



# Analisis Bibliometrik Tren Global Thermal Runaway pada Baterai Li-ion LFP di Ruang Tertutup Wahana Bawah Air

Jarot Nindyo Pramono\*<sup>1</sup>, M. Ali Nugroho<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Sekolah Staf dan Komando Angkatan Laut, Indonesia

E-mail: [sttal56jarot@gmail.com](mailto:sttal56jarot@gmail.com)

Article Info	Abstract
<b>Article History</b> Received: 2026-03-07 Revised: 2026-04-13 Published: 2026-05-03	<p>This study presents a bibliometric review of the thermal runaway (TR) phenomenon in lithium iron phosphate (LiFePO<sub>4</sub>, LFP) based lithium-ion batteries operating in confined environments, particularly underwater vehicle battery rooms. The transition of underwater vehicle energy storage technology to LFP batteries offers high energy density but raises the risk of hydrogen gas accumulation and overpressure during thermal failure. The purpose of this study is to map global literature to identify trends, mitigation strategies, and research gaps in battery room safety design. The methodology used is bibliometric analysis based on Scopus data up to 2025 using BiblioMetric/Biblioshiny software, supported by Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation consistency checks. The results show that current global research focuses on four pillars: gas ventilation design, CFD propagation modeling, Battery Thermal Management Systems (BTMS), and smart detection systems. The conclusion emphasizes a significant research gap in specific underwater vehicle applications, where future safety designs must focus on modeling H<sub>2</sub>-dominated off-gas release rates and purging protocols to keep concentrations below the Lower Flammability Limit (LFL).</p>
<b>Keywords:</b> <i>Bibliometric Analysis;</i> <i>Thermal Runaway;</i> <i>Underwater Vehicle;</i> <i>LFP;</i> <i>CFD.</i>	

Artikel Info	Abstrak
<b>Sejarah Artikel</b> Diterima: 2026-03-07 Direvisi: 2026-04-13 Dipublikasi: 2026-05-03	<p>Penelitian ini menyajikan tinjauan bibliometrik mengenai fenomena <i>thermal runaway</i> (TR) pada baterai <i>lithium-ion</i> berbasis <i>lithium iron phosphate</i> (LiFePO<sub>4</sub>, LFP) yang beroperasi di lingkungan tertutup, khususnya ruang baterai wahana bawah air. Transisi teknologi penyimpanan energi wahana bawah air menuju baterai LFP menawarkan densitas energi tinggi, namun memunculkan risiko akumulasi gas hidrogen dan tekanan berlebih saat terjadi kegagalan termal. Tujuan penelitian ini adalah memetakan literatur global untuk mengidentifikasi tren, strategi mitigasi, dan celah riset (<i>research gap</i>) dalam desain keselamatan ruang baterai. Metodologi yang digunakan adalah analisis bibliometrik berbasis data Scopus hingga tahun 2025 menggunakan perangkat lunak <i>BiblioMetric/Biblioshiny</i>, didukung oleh pemeriksaan konsistensi simulasi <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD). Hasil kajian menunjukkan bahwa fokus riset global saat ini terkonsentrasi pada empat pilar: desain ventilasi gas, pemodelan propagasi CFD, <i>Battery Thermal Management Systems</i> (BTMS), dan sistem deteksi cerdas. Kesimpulan penelitian menegaskan bahwa terdapat celah riset yang signifikan pada aplikasi spesifik wahana bawah air, di mana desain keselamatan masa depan harus difokuskan pada pemodelan laju pelepasan gas (<i>off-gas</i>) dominan H<sub>2</sub> dan protokol <i>purging</i> untuk menjaga konsentrasi di bawah <i>Lower Flammability Limit</i> (LFL).</p>
<b>Kata kunci:</b> <i>Analisis Bibliometrik;</i> <i>Thermal Runaway;</i> <i>Wahana Bawah Air;</i> <i>LFP;</i> <i>CFD.</i>	

## I. PENDAHULUAN

Wahana bawah air diesel-elektrik modern saat ini tengah berada dalam fase transisi teknologi penyimpanan energi, beralih dari baterai timbal-asam konvensional menuju baterai *lithium-ion* berbasis *lithium iron phosphate* (LiFePO<sub>4</sub> atau LFP). Pergeseran ini didorong oleh keunggulan LFP yang menawarkan densitas energi lebih tinggi, kemampuan suplai daya yang responsif, serta daya tahan penyelaman yang jauh lebih panjang. Namun, transisi ini juga diiringi oleh perubahan arsitektur kompartemen, dari ruang yang berventilasi aktif menjadi kompartemen tertutup (*sealed room*) atau dikelola dalam

kondisi minim oksigen (*anoxic*) demi mendukung kapabilitas siluman (*stealth*) wahana bawah air (Xu et al., 2025).

Walaupun material LFP dikenal memiliki stabilitas termal yang lebih superior dibandingkan varian kimia baterai *lithium* lainnya, fenomena *thermal runaway* (TR) tetap menjadi ancaman katastropik, terutama ketika baterai beroperasi di ruang yang sangat terbatas. Pada kondisi ruang tertutup, pelepasan panas ekstrem akibat TR dapat berinteraksi langsung dengan gas buang (*off-gas*) yang kaya akan hidrogen (H<sub>2</sub>), memicu eskalasi risiko kebakaran, ledakan, dan tekanan berlebih atau *overpressure*

(Dubaniewicz et al., 2021). Urgensi mengenai keselamatan ruang baterai di lingkungan maritim tertutup ini tergambar jelas dari tragedi hilangnya wahana bawah air Argentina ARA San Juan pada tahun 2017, yang diindikasikan mengalami korsleting baterai fatal saat beroperasi (Naval Today, 2017).

Berangkat dari urgensi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemetaan komprehensif terhadap lanskap literatur global terkait *thermal runaway* pada LFP di ruang tertutup. Rumusan masalah dalam kajian ini adalah bagaimana tren publikasi global, fokus tematik, dan celah riset (*research gap*) dalam desain keselamatan termal ruang baterai wahana bawah air. Melalui pendekatan analisis bibliometrik, penelitian ini membedah pilar-pilar mitigasi yang ada dan memvalidasinya melalui replikasi simulasi termal *Computational Fluid Dynamics* (CFD) satu parameter, guna merumuskan arah desain keselamatan wahana bawah air di masa depan (Kim et al., 2021).

## II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain kualitatif-kuantitatif melalui pendekatan analisis bibliometrik. Pengumpulan data bersumber dari basis data Scopus untuk seluruh literatur yang diterbitkan hingga awal tahun 2025. Strategi pencarian menggunakan kombinasi string kata kunci: *TITLE-ABS-KEY ("thermal runaway") AND ("lithium-ion" OR "LiFePO4") AND (CFD OR "gas vent" OR purge OR anoxia OR "sealed room" OR "confined space" OR "underwater vehicle")*.

Data yang diekspor dalam format CSV dan BibTeX kemudian dibersihkan (deduplikasi dan standardisasi istilah) untuk selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak *BiblioMetrix* (*Biblioshiny*). Analisis mencakup metrik produksi tahunan, sitasi, hukum Bradford (distribusi sumber jurnal inti), serta pemetaan struktur tematik (*co-word network* dan evolusi topik).

Selain analisis literatur, penelitian ini juga melakukan pemeriksaan konsistensi teknis (*technical sanity check*) melalui replikasi pemodelan CFD pada sel LFP. Parameter kapasitas, *C-rate*, dan *State of Charge* (SOC) disamakan dengan studi acuan, di mana persamaan panas transien diselesaikan menggunakan pendekatan *under-relaxation* untuk mengamati respons termal fase padat secara terisolasi sebelum terjadinya pelonjakan panas ekstrem.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Hasil Penelitian

Hasil penelusuran basis data menunjukkan pertumbuhan publikasi yang signifikan terkait keselamatan TR baterai di ruang tertutup, dengan lonjakan eksponensial mencapai puncaknya pada periode 2024-2025. Analisis Hukum Bradford mengidentifikasi bahwa diskursus keilmuan ini terpusat pada beberapa jurnal inti, di antaranya *Journal of Energy Storage*, *Applied Thermal Engineering*, dan *Process Safety and Environmental Protection*.

Analisis evolusi kata kunci (*word cloud*) menunjukkan pergeseran fokus yang tajam. Tabel 1 merangkum evolusi fokus riset global terkait fenomena *thermal runaway* di lingkungan tertutup berdasarkan pemetaan tematik bibliometrik.

**Tabel 1.** Evolusi Tematik Fokus Riset *Thermal Runaway Global*

Periode Waktu	Fokus Utama Literatur Global ( <i>Thematic Evolution</i> )	Implementasi pada Desain Keselamatan
Pra-2019	Analisis Kegagalan ( <i>Failure Diagnosis</i> ) & <i>Heat Release Rate</i> (HRR).	Identifikasi "apa yang gagal dan mengapa" pada tingkat sel (mekanisme pemicu).
2020-2022	Pemodelan CFD Propagasi & <i>Overpressure</i> di Kontainer Tertutup.	Pemahaman penyebaran panas antar-sel dan desain titik pelepasan tekanan ( <i>venting</i> ).
2023-2025	<i>Battery Thermal Management System</i> (BTMS) & Deteksi Gas Dini (H <sub>2</sub> ).	Mitigasi aktif menggunakan <i>cooling system</i> mutakhir, perendaman cairan, dan sensor gas spesifik.

Sumber: Diolah oleh penulis, (2026)

Hasil pemeriksaan konsistensi melalui simulasi CFD menunjukkan bahwa dengan input *source-term* yang identik, temperatur rata-rata sel LFP naik secara *quasi-linear* dan mencapai titik krisis (88-90°C) pada detik ke-60, dengan pembentukan *hotspot* di sekitar *tab* dan *busbar*. Temuan ini memvalidasi bahwa rezim *pra-runaway* sangat didominasi oleh fungsi pelepasan panas internal (*heat-release term*) (Saw et al., 2017).

## B. Pembahasan

Berdasarkan metrik bibliometrik dan hasil replikasi simulasi, lanskap riset mengenai keselamatan baterai LFP di ruang tertutup dapat diklasifikasikan ke dalam empat pilar pembahasan utama yang saling terintegrasi:

### 1. Desain Ventilasi Gas dan *Overpressure*

Literatur terkini menunjukkan konsentrasi riset yang sangat tinggi pada dinamika ledakan akibat akumulasi gas (Hu et al., 2024). Di dalam ruang tertutup seperti kompartemen wahana bawah air, TR pada sel LFP memproduksi *off-gas* yang didominasi oleh hidrogen. Ketiadaan desain titik pelepasan gas (*gas vent*) yang proporsional akan memicu fenomena *overpressure* fatal yang merusak integritas lambung tekan wahana. Riset global menekankan pentingnya sensitivitas tata letak *relief valve* untuk meredam lonjakan tekanan ekstrem tersebut (Dubaniewicz et al., 2021).

### 2. Pemodelan Propagasi Termal Berbasis CFD

Dalam menganalisis rambatan api dari satu sel ke modul lainnya, pemodelan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menjadi tulang punggung analisis (Xu et al., 2025). Pemeriksaan konsistensi dalam penelitian ini membuktikan bahwa simulasi CFD tahap awal (*screening-first*) yang berfokus pada *source-term* sudah memadai untuk mengidentifikasi *envelope* operasi yang berbahaya. Untuk tahap lanjut, CFD *fully coupled* yang melibatkan pembentukan gas, radiasi, dan efek aliran berpori (*porous flow*) mutlak diperlukan untuk mendesain sekat kompartemen wahana bawah air (Kim et al., 2021).

### 3. Strategi Mitigasi melalui BTMS Mutakhir

Evolusi topik (*word cloud*) menunjukkan dominasi kata kunci *battery management systems* dan *cooling*. Riset global telah bergeser pada upaya pencegahan aktif melalui *Battery Thermal Management Systems* (BTMS) (Qin et al., 2022). Strategi ini mencakup pemanfaatan *phase change materials* (PCM), busa logam (*metal foams*), hingga teknik perendaman cairan pendingin. Selain itu, kolaborasi strategi pemadaman bergantian antara kabut air (*water mist*) dan nitrogen cair diuji sebagai langkah responsif untuk lingkungan minim oksigen (Gao et al., 2025).

### 4. Kesenjangan Riset pada Aplikasi Wahana Bawah Air

Meskipun publikasi tumbuh pesat, analisis bibliometrik ini menemukan kesenjangan riset (*research gap*) yang mencolok pada aplikasi spesifik wahana bawah air. Sebagian besar studi berfokus pada kontainer penyimpanan energi komersial. Pada wahana bawah air, terdapat kebutuhan desain krusial yang belum banyak diteliti, yaitu penyusunan kurva desain yang mengkorelasikan rasio pertukaran udara (*Air Changes per Hour/ACH*), luas ventilasi, dan tekanan puncak. Selain itu, protokol *purging* (pembuangan gas) yang harus mampu menjaga konsentrasi hidrogen tetap berada di bawah ambang batas mudah terbakar (*Lower Flammability Limit/LFL*) tanpa memicu lonjakan tekanan kabin masih menjadi ranah kosong yang harus segera dijawab oleh para peneliti maritim (Bugryniec et al., 2024).

## IV. SIMPULAN DAN SARAN

### A. Simpulan

Tinjauan bibliometrik terhadap literatur global mengenai fenomena *thermal runaway* baterai Li-ion LFP di ruang tertutup menunjukkan tren pertumbuhan riset yang sangat pesat. Fokus keilmuan saat ini mengerucut pada empat pilar: manajemen ventilasi gas (*overpressure*), pemodelan propagasi CFD, sistem pendingin (BTMS), serta deteksi dini. Uji konsistensi simulasi membuktikan bahwa pendekatan kalibrasi *source-term* melalui CFD sangat efektif untuk deteksi awal *hotspot* baterai. Meskipun demikian, penelitian ini menyimpulkan adanya celah riset (*gap*) yang sangat kritis terkait implementasi teknis pada kompartemen wahana bawah air, di mana kompleksitas akumulasi hidrogen di ruang anoksik belum sepenuhnya terjawab oleh literatur kontemporer.

### B. Saran

Berdasarkan temuan kesenjangan riset tersebut, disarankan agar penelitian lanjutan di bidang rekayasa maritim difokuskan pada pengembangan model *fully coupled* CFD yang memetakan kurva waktu-tekanan-suhu-konsentrasi oksigen secara spesifik untuk dimensi ruang wahana bawah air. Selain itu, rekayasa protokol *purging* yang tervalidasi mutlak diperlukan untuk memastikan

konsentrasi gas buang baterai LFP selalu berada di bawah ambang *Lower Flammability Limit* (LFL) guna menjamin keselamatan personel dan keandalan misi di laut dalam.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Bugryniec, P. J., Resendiz, E. G., Nwophoke, S. M., Khanna, S., James, C., & Brown, S. F. (2024) 'Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure - Considering toxic and flammable compounds', *Journal of Energy Storage*, 87, p. 111288.
- Dubaniewicz, T. H., Zlochower, I., Barone, T., Thomas, R., & Yuan, L. (2021) 'Thermal Runaway Pressures of Iron Phosphate Lithium-Ion Cells as a Function of Free Space Within Sealed Enclosures', *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38(1), pp. 539-547.
- Feng, X., et al. (2019) 'Key Characteristics for Thermal Runaway of Li-ion Batteries', *Energy Procedia*, 158, pp. 4684-4689.
- Gao, X., et al. (2025) 'Experimental study on fire extinguishing of lithium-ion batteries by alternating synergistic strategies of water mist and liquid nitrogen under low-temperature conditions', *Journal of Energy Storage*, 134, p. 117986.
- Hu, Q., et al. (2024) 'Explosion-venting overpressure structures and hazards of lithium-ion batteries thermal runaway gas induced by multiple vents of energy storage system container', *Journal of Energy Storage*, 99, p. 113173.
- Kim, J., Mallarapu, A., Finegan, D. P., & Santhanagopalan, S. (2021) 'Modeling cell venting and gas-phase reactions in 18650 lithium ion batteries during thermal runaway', *Journal of Power Sources*, 489, p. 229496.
- Naval Today (2017) *Missing ARA San Juan suffered battery short circuit*. Tersedia pada: <https://www.navaltoday.com> (Diakses: 2026).
- Qin, P., et al. (2022) 'The thermal runaway analysis on LiFePO<sub>4</sub> electrical energy storage packs with different venting areas and void volumes', *Applied Energy*, 313, p. 118767.
- Saw, L. H., et al. (2017) 'Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system', *Applied Energy*, 204, pp. 1489-1499.
- Xu, Y., Lu, J., Zhang, P., Gao, K., & Huang, Y. (2025) 'Thermal runaway and flame propagation of lithium-ion battery in confined spaces: Experiments and simulations', *Journal of Energy Storage*, 117, p. 116154.