC rata-rata tertinggi sebesar 129,06 W/m²K, meningkat sebesar 20,6% dibandingkan A30N1 (107,03 W/m²K). Berdasarkan analisis *Performance Evaluation Criterion* (PEC), A90N1 merupakan konfigurasi sudut *inlet* optimal dengan nilai PEC 1,024. Pada variasi jumlah nosel dengan sudut 90°, konfigurasi A90N2 unggul secara konsisten di seluruh laju aliran dengan nilai PEC tertinggi sebesar 1,386 pada 0,25 LPM. Nilai PEC A90N2 yang 38% lebih tinggi dibandingkan konfigurasi aksial konvensional FIC pada 0,25 LPM mengonfirmasi bahwa *inlet* tangensial dengan efek *swirl* mampu meningkatkan efisiensi termohidrolik sistem pendinginan secara signifikan, tanpa disertai peningkatan *pressure drop* yang berlebihan.

Kata kunci: *Battery Thermal Management System*, *Flow Immersion Cooling*, Aliran *Swirl*, *Inlet* Tangensial, *Heat Transfer*, *Pressure Drop*, ANSYS Fluent

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/

ABSTRACT

Lithium-ion (Li-ion) batteries are the dominant electrochemical energy storage technology for electric vehicles and stationary applications. However, their performance is highly sensitive to thermal conditions. Operating outside the optimal temperature range degrades cell capacity and can trigger thermal runaway. Therefore, a Battery Thermal Management System (BTMS) is essential. Among various BTMS approaches, Flow Immersion Cooling (FIC) enhances heat transfer through direct contact with a flowing dielectric fluid. Nevertheless, the thermal performance of FIC systems with conventional inlet configurations remains suboptimal. To address this, tangential inlets are introduced to generate swirl flow, providing a strategy to enhance flow dynamics and overall thermal performance.

This study presents a numerical investigation of a Flow Immersion Cooling (FIC) system for a single Li-ion battery using HFE-7100 dielectric fluid. A swirl flow mechanism is employed to enhance the heat transfer coefficient by inducing tangential velocity components that disrupt the thermal boundary layer. The varied parameters include the nozzle injection angle relative to the vertical axis (30°, 60°, and 90°) at a constant flow rate of 0.5 LPM, as well as the number of nozzles (1, 2, and 3) evaluated across three different flow rates (0.25, 0.5, and 0.75 LPM). The simulations were conducted in ANSYS Fluent using the MSMD-NTGK electro-thermal model. The numerical results were validated against the experimental data, yielding a maximum error of 3.80%.

Simulation results demonstrate that increasing the inlet angle from 30° to 90° consistently enhances the Heat Transfer Coefficient (HTC). The A90N1 configuration recorded the highest average HTC of 129.06 W/m²K, representing an improvement of approximately 20.6% over A30N1 (107.03 W/m²K). Performance Evaluation Criterion (PEC) analysis identified A90N1 as the optimal inlet angle configuration, with a PEC value of 1.024. In the nozzle number variation study at a 90° inlet angle, the A90N2 configuration consistently outperformed A90N1 and A90N3 across all tested flow rates, achieving the highest PEC value of 1.386 at 0.25 LPM. The 38% higher PEC value of A90N2 relative to the conventional axial FIC configuration at 0.25 LPM confirms that tangential inlet design with swirl effect is an effective strategy for significantly improving the thermohydraulic efficiency of the immersion cooling system without incurring excessive pressure drop penalties.

Keywords: Battery Thermal Management System, Flow Immersion Cooling, Swirl Flow, Tangential Inlet, Heat Transfer, Pressure Drop, ANSYS Fluent