



TEKNOLOGI LIB DAN IMPLIKASINYA BAGI PEMBANGUNAN KEKUATAN KAPAL SELAM MENUJU INDONESIA EMAS 2045

**DISUSUN SEBAGAI SUMBANGAN PEMIKIRAN
DALAM RANGKA HUT HIU KENCANA 2025**



**“TEKNOLOGI LIB DAN IMPLIKASINYA
BAGI PEMBANGUNAN
KEKUATAN KAPAL SELAM
MENUJU INDONESIA EMAS 2045”**

**DISUSUN SEBAGAI SUMBANGAN PEMIKIRAN
DALAM RANGKA HUT HIU KENCANA 2025**

OLEH:

DR. ADJI SULARSO

Percetakan Inti Grafika Sukses Mulia

www.intigrafika.com

Jl. Kapas Madya I-F No. 97-101 Surabaya

Hotline : 08123229953

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

KATA SAMBUTAN _____	5
- KEPALA STAF ANGKATAN LAUT (LAKSAMANA TNI DR. MUHAMMAD ALI) ____	5
- KALAKHAR PAGUYUBAN HIU KENCANA (LAKSDA TNI (PURN) DIDI SETIADI)	7

KATA PENGANTAR PENULIS _____	9
-------------------------------------	---

BAB I – PENGANTAR STRATEGIS

1.1 Prakata & Sambutan HUT Hiu Kencana 2025 _____	11
1.2 Ringkasan Eksekutif _____	11
1.3 Latar Belakang _____	11
1.4 Tujuan, Ruang Lingkup & Metodologi _____	12

BAB II – DASAR TEKNOLOGI LIB

2.1 Fundamental LIB _____	13
2.2 Kimia Baterai & Trade-off _____	14
2.3 Sistem Pendukung _____	14
2.4 Keandalan & Sertifikasi _____	15

BAB III – INTEGRASI LIB PADA KAPAL SELAM

3.1 Arsitektur Daya Kapal Selam _____	17
3.2 Integrasi Platform _____	17
3.3 Perbandingan dengan AIP & Lead-Acid _____	18
3.4 Keamanan, Survivabilitas & Taktik _____	19

BAB IV – INFRASTRUKTUR PANGKALAN & SISTEM PENDUKUNG

4.1 Kriteria Pangkalan Kapal Selam Modern _____	21
4.2 Infrastruktur Pangkalan untuk Kapal Selam LIB _____	22
4.3 Sistem MRO (Maintenance, Repair, Overhaul) _____	22
4.4 Integrasi dengan Ekosistem Logistik Nasional _____	23

BAB V – STUDI KASUS & BENCHMARK GLOBAL

5.1 Program Internasional _____	24
5.2 Benchmark Global _____	24
5.3 Pelajaran untuk Indonesia _____	25

BAB VI – IMPLIKASI BAGI KEKUATAN & DOKTRIN

6.1 Konsep Operasi (CONOPS) Baru _____	27
6.2 Kesiapan Logistik & Pemeliharaan _____	27
6.3 Keselamatan & Regulasi _____	28

BAB VII – INDUSTRI, EKONOMI, & KEMANDIRIAN

7.1 Rantai Pasok Domestik _____	29
7.2 Model Bisnis & Biaya Siklus Hidup (LCC) _____	29
7.3 Skema Alih Teknologi & Offset _____	30
7.4 Keberlanjutan & Daur Ulang _____	30

BAB VIII – PETA JALAN INDONESIA 2025–2045

8.1 Roadmap Teknis _____	31
8.2 Roadmap Kelembagaan & SDM _____	31
8.3 Roadmap Pengadaan & Pendanaan _____	32
8.4 Risiko & Mitigasi _____	33

BAB IX – REKOMENDASI KEBIJAKAN

9.1 Pilihan Kebijakan _____	34
9.2 Prioritas 3–5 Tahun _____	34
9.3 Kerangka Evaluasi _____	35

BAB X – PENUTUP

DAFTAR PUSTAKA _____	37
DAFTAR SINGKATAN _____	38



KATA SAMBUTAN

**Kepala Staf Angkatan Laut
LAKSAMANA TNI Dr. MUHAMMAD ALI, S.E., M.M., M.Tr.Opsla.**

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh,

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat-Nya buku “Teknologi LIB dan Implikasinya bagi Pembangunan Kekuatan Kapal Selam Indonesia” dapat diterbitkan bertepatan dengan peringatan HUT Hiu Kencana 2025. Momentum ini bukan hanya mengenang sejarah kejayaan kapal selam Indonesia, tetapi juga menegaskan komitmen kita menatap masa depan kekuatan bawah laut yang modern dan mandiri.

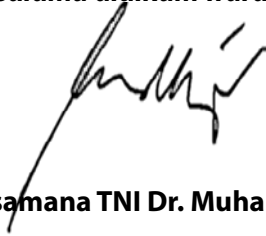
Sebagai mantan Komandan Kapal Selam Type-209, saya memahami secara langsung keterbatasan operasional akibat penggunaan baterai timbal-asam—mulai dari endurance yang singkat, kebutuhan snorkeling tinggi, hingga kompleksitas pemeliharaan. Karena itu, adopsi teknologi Lithium-Ion Battery (LIB) sebagaimana diuraikan dalam buku ini merupakan lompatan strategis yang akan meningkatkan daya tempur, memperpanjang operasi senyap di bawah permukaan, serta memperkuat strategi sea denial dan sea control Indonesia.

Buku ini tidak hanya membahas aspek teknis LIB, tetapi juga menyajikan peta jalan (roadmap) 2025–2045, kesiapan logistik dan pangkalan, hingga kebijakan pengembangan industri dalam negeri. Hal ini sejalan dengan visi Indonesia Emas 2045, di mana TNI AL menargetkan kekuatan kapal selam mencapai 12 unit yang tangguh, dilengkapi teknologi modern, serta didukung rantai pasok nasional berbasis sumber daya strategis bangsa.

Saya memberikan apresiasi setinggi-tingginya kepada penulis yang telah menyusun karya komprehensif ini. Semoga buku ini menjadi rujukan strategis bagi jajaran TNI AL, pemerintah, industri pertahanan, akademisi, dan generasi penerus dalam membangun kedaulatan maritim Nusantara.

Semoga Allah SWT senantiasa memberikan perlindungan dan kekuatan kepada kita semua, kepada TNI AL, serta kepada bangsa dan negara tercinta.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.



Laksamana TNI Dr. Muhammad Ali

Kepala Staf Angkatan Laut



KATA SAMBUTAN

Kalakhir Paguyuban Hiu Kencana

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh,

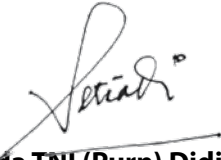
Syukur Alhamdulillah, atas rahmat Allah SWT, buku “Teknologi LIB dan Implikasinya bagi Pembangunan Kekuatan Kapal Selam Indonesia” dapat hadir bertepatan dengan peringatan HUT Hiu Kencana 2025. Buku ini merupakan sumbangan pemikiran yang sangat berharga bagi upaya kita bersama dalam membangun kekuatan bawah laut Indonesia.

Paguyuban Hiu Kencana sebagai wadah kebersamaan para prajurit kapal selam TNI AL, baik yang masih aktif maupun yang telah purna tugas, senantiasa berkomitmen mendukung pengembangan kemampuan kapal selam Indonesia. Dengan semangat *L'esprit de Corps*, kita ingin memastikan pengalaman, ilmu, dan dedikasi yang diwariskan generasi pendahulu dapat menjadi fondasi kokoh bagi generasi penerus.

Teknologi Lithium-Ion Battery (LIB) merupakan salah satu terobosan yang dapat membawa perubahan besar dalam kemampuan tempur kapal selam. Buku ini memberikan wawasan strategis, teknis, dan kebijakan yang sangat relevan dengan arah pembangunan kekuatan maritim Indonesia menuju 2045. Saya berharap karya ini dapat menjadi referensi penting tidak hanya bagi TNI AL, tetapi juga bagi pemerintah, industri pertahanan, akademisi, dan seluruh warga bangsa yang peduli pada kedaulatan laut Nusantara.

Atas nama Paguyuban Hiu Kencana, saya menyampaikan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada penulis dan pihak-pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian buku ini. Semoga upaya ini menjadi amal bakti yang bermanfaat bagi kejayaan TNI AL dan bangsa Indonesia.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Didi Setiadi', with a horizontal line underneath it.

Laksda TNI (Purn) Didi Setiadi
Kalakhar Paguyuban Hiu Kencana



KATA PENGANTAR PENULIS

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya buku dengan judul **“Teknologi LIB dan Implikasinya bagi Pembangunan Kekuatan Kapal Selam Menuju Indonesia Emas 2045”** dapat diselesaikan dan diterbitkan bertepatan dengan peringatan HUT Hiu Kencana 2025. Buku ini disusun sebagai sumbangan pemikiran mengenai pentingnya penguasaan dan penerapan teknologi Lithium-Ion Battery (LIB) pada kapal selam, yang diyakini akan menjadi salah satu lompatan strategis dalam modernisasi pertahanan maritim Indonesia.

Dengan teknologi ini, daya tempur kapal selam kita akan meningkat signifikan melalui kemampuan beroperasi lebih lama di bawah permukaan, peningkatan kecepatan senyap, serta pengurangan ketergantungan pada snorkeling yang selama ini menjadi kelemahan mendasar.

Sebagai bangsa maritim dengan wilayah laut yang sangat luas, Indonesia memerlukan kekuatan kapal selam yang modern, tangguh, dan mandiri. Melalui buku ini, penulis berupaya menyajikan uraian menyeluruh mulai dari aspek teknologi, strategi, industri, hingga kebijakan, serta memberikan rekomendasi konkret yang diharapkan dapat menjadi referensi dalam perencanaan kekuatan kapal selam menuju Indonesia Emas 2045.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Kepala Staf Angkatan Laut Laksamana TNI Dr. Muhammad Ali, Kalakhar Paguyuban Hiu Kencana Laksda TNI (Purn) Didi Setiadi, serta seluruh warga Hiu Kencana yang telah memberikan dukungan, masukan, dan semangat dalam penyusunan buku ini. Semoga karya ini bermanfaat bagi TNI AL, pemerintah, industri pertahanan, akademisi, dan seluruh masyarakat Indonesia.

Akhirnya, mari kita bersama-sama menjaga dan memperkuat kedaulatan maritim Nusantara dengan semangat pengabdian yang tak pernah surut.

Jakarta, September 2025

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'AS' or similar initials, written in a cursive style.

Dr. Adji Sularso

BAB I – PENGANTAR STRATEGIS

1.1 Prakata & Sambutan HUT Hiu Kencana 2025

Peringatan HUT Hiu Kencana 2025 menjadi momentum penting untuk merefleksikan pembangunan kekuatan bawah laut Indonesia. Kapal selam sebagai alat utama sistem senjata (alutsista) memiliki peran strategis dalam menjaga kedaulatan maritim Indonesia yang mencakup lebih dari 6 juta km² wilayah perairan. Dalam konteks modernisasi pertahanan, penguasaan teknologi Lithium-Ion Battery (LIB) menjadi salah satu lompatan penting yang dapat menentukan efektivitas operasi kapal selam Indonesia di masa depan.

1.2 Ringkasan Eksekutif

Perkembangan teknologi LIB telah membuka peluang signifikan dalam meningkatkan daya jelajah, kecepatan menyelam diam-diam (silent running speed), serta fleksibilitas taktis kapal selam. Berbeda dengan baterai timbal-asam konvensional, LIB menawarkan densitas energi lebih tinggi, siklus hidup lebih panjang, dan efisiensi pengisian ulang yang lebih baik¹. Negara-negara maju seperti Jepang, Korea Selatan, dan Perancis telah mengadopsi LIB pada kapal selam generasi terbaru, yang terbukti memberikan keunggulan operasional signifikan². Bagi Indonesia, pemanfaatan LIB bukan sekadar modernisasi teknis, melainkan bagian dari strategi besar dalam pembangunan kekuatan pertahanan maritim berkelanjutan menuju Indonesia Emas 2045.

1.3 Latar Belakang

Kapal selam merupakan elemen penting dalam strategi sea denial dan sea control TNI AL. Namun, keterbatasan baterai timbal-asam yang masih digunakan pada sebagian besar armada nasional (misalnya KRI Nagapasa class) menjadi tantangan nyata. Baterai jenis ini memiliki daya simpan terbatas, membutuhkan waktu pengisian yang panjang, serta rawan terhadap degradasi kimia³. Teknologi Air Independent Propulsion (AIP) sempat dipandang sebagai solusi, namun dalam banyak studi menunjukkan keterbatasan pada biaya

1 Yamazaki, H., & Sato, T. (2021). Application of Lithium-Ion Batteries in Submarines: Safety and Performance.

2 Naval Group. (2023). Scorpène Submarine with Lithium-Ion Batteries: Technical Brochure.

3 BRIN. (2024). Kajian Teknologi Baterai Lithium untuk Aplikasi Pertahanan.

tinggi, kompleksitas perawatan, serta output energi yang relatif kecil jika dibandingkan dengan LIB⁴. Dengan demikian, transisi ke LIB menjadi arah yang lebih logis dan strategis bagi Indonesia.

1.4 Tujuan, Ruang Lingkup, & Metodologi

Buku ini disusun untuk :

- Mengurai potensi dan tantangan teknologi LIB pada kapal selam.
- Menganalisis dampak strategis bagi pembangunan kekuatan bawah laut Indonesia.
- Memberikan rekomendasi kebijakan berbasis bukti (evidence-based policy).

Metodologi yang digunakan mencakup :

1. Kajian literatur internasional (Naval Group, IEC, IMO, DoD).
2. Analisis benchmarking dengan negara yang telah menerapkan LIB.
3. Studi industri nasional (PT PAL, BRIN, Bappenas) terkait kesiapan adopsi LIB.
4. Pemodelan konseptual peta jalan Indonesia 2025–2045

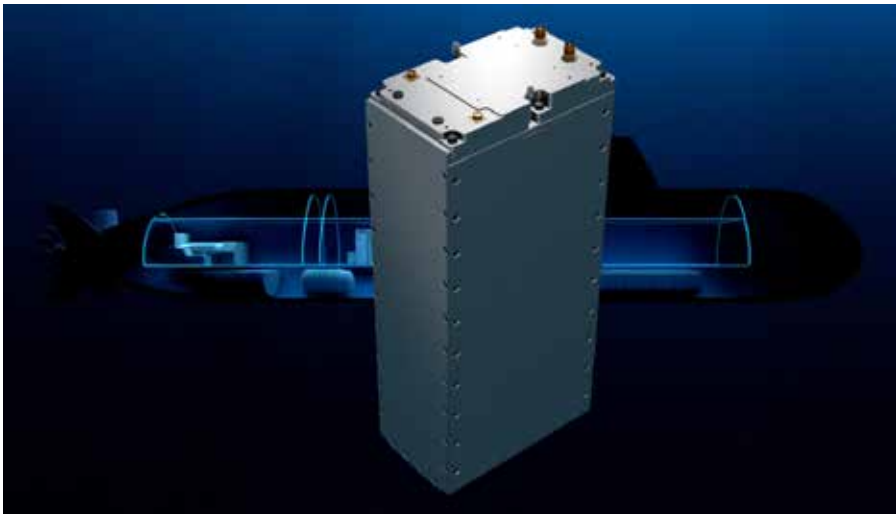
4 World Nuclear Association. (2022). Comparison of Submarine Propulsion Technologies.

BAB II – DASAR TEKNOLOGI LIB

2.1 Fundamental LIB

Baterai Lithium-Ion (LIB) adalah sistem penyimpanan energi elektrokimia yang bekerja melalui pergerakan ion litium antara anoda dan katoda dalam elektrolit cair atau padat. Keunggulan utama LIB terletak pada densitas energi yang tinggi (150–250 Wh/kg), dibandingkan dengan baterai timbal-asam yang hanya berkisar 30–50 Wh/kg⁵. Perbedaan ini membuat LIB mampu menyimpan energi lebih banyak dalam volume dan bobot yang lebih kecil, suatu keunggulan krusial untuk aplikasi kapal selam yang menuntut ruang kompak dan kinerja tinggi.

Selain densitas energi, LIB memiliki efisiensi coulombic di atas 95%, artinya energi yang hilang saat siklus pengisian dan pengosongan relatif rendah. Hal ini berdampak langsung pada daya tahan jelajah dan kemampuan kapal selam beroperasi secara diam-diam lebih lama, tanpa perlu muncul ke permukaan untuk snorkel atau mengisi ulang baterai.



Gambar 1. Sebuah Cell Lithium Battery

5 Yamazaki, H., & Sato, T. (2021). Application of Lithium-Ion Batteries in Submarines: Safety and Performance.

2.2 Kimia Baterai & Trade-off

Teknologi LIB memiliki beberapa varian kimia yang relevan untuk aplikasi militer, masing-masing dengan keunggulan dan keterbatasannya⁶:

- Lithium Iron Phosphate (LFP): Stabil secara termal, siklus hidup panjang (>4000 siklus), namun densitas energi relatif lebih rendah (140–170 Wh/kg).
- Nickel Manganese Cobalt (NMC) / Nickel Cobalt Aluminum (NCA): Memiliki densitas energi sangat tinggi (200–260 Wh/kg), cocok untuk misi jarak jauh, tetapi relatif kurang stabil dan memerlukan sistem manajemen termal canggih.
- Lithium Titanate Oxide (LTO): Memiliki keunggulan dalam pengisian cepat (fast charging) dan umur pakai sangat panjang, namun densitas energi rendah.
- Solid-State LIB (generasi baru): Menawarkan stabilitas termal lebih baik, potensi densitas energi lebih tinggi, dan keamanan yang lebih baik. Namun teknologi ini masih dalam tahap pengembangan dan belum teruji luas pada kapal selam.

Pemilihan kimia baterai menjadi kompromi antara keamanan, kinerja energi, siklus hidup, dan biaya. Dalam konteks kapal selam Indonesia, pendekatan hybrid (misalnya kombinasi NMC untuk daya dan LFP untuk stabilitas) berpotensi menjadi solusi optimal.

2.3 Sistem Pendukung

Integrasi LIB pada kapal selam tidak hanya sekadar mengganti baterai lama dengan baterai baru, melainkan juga menuntut keberadaan sistem pendukung yang canggih⁷:

1. Battery Management System (BMS)

Berfungsi mengatur arus masuk-keluar, memantau suhu, serta mencegah terjadinya overcharging atau deep discharge. BMS juga harus dilengkapi dengan redundansi agar tetap berfungsi dalam kondisi kerusakan sebagian.

6 Naval Group. (2023). Scorpène Submarine with Lithium-Ion Batteries: Technical Brochure.

7 International Maritime Organization (IMO). (2020). Guidelines for the Safe Use of Lithium Batteries on Ships

2. Thermal Management

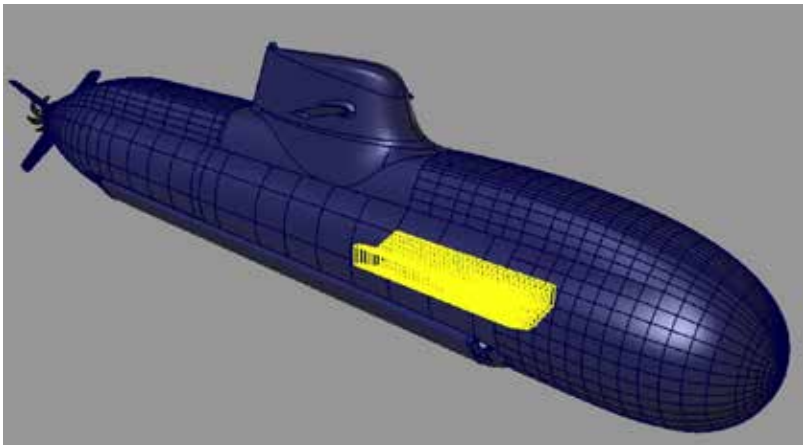
LIB sensitif terhadap suhu tinggi yang dapat memicu thermal runaway. Oleh karena itu, diperlukan sistem pendingin cair atau gas inert, serta desain kompartemen dengan ventilasi darurat.

3. Fire Suppression System

Untuk mengantisipasi kebakaran akibat kegagalan sel baterai, digunakan sistem inert gas (CO_2 , Nitrogen) atau aerosol khusus yang mampu memadamkan api tanpa merusak peralatan elektronik.

4. Isolasi & Proteksi

LIB harus ditempatkan pada kompartemen berlapis proteksi dengan isolasi anti-ledakan, agar kerusakan pada satu modul tidak menyebar ke seluruh sistem.



Gambar 2 : Penempatan LIB di Kapal Selam

2.4 Keandalan & Sertifikasi

Aplikasi LIB dalam kapal selam memerlukan sertifikasi militer khusus, berbeda dengan penggunaan komersial di kendaraan atau kapal sipil⁸. Standar IEC 62619 mengatur persyaratan keamanan untuk sel lithium industri, namun untuk aplikasi militer bawah laut diperlukan tambahan uji:

⁸ International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). IEC 62619: Safety Requirements for Secondary Lithium Cells and Batteries, for Use in Industrial Applications.

- Shock & Vibration Test : memastikan baterai tahan terhadap guncangan akibat manuver kapal atau serangan torpedo.
- Pressure & Flooding Simulation : uji ketahanan baterai dalam kondisi kedap air tekanan tinggi.
- Electromagnetic Compatibility (EMC) : menghindari interferensi antara BMS dengan sistem sonar dan navigasi.
- Safety & Fire Containment : memastikan isolasi darurat mampu menahan ledakan internal modul.

Pengalaman internasional menunjukkan bahwa negara-negara yang berhasil mengintegrasikan LIB (misalnya Jepang dengan kapal selam kelas Taigei) menekankan pada uji coba bertahap: mulai dari modul kecil di laboratorium, uji laut pada kapal uji, hingga adopsi penuh pada kapal selam operasional⁹.

⁹ International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). IEC 62619: Safety Requirements for Secondary Lithium Cells and Batteries, for Use in Industrial Applications.

BAB III – INTEGRASI LIB PADA KAPAL SELAM

3.1 Arsitektur Daya Kapal Selam

Integrasi LIB pada kapal selam tidak hanya sebatas penggantian baterai dari timbal-asam ke lithium-ion, melainkan melibatkan rekayasa ulang arsitektur daya secara menyeluruh. Pada dasarnya, sistem propulsi kapal selam konvensional terdiri atas :

- Generator diesel yang digunakan saat kapal berada di permukaan atau snorkel.
- Bank baterai timbal-asam sebagai sumber energi utama ketika kapal berada di bawah laut.
- Motor listrik propulsi yang menggerakkan baling-baling.

Dengan adopsi LIB, arsitektur daya menjadi lebih kompak, efisien, dan fleksibel. LIB mampu menyediakan arus tinggi secara instan, sehingga memungkinkan kapal mencapai silent running speed lebih cepat dibanding timbal-asam¹⁰. Selain itu, kemampuan fast charging memungkinkan integrasi lebih efisien dengan generator diesel maupun sistem pengisian darat di pangkalan.

Secara konseptual, arus listrik dialirkan dari LIB ke DC bus utama, yang mendistribusikan energi ke motor propulsi, sistem Navcom (navigasi, komunikasi, sonar), dan senjata. Perubahan utama yang diperlukan adalah penguatan sistem pendingin, isolasi kebakaran, dan BMS (Battery Management System).

3.2 Integrasi Platform

Pemasangan LIB pada kapal selam eksisting (retrofit) menghadapi sejumlah tantangan :

1. Dimensi & Distribusi Massa

Modul LIB memiliki kepadatan energi tinggi, namun juga menghasilkan konsentrasi panas signifikan. Oleh karena itu, desain kompartemen harus memperhitungkan sirkulasi pendinginan cair atau udara, serta penyusunan modul agar tidak menimbulkan ketidakseimbangan stabilitas kapal.

¹⁰ Naval Group. (2023). Scorpène Submarine with Lithium-Ion Batteries: Technical Brochure.

2. Keamanan Operasional

LIB rawan mengalami thermal runaway apabila terjadi kerusakan mekanis atau overcharge. Dalam hal ini, diperlukan kompartemen berlapis baja tipis tahan api dan sistem pemadam otomatis berbasis gas inert¹¹.

3. Integrasi BMS dengan Sistem Navigasi & Kontrol

BMS modern harus terhubung ke Combat Management System (CMS) agar komandan kapal dapat memantau status baterai secara real-time, termasuk tegangan, suhu, dan estimasi daya sisa.

4. Desain Baru vs Retrofit

- Pada desain baru (contoh: Jepang kelas Taigei), integrasi LIB dilakukan sejak tahap awal sehingga tata letak optimal.
- Pada retrofit (misalnya jika Indonesia meng-upgrade Nagapasa-class), diperlukan modifikasi besar, termasuk pemindahan tangki ballast atau sistem AIP¹².

3.3 Perbandingan dengan AIP & Lead-Acid

Studi internasional menunjukkan bahwa LIB memberikan keunggulan signifikan dibanding timbal-asam maupun Air Independent Propulsion (AIP)⁴:

Parameter	Lead-Acid	AIP (MESMA/Stirling/FC)	LIB
Densitas energi	30–50 Wh/kg	100–120 Wh/kg	150–250 Wh/kg
Lama operasi menyelam	2–3 hari	2–3 minggu (kecepatan rendah)	1–2 minggu (kecepatan tinggi & variatif)
Kecepatan diam-diam	Rendah	Sangat rendah	Tinggi

11 International Maritime Organization (IMO). (2020). Guidelines for the Safe Use of Lithium Batteries on Ships.

12 World Nuclear Association. (2022). Comparison of Submarine Propulsion Technologies

Umur siklus	500–700	2000+ (fuel cells)	3000–5000
Biaya perawatan	Tinggi	Sangat tinggi	Sedang
Kompleksitas teknis	Rendah	Tinggi	Sedang
Risiko keselamatan	Rendah (H ₂)	Tinggi (fuel leaks, cryogenics)	Tinggi (thermal runaway, mitigasi desain)

Hasil analisis menunjukkan :

- Lead-Acid : murah, matang, namun usang.
- AIP : efektif untuk operasi diam lama pada kecepatan rendah, tetapi kompleks dan mahal.
- LIB : memberikan keseimbangan optimal antara endurance, kecepatan, dan fleksibilitas taktis.

3.4 Keamanan, Survivabilitas & Taktik

Dari sisi operasi tempur, integrasi LIB meningkatkan survivabilitas kapal selam :

1. Reduksi Snorkeling

Dengan LIB, kebutuhan muncul ke permukaan untuk snorkel berkurang drastis. Hal ini mengurangi risiko terdeteksi radar, IR, atau satelit musuh.

2. Peningkatan Taktik Serangan Cepat

LIB memungkinkan kapal melaju dengan kecepatan tinggi secara diam-diam lebih lama, sehingga lebih efektif dalam skenario serangan kejutan (ambush).

3. Keselamatan & Damage Control

Risiko kebakaran internal akibat LIB harus diantisipasi. Standar IMO dan IEC 62619 menekankan fire suppression berbasis inert gas dan kompartemenisasi modular¹³.

4. Aspek Psikologis & Doktrin Baru

Awak kapal selam akan memerlukan pelatihan khusus dalam penanganan LIB, terutama manajemen darurat jika terjadi kerusakan sel. Doktrin operasi TNI AL juga perlu disesuaikan agar memanfaatkan keunggulan endurance dan fleksibilitas taktis dari LIB.

¹³ International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). IEC 62619: Safety Requirements for Secondary Lithium Cells and Batteries, for Use in Industrial Applications.

BAB IV – INFRASTRUKTUR PANGKALAN & SISTEM PENDUKUNG

4.1 Kriteria Pangkalan Kapal Selam Modern

Pangkalan kapal selam adalah elemen vital dalam siklus operasi. Secara umum, pangkalan ideal harus memenuhi kriteria:

- Lokasi strategis di dekat jalur pelayaran utama (ALKI, choke points) namun tersembunyi dari pengamatan musuh.
- Kerahasiaan dan perlindungan alami berupa teluk atau pulau kecil sebagai penutup, sebaiknya memiliki fasilitas penyembunyian (underground pens atau terowongan bawah tebing/pegunungan) untuk mengurangi kerentanan dari pengintaian satelit dan serangan udara.
- Kedalaman perairan memadai ($\geq 15-20$ m) untuk manuver kapal selam tanpa risiko kandas.
- Akses cepat ke laut lepas, sehingga kapal tidak mudah dipantau satelit atau drone musuh saat keluar masuk.

Lokasi strategis Pertahanan berlapis : dilengkapi dengan sistem pertahanan udara (SAM, radar pertahanan) dan anti-sabotase laut (sonar, ASW nets).

Lokasi potensial pangkalan:

- Lanal Palu/Bitung untuk Kawasan Timur.
- Batam/Natuna untuk kawasan Utara.
- Banyuwangi/Lombok untuk mengontrol perlintasan tengah.
- Sorong untuk wilayah Pasifik barat.



Gambar 3 : ilustrasi 3D sebuah pangkalan kapal selam di Lokasi ideal

4.2 Infrastruktur Pangkalan untuk Kapal Selam LIB

Adopsi LIB menuntut perubahan pada infrastruktur pangkalan dibandingkan pangkalan konvensional:

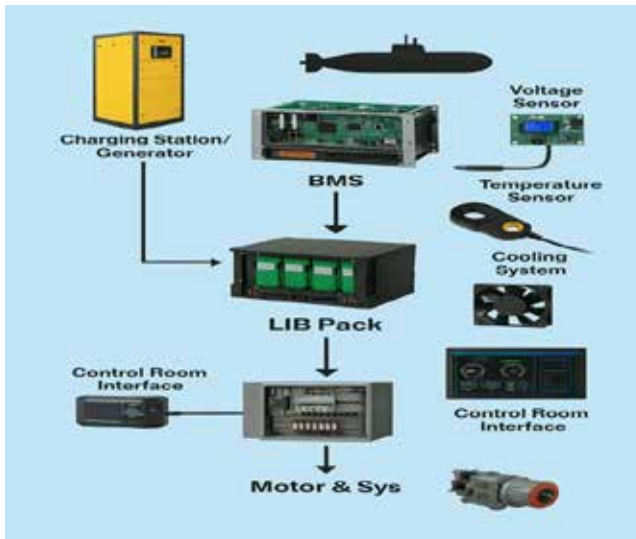
1. Fasilitas Pengisian Cepat (Fast Charging Stations) dengan kapasitas besar, terhubung ke jaringan listrik nasional atau pembangkit khusus.
2. Sistem Pendingin & Ventilasi di hanggar kapal selam untuk menjaga stabilitas termal baterai selama pengisian.
3. Gudang Aman Baterai Cadangan (Sionban = Stasion Bantu) dengan proteksi kebakaran berbasis inert gas.
4. Dockyard Modern untuk integrasi, overhaul, dan uji keamanan LIB.

4.3 Sistem MRO (Maintenance, Repair, Overhaul)

Siklus hidup LIB memerlukan MRO yang disiplin dan terstandar:

- Preventive Maintenance: inspeksi berkala sel, BMS, dan sistem pendingin.
- Corrective Maintenance: penggantian modul sel yang rusak dengan cepat melalui desain modular.
- Overhaul: penggantian massal modul baterai setiap 8–10 tahun (bergantung siklus pemakaian).

- Daur Ulang & Disposal: fasilitas daur ulang lithium, nikel, dan kobalt untuk mendukung circular economy.



Gambar 4 : Ilustrasi BMS (Battery Management System) di dalam Kapal Selam

4.4 Integrasi dengan Ekosistem Logistik Nasional

Indonesia dapat memanfaatkan industri dalam negeri untuk mendukung operasi kapal selam LIB :

- PT PAL : pusat MRO kapal selam dan integrasi LIB.
- BRIN & ITS : pusat riset uji baterai bawah laut.
- Industri baterai nasional (Morowali, Halmahera) untuk rantai pasok nikel dan kobalt.
- Kerja sama BUMN & swasta untuk menciptakan ekosistem berkelanjutan.

BAB V – STUDI KASUS & BENCHMARK GLOBAL

5.1 Program Internasional

1) Jepang – Kelas Taigei.

Jepang menjadi pelopor penggunaan LIB penuh pada kapal selam konvensional. Kelas Taigei menggantikan baterai timbal-asam dan sistem AIP Stirling yang digunakan pada kelas sebelumnya. Dengan LIB, Taigei mampu beroperasi lebih lama di bawah permukaan pada kecepatan tinggi tanpa snorkel, memberikan fleksibilitas taktis yang besar meskipun biaya awal tinggi¹⁴.

2) Korea Selatan – KSS-III Batch-II.

Korea Selatan mengintegrasikan LIB pada KSS-III Batch-II untuk endurance lebih panjang. Pendekatan yang diambil adalah kombinasi LIB dengan AIP sehingga tetap unggul untuk operasi kecepatan rendah jangka panjang dan tetap memiliki keunggulan power untuk fase manuver cepat¹⁵.

3) Perancis – Scorpène LIB-Ready.

Naval Group menawarkan varian Scorpène dengan opsi LIB. Keunggulannya adalah arsitektur modular yang memungkinkan retrofit dari timbal-asam ke LIB tanpa perubahan besar pada struktur lambung, relevan untuk negara pengguna ekspor seperti Indonesia¹⁶.

4) Jerman – Type 212CD.

Fokus utama tetap pada Fuel Cell AIP untuk endurance senyap, namun integrasi LIB disiapkan sebagai sumber daya tambahan untuk misi yang memerlukan daya instan dan profil kecepatan lebih tinggi⁴.

5.2 Benchmark Global

Dari pengalaman internasional, tampak beberapa pola kunci untuk pembelajaran dan replikasi :

14 Yamazaki, H., & Sato, T. (2021). Application of Lithium-Ion Batteries in Submarines: Safety and Performance

15 PT PAL Indonesia. (2024). Rencana Pengembangan Kapal Selam Nasional Berbasis Teknologi LIB.

16 Naval Group. (2023). Scorpène Submarine with Lithium-Ion Batteries: Technical Brochure

- Keunggulan taktis : Jepang menekankan operasi kecepatan tinggi dengan LIB penuh; Korea Selatan memilih kombinasi LIB+AIP.
- Model industri : Perancis menawarkan solusi ekspor modular; Jepang fokus pada kemandirian teknologi nasional.
- Keselamatan : Semua program menonjolkan safety case—kompartemen modular, BMS berlapis, dan pemadam gas inert.

Tabel 5.1 – Perbandingan Teknis Program LIB Kapal Selam

Negara	Arsitektur	Kekuatan Utama	Tantangan	Catatan
Jepang – Taigei	LIB penuh (tanpa AIP)	Kecepatan diam-diam tinggi, fast response	Biaya awal tinggi; manajemen termal	Pelopor operasional LIB penuh.
Korsel – KSS-III B-II	Hybrid LIB + AIP	Endurance rendah-kecepatan + daya puncak	Kompleksitas integrasi ganda	Fleksibilitas profil misi.
Perancis – Scorpène	Modular; opsi LIB	Retrofit relatif mudah; ekspor	Penyesuaian spesifikasi pelanggan	Relevan untuk kerja sama industry.
Jerman – Type 212CD	AIP dominan + opsi LIB	Endurance senyap sangat panjang	Biaya & kompleksitas fuel cell	LIB sebagai penambah daya ¹⁷

5.3 Pelajaran untuk Indonesia

- 1) Pendekatan bertahap. Mulai dari retrofit terbatas pada sebagian bank baterai untuk uji operasional di lingkungan nyata.
- 2) Desain baru LIB-ready. Program kapal selam generasi berikutnya disiapkan untuk LIB penuh saat ekonominya optimal.
- 3) Alih teknologi & BMS. Pastikan transfer teknologi LIB, thermal management, dan BMS agar MRO domestik kuat¹⁸
- 4) Penyesuaian doktrin. Maksimalkan keunggulan endurance dan manuver senyap; latih awak untuk prosedur keselamatan LIB.

17 World Nuclear Association. (2022). Comparison of Submarine Propulsion Technologies.

18 Bappenas. (2025). Indonesia Defense Industry Roadmap 2025–2045.

Tabel 5.2 – Perbandingan Parameter Teknis Kapal Selam**LIB vs AIP vs Lead-Acid**

Parameter	Jepang – Taigei (LIB)	Korsel – KSS-III B-II (Hybrid)	Perancis – Scorpène (LIB-ready)	Jerman – Type 212CD (AIP dominan)
Densitas energi	150–250 Wh/kg	120–200 Wh/kg	150–200 Wh/kg	100–120 Wh/kg
Endurance menyelam	1–2 minggu (kecepatan tinggi)	2–3 minggu (kombinasi AIP+LIB)	1–2 minggu (retrofit LIB)	2–3 minggu (AIP fuel cell)
Kecepatan diam-diam	Tinggi (15+ knot)	Sedang (LIB) / Rendah (AIP)	Sedang–tinggi	Rendah–sedang
Umur siklus baterai	3000–5000 siklus	2000–4000 siklus	3000+ siklus	Fuel cell >2000 siklus
Biaya integrasi	Sangat tinggi	Tinggi	Sedang–tinggi	Sangat tinggi
Kompleksitas teknis	Sedang	Tinggi (dua sistem)	Sedang	Sangat tinggi
Risiko keselamatan	Thermal run-away	Hybrid LIB + fuel leaks	Thermal run-away mitigasi modular	Fuel leakage, cryogenics

BAB VI – IMPLIKASI BAGI KEKUATAN & DOKTRIN

6.1 Konsep Operasi (CONOPS) Baru

Adopsi Lithium-Ion Batteries (LIB) pada kapal selam konvensional membuka peluang transformasi dalam konsep operasi (CONOPS) TNI AL. Selama ini, keterbatasan baterai timbal-asam membuat kapal selam Indonesia harus muncul ke permukaan secara berkala untuk snorkel, sehingga rentan terdeteksi musuh. Dengan LIB, kapal selam dapat beroperasi di bawah permukaan dengan durasi lebih panjang dan kecepatan yang lebih fleksibel.

Implikasi strategisnya adalah terciptanya kemampuan operasi 'silent persistence', yaitu menjaga kehadiran diam-diam dalam jangka waktu lama di area operasi kritis seperti Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI) atau perairan Natuna. Konsep ini memperkuat strategi 'sea denial' Indonesia, dengan meningkatkan elemen kejutan (surprise effect) dalam operasi bawah air¹⁹.

6.2 Kesiapan Logistik & Pemeliharaan

Peralihan ke LIB menuntut kesiapan logistik dan pemeliharaan (MRO) yang berbeda dari baterai timbal-asam. LIB memiliki siklus hidup lebih panjang (3000–5000 siklus) dibanding timbal-asam (500–700 siklus), namun membutuhkan sistem manajemen dan pemantauan yang lebih ketat²⁰.

Beberapa aspek logistik utama adalah :

- Infrastruktur pangkalan dengan fasilitas fast charging dan penyimpanan aman modul LIB.
- Workshop khusus dengan sistem pendingin dan proteksi kebakaran berbasis gas inert.
- Ketersediaan modul cadangan LIB untuk penggantian cepat.
- Sistem daur ulang lithium, nikel, dan kobalt untuk mendukung keberlanjutan

19 Yamazaki, H., & Sato, T. (2021). Application of Lithium-Ion Batteries in Submarines: Safety and Performance.

20 Naval Group. (2023). Scorpène Submarine with Lithium-Ion Batteries: Technical Brochure.

Dari sisi SDM, diperlukan pelatihan teknisi dan awak kapal selam untuk memahami risiko thermal runaway, prosedur perawatan BMS, serta SOP evakuasi darurat. Dengan kesiapan logistik yang memadai, siklus MRO dapat dipangkas sehingga meningkatkan readiness rate kapal selam Indonesia²¹.

6.3 Keselamatan & Regulasi

Penerapan LIB pada kapal selam juga menuntut penyesuaian standar keselamatan dan regulasi. Standar IEC 62619 memberikan pedoman teknis untuk penggunaan LIB di industri, tetapi perlu dilengkapi dengan persyaratan militer bawah laut, termasuk:

- Uji ketahanan terhadap tekanan tinggi dan banjir kompartemen.
- Uji getaran, kejutan, dan kompatibilitas elektromagnetik (EMC) agar tidak mengganggu sonar.
- Prosedur pemadaman kebakaran internal berbasis sistem inert gas.
- Sertifikasi nasional oleh Badan Klasifikasi Indonesia (BKI) bersama TNI AL.

Selain itu, doktrin operasional TNI AL perlu diperbarui untuk mengintegrasikan penggunaan LIB dalam pola patroli, skema serangan kejutan, dan operasi gabungan dengan armada permukaan serta udara. Hal ini menuntut penyusunan manual operasi baru serta pelatihan intensif awak kapal selam agar siap menghadapi skenario multi-ancaman²².

21 PT PAL Indonesia. (2024). Rencana Pengembangan Kapal Selam Nasional Berbasis Teknologi LIB.

22 International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). IEC 62619: Safety Requirements for Secondary Lithium Cells and Batteries, for Use in Industrial Applications.

BAB VII – INDUSTRI, EKONOMI, & KEMANDIRIAN

7.1 Rantai Pasok Domestik

Pengembangan kapal selam berbasis Lithium-Ion Batteries (LIB) tidak dapat dilepaskan dari kesiapan rantai pasok domestik. Indonesia memiliki keunggulan signifikan berupa cadangan nikel dan kobalt yang merupakan bahan baku utama pembuatan katoda LIB. Dengan pembangunan industri smelter di Morowali (Sulawesi Tengah) dan Halmahera (Maluku Utara), Indonesia berpotensi menjadi pemain penting dalam rantai pasok global baterai.

Untuk mendukung industri pertahanan, rantai pasok domestik harus mencakup:

- Penambangan dan pemurnian nikel/kobalt.
- Pabrik produksi sel LIB khusus pertahanan.
- Pusat riset dan pengujian LIB bawah laut oleh BRIN dan perguruan tinggi.
- Integrasi modul LIB oleh PT PAL Indonesia dalam platform kapal selam.

Dengan strategi ini, Indonesia tidak hanya sebagai konsumen teknologi, tetapi juga sebagai produsen dengan nilai tambah domestik²³.

7.2 Model Bisnis & Biaya Siklus Hidup (LCC)

Analisis biaya siklus hidup (Life Cycle Cost/LCC) menunjukkan bahwa meskipun CAPEX (Capital Expenditure) awal LIB lebih tinggi dibanding timbal-asam, total biaya jangka panjang justru lebih rendah. LIB memiliki siklus hidup lebih panjang (8–10 tahun) dibanding timbal-asam (3–4 tahun), sehingga mengurangi frekuensi penggantian. Selain itu, LIB membutuhkan ruang lebih kecil dan meningkatkan efisiensi operasi kapal selam.

Model bisnis yang relevan untuk Indonesia adalah skema 'Build and Operate with Local Content', di mana PT PAL memegang peran utama dalam integrasi, sementara bahan baku disuplai oleh industri dalam negeri. Hal ini akan menekan biaya impor sekaligus memperkuat kemandirian pertahanan²⁴.

23 BRIN. (2024). Kajian Teknologi Baterai Lithium untuk Aplikasi Pertahanan

24 BloombergNEF. (2023). Lithium-Ion Battery Cost and Supply Outlook.

7.3 Skema Alih Teknologi & Offset

Alih teknologi menjadi syarat mutlak dalam setiap kerja sama pengadaan kapal selam LIB. Pengalaman kerja sama pertahanan sebelumnya menunjukkan bahwa tanpa skema offset yang jelas, Indonesia akan tetap bergantung pada pemasok asing. Oleh karena itu, setiap kontrak dengan mitra internasional harus mencakup :

- Transfer teknologi manufaktur sel LIB.
- Transfer teknologi Battery Management System (BMS).
- Lisensi perawatan dan overhaul LIB di fasilitas domestik.
- Program joint research dengan BRIN dan universitas.

Dengan mekanisme offset yang kuat, Indonesia dapat meningkatkan kapasitas teknis sekaligus menyiapkan SDM yang handal²⁵.

7.4 Keberlanjutan & Daur Ulang

Isu keberlanjutan menjadi penting dalam pemanfaatan LIB skala besar. Baterai yang sudah mencapai akhir siklus hidupnya harus diproses melalui fasilitas daur ulang untuk mengekstrak kembali lithium, nikel, dan kobalt. Hal ini sejalan dengan prinsip circular economy yang didorong oleh pemerintah.

Daur ulang tidak hanya mengurangi ketergantungan impor bahan baku baru, tetapi juga menurunkan dampak lingkungan. Dengan membangun fasilitas daur ulang domestik, Indonesia bisa memastikan pasokan bahan baku sekunder tetap tersedia untuk kebutuhan pertahanan di masa depan²⁶.

25 PT PAL Indonesia. (2024). Rencana Pengembangan Kapal Selam Nasional Berbasis Teknologi LIB.
26 Bappenas. (2025). Indonesia Defense Industry Roadmap 2025–2045.

BAB VIII – PETA JALAN INDONESIA 2025–2045

8.1 Roadmap Teknis

Roadmap teknis pengembangan kapal selam berbasis Lithium-Ion Batteries (LIB) di Indonesia harus disusun secara bertahap, dengan mempertimbangkan kesiapan industri, teknologi, dan anggaran nasional. Tahapannya adalah :

- 2025–2030: Uji coba modul LIB di laboratorium BRIN dan universitas; integrasi parsial LIB pada kapal selam eksisting (retrofit sebagian bank baterai).
- 2030–2035: Pembangunan kapal selam baru oleh PT PAL dengan desain LIB-ready; produksi skala kecil modul LIB pertahanan di dalam negeri.
- 2035–2040: Integrasi penuh LIB pada kapal selam generasi baru; sertifikasi nasional untuk standar keselamatan LIB bawah laut.
- 2040–2045: Kapal selam Indonesia berbasis LIB sepenuhnya mandiri, dengan rantai pasok domestik terintegrasi dan fasilitas daur ulang baterai aktif.

8.2 Roadmap Kelembagaan & SDM

Keberhasilan roadmap teknis bergantung pada dukungan kelembagaan dan SDM yang kuat. Peta jalan kelembagaan dan SDM mencakup:

- Penguatan PT PAL sebagai pusat industri perkapalan nasional dengan kemampuan integrasi LIB.
- BRIN dan perguruan tinggi (ITS, ITB, UI) sebagai pusat riset dan pengembangan LIB untuk pertahanan.
- Pembentukan pusat sertifikasi LIB militer di bawah Kementerian Pertahanan bekerja sama dengan BKI.
- Program pendidikan dan pelatihan teknisi kapal selam LIB, termasuk kursus internasional melalui kerja sama strategis.

Dengan demikian, SDM Indonesia akan mampu mengoperasikan, merawat, dan mengembangkan teknologi LIB tanpa ketergantungan penuh pada luar negeri.

8.3 Roadmap Pengadaan & Pendanaan

Pengadaan kapal selam LIB harus dilakukan secara realistis dengan memperhatikan kemampuan fiskal negara. Strategi pengadaan mencakup :

- Skema kontrak bertahap dengan mitra asing yang mencakup transfer teknologi.
- Pendanaan campuran: APBN, skema pinjaman pertahanan, serta dukungan BUMN strategis.
- Insentif fiskal untuk industri hulu LIB domestik agar biaya produksi lebih kompetitif.
- Penetapan target minimal 50% komponen lokal (TKDN) pada kapal selam LIB generasi kedua (sekitar tahun 2040).

Pendekatan ini akan memastikan kesinambungan program tanpa membebani anggaran pertahanan secara berlebihan.

Tahapan pengadaan kapal selam baru untuk melengkapi kekuatan kapal selam menuju 2045, dapat ditabelkan sbb:

Periode	Nagapasa (Lead-Acid)	Scorpène Evolved (LIB)	Total Kapal Selam
2025-2030	3 unit aktif (KRI Cakra, non aktif)	+2 unit baru	5 (3 Nagapasa + 2 Interim)
2030-2035	3 unit aktif	+2 unit tambahan	7 (3 Nagapasa + 2 interim+ 2 Scorpène)
2035-2040	3 unit aktif	+3 unit tambahan	10 (3 Nagapasa + 3 Interim+ 4 Scorpène)
2040-2045	3 unit aktif	+2 unit tambahan	12 (3 Nagapasa + 3 Interim + 6 Scorpene)

8.4 Risiko & Mitigasi

Implementasi roadmap LIB menghadapi berbagai risiko yang perlu dimitigasi sejak awal:

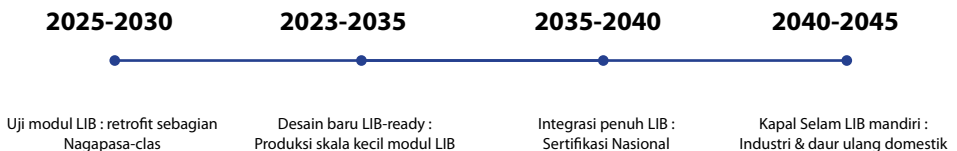
- Risiko Teknis: Thermal runaway, kegagalan BMS. Mitigasi: desain kompartemen modular, uji bertahap, sertifikasi internasional.
- Risiko Pasokan: Ketergantungan pada impor teknologi LIB. Mitigasi: pembangunan pabrik LIB domestik, joint venture dengan mitra asing.
- Risiko Finansial: Keterbatasan anggaran pertahanan. Mitigasi: pembiayaan multiyears, dukungan BUMN strategis.
- Risiko Geopolitik: Embargo atau ketegangan internasional.

Mitigasi : diversifikasi mitra strategis, penguatan industri lokal.

Dengan mitigasi yang tepat, Indonesia dapat merealisasikan visi memiliki armada kapal selam LIB modern dan mandiri pada tahun 2045.

Ilustrasi Roadmap

Roadmap Kapal Selam LIB Indonesia 2025 -2045



BAB IX – REKOMENDASI KEBIJAKAN

9.1 Pilihan Kebijakan

Untuk memastikan Indonesia dapat memanfaatkan teknologi Lithium-Ion Battery (LIB) dalam pembangunan kekuatan kapal selam, pemerintah memiliki beberapa opsi kebijakan strategis :

- Opsi A – Retrofit Terbatas.

Mengintegrasikan sebagian modul LIB ke dalam kapal selam eksisting (Nagapasa - class / Type 209). Tujuannya adalah melakukan uji coba terbatas di lingkungan operasional nyata. Keunggulan opsi ini adalah biaya yang lebih rendah, waktu implementasi relatif cepat, serta dapat menjadi sarana pembelajaran bagi TNI AL. Namun, dampaknya pada peningkatan kemampuan tempur relatif terbatas karena sistem lama masih mendominasi.

- Opsi B – Desain Baru LIB-Ready.

Kapal selam generasi baru hasil kerja sama PT PAL dengan mitra asing dirancang sejak awal untuk integrasi LIB. Opsi ini memberikan fleksibilitas: kapal dapat beroperasi dengan timbal-asam atau LIB penuh sesuai perkembangan teknologi dan biaya. Opsi ini relatif lebih moderat dari sisi risiko, dengan manfaat strategis jangka menengah.

- Opsi C – Integrasi Penuh LIB.

Indonesia membangun kapal selam baru dengan sistem LIB penuh, meniru model Jepang Taigei-class. Opsi ini memberikan lompatan kemampuan paling signifikan dalam endurance, fleksibilitas taktis, dan kecepatan operasi senyap. Namun, risiko teknis dan biaya sangat tinggi, sehingga membutuhkan kesiapan industri dan dukungan politik yang kuat²⁷.

9.2 Prioritas 3–5 Tahun

Dalam periode 2025–2030, pemerintah perlu menetapkan prioritas kebijakan realistis sebagai fondasi pembangunan jangka panjang. Beberapa langkah prioritas adalah :

27 Yamazaki, H., & Sato, T. (2021). Application of Lithium-Ion Batteries in Submarines: Safety and Performance.

1. Penguatan Riset & Inovasi Domestik.

BRIN, ITS, dan PT PAL harus diberi mandat memperkuat riset baterai LIB untuk aplikasi militer. Uji modul skala kecil harus dilakukan di laboratorium dan kapal uji.

2. Pembangunan Infrastruktur Pangkalan.

Modernisasi pangkalan kapal selam dengan fasilitas fast charging LIB, gudang penyimpanan baterai aman, serta fasilitas MRO khusus LIB. Lokasi strategis adalah Surabaya, Natuna, dan Bitung.

3. Alih Teknologi & Kontrak Strategis.

Negosiasi kontrak pengadaan kapal selam generasi baru harus mencakup skema offset dan transfer teknologi LIB & BMS. Tanpa hal ini, Indonesia akan tetap bergantung pada pemasok asing.

4. Kerangka Regulasi Nasional.

Pemerintah harus menyusun regulasi keselamatan LIB bawah laut, berbasis standar IEC 62619 dan IMO, serta mengadaptasikannya untuk kebutuhan militer.

5. Pengembangan SDM.

TNI AL dan industri strategis memerlukan program pendidikan teknis, kursus internasional, dan pelatihan awak kapal selam terkait operasi & penanganan LIB.

9.3 Kerangka Evaluasi

Implementasi roadmap perlu dipantau dengan kerangka evaluasi berbasis indikator kinerja:

- Technology Readiness Level (TRL) : mengukur kesiapan teknologi LIB untuk kapal selam (target TRL 8–9 pada 2040).
- Manufacturing Readiness Level (MRL) : menilai kemampuan produksi dalam negeri, termasuk kemampuan PT PAL dan industri baterai nasional.
- Operational Readiness: kesiapan TNI AL dalam mengoperasikan kapal selam LIB, termasuk kesiapan awak dan doktrin baru.

- Safety Compliance: pemenuhan standar keselamatan internasional (IMO, IEC) serta sertifikasi nasional (BKI).
- TKDN (Tingkat Komponen Dalam Negeri): kontribusi industri lokal terhadap rantai pasok. Target minimal 50% pada tahun 2040.

Evaluasi dilakukan setiap tahun oleh Kementerian Pertahanan bersama Bappenas, TNI AL, PT PAL, dan BRIN. Hasil evaluasi digunakan untuk penyesuaian strategi dan alokasi anggaran²⁸.

²⁸ 3. Bappenas. (2025). Indonesia Defense Industry Roadmap 2025–2045.

BAB X. PENUTUP

Pada akhirnya buku ini selesai dibuat dalam rangka memperingati HUT Hiu Kencana 2025, sebagai sumbangan pemikiran dan diharapkan dapat menjadi salah satu referensi dalam perencanaan dan Pembangunan kekuatan serta bermanfaat bagi warga Hiu Kencana, TNI, masyarakat dan bangsa Indonesia. Buku ini dapat diterbitkan atas dukungan Bapak Kepala Staf Angkatan Laut Laksamana TNI DR. Muhammad Ali dan Ketua Paguyuban Hiu Kencana Laksda TNI (Purn) Didi Setiadi serta masukan dari warga Hiu Kencana.

Semoga Allah selalu memberikan perlindungan kepada kita semua, TNI AL, bangsa dan Negara menuju Indonesia Emas 2045.

Jakarta, 12 September, 2025

Daftar Singkatan

- AIP : Air Independent Propulsion
- ALKI : Alur Laut Kepulauan Indonesia
- APBN : Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara
- ASW : Anti-Submarine Warfare
- Bappenas : Badan Perencanaan Pembangunan Nasional
- BKI : Biro Klasifikasi Indonesia
- BMS : Battery Management System
- BRIN : Badan Riset dan Inovasi Nasional
- BUMN : Badan Usaha Milik Negara
- CAPEX : Capital Expenditure
- CMS : Combat Management System
- CONOPS : Concept of Operations
- DC : Direct Current
- EMC : Electromagnetic Compatibility
- HUT : Hari Ulang Tahun
- IEC : International Electrotechnical Commission
- IMO : International Maritime Organization
- IR : Infrared
- ITB : Institut Teknologi Bandung
- ITS : Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- KRI : Kapal Perang Republik Indonesia

KSS : Korean Submarine (Program KSS-III)

LCC : Life Cycle Cost

LFP : Lithium Iron Phosphate

LIB : Lithium-Ion Battery

LTO : Lithium Titanate Oxide

MRL : Manufacturing Readiness Level

MRO : Maintenance, Repair, and Overhaul

NCA : Nickel Cobalt Aluminum

NMC : Nickel Manganese Cobalt

PT : Perseroan Terbatas

TKDN : Tingkat Komponen Dalam Negeri

TRL : Technology Readiness Level

UI : Universitas Indonesia

ZEEI : Zona Ekonomi Eksklusif Indonesia

Daftar Pustaka

1. Naval Group. (2023). *Scorpène Submarine with Lithium-Ion Batteries: Technical Brochure*. Paris: Naval Group.
2. Yamazaki, H., & Sato, T. (2021). Application of Lithium-Ion Batteries in Submarines: Safety and Performance. *Journal of Naval Engineering*, 45(3), 112-128.
3. BRIN. (2024). *Kajian Teknologi Baterai Lithium untuk Aplikasi Pertahanan*. Jakarta: Badan Riset dan Inovasi Nasional.
4. International Maritime Organization (IMO). (2020). *Guidelines for the Safe Use of Lithium Batteries on Ships*. London: IMO Publishing.
5. U.S. Department of Defense. (2022). *Military Handbook for Lithium-Ion Battery Safety*. Washington DC: DoD.
6. World Nuclear Association. (2022). *Comparison of Submarine Propulsion Technologies*. WNA Technical Reports.
7. PT PAL Indonesia. (2024). *Rencana Pengembangan Kapal Selam Nasional Berbasis Teknologi LIB*. Surabaya: PT PAL.
8. International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC 62619: Safety Requirements for Secondary Lithium Cells and Batteries, for Use in Industrial Applications*.
9. BloombergNEF. (2023). *Lithium-Ion Battery Cost and Supply Outlook*. New York: Bloomberg.
10. Bappenas. (2025). *Indonesia Defense Industry Roadmap 2025–2045*. Jakarta: Bappenas Publishing.



”TABAH SAMPAI AKHIR”

