

Penguatan Kapasitas Nasional dalam Teknologi Bawah Air: Analisis Kesenjangan, Ekosistem Inovasi, dan Roadmap 2026–2045

Muhsin Kahar

Program Studi Magister Teknik Kelautan, Universitas Hasanuddin
muhsinkahar@gmail.com

Abstract

Indonesia requires independent underwater-technology capabilities to support hydrographic survey, subsea infrastructure inspection, oceanographic research, environmental monitoring, search and rescue, and maritime defence. The initial manuscript identified technological gaps, limited laboratories, weak certification arrangements, human-resource constraints, and fragmented stakeholder collaboration. This revised study extends the analysis through a structured narrative review and policy analysis of national planning documents, international standards, and scientific literature on remotely operated vehicles (ROVs), autonomous underwater vehicles (AUVs), navigation, communication, safety, and technology commercialisation. The assessment is organised into six capability dimensions: mission demand, critical technologies, testing facilities, standardisation and assurance, human competencies, and industrial-governance ecosystems. The results indicate that the principal constraint is not merely the ability to build prototypes, but the absence of an end-to-end evidence chain linking user requirements, design, relevant-environment testing, qualification, certification, procurement, and life-cycle support. A national strategy should therefore shift from fragmented prototype projects towards mission-driven programmes supported by open-system architectures, a national network of test facilities, early off-takers, and a Triple Helix governance structure with clear programme ownership. A four-phase roadmap for 2026–2045 is proposed: foundation, integration, industrial scaling, and technology leadership. Each phase is controlled through decision gates and measurable indicators, including technology readiness, domestic content, failure-free operating hours, certified products, qualified personnel, and industrial contracts. The framework provides a basis for research programming, facility investment, procurement reform, and national underwater-technology industrial development.

Keywords: underwater technology, ROV, AUV, national capability, Triple Helix, technology qualification, roadmap.

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki kepentingan langsung terhadap penguasaan teknologi bawah air karena pembangunan kelautan mencakup pengelolaan sumber daya, pengembangan infrastruktur, perlindungan lingkungan, keselamatan, pertahanan, serta tata kelola ruang laut [1]. Kebijakan Kelautan Indonesia juga menempatkan ilmu pengetahuan dan teknologi sebagai salah satu pilar untuk mewujudkan tata kelola kelautan yang berdaulat, maju, dan berkelanjutan [2], sedangkan Rencana Aksi Kebijakan Kelautan Indonesia menuntut pelaksanaan program lintas kementerian/lembaga yang terukur [3]. Arah tersebut semakin relevan dalam RPJPN 2025–2045 dan RPJMN 2025–2029, yang menempatkan transformasi ekonomi, penguatan riset dan inovasi, ekonomi biru, serta peningkatan daya saing industri sebagai bagian dari agenda pembangunan nasional [4], [5].

Teknologi bawah air dalam artikel ini tidak dibatasi pada kendaraan robotik. Ruang lingkupnya mencakup platform ROV, AUV, underwater glider, sensor tetap, sonar, kamera, navigasi inersial dan akustik, komunikasi bawah air, pressure housing, sistem tenaga, command-and-control, pengolahan data, fasilitas pengujian, serta proses keselamatan dan sertifikasi. Seluruh unsur tersebut membentuk satu sistem sosio-teknis. Keberhasilan operasi suatu AUV, misalnya, tidak hanya ditentukan oleh bentuk lambung dan algoritma kontrol, tetapi juga reliabilitas konektor, ketahanan baterai, kualitas data navigasi, rencana pemulihan, kompetensi operator, dukungan kapal, perizinan area uji, serta bukti kelaikan sistem.

Naskah awal secara tepat menyoroti adanya kesenjangan antara kemampuan membuat purwarupa dan kemampuan menghadirkan produk yang dapat digunakan secara rutin oleh industri atau lembaga pemerintah. Persoalan tersebut berkaitan dengan mandat riset nasional [6], kelembagaan sistem ilmu pengetahuan dan teknologi [7], dan kapasitas ilmu kelautan yang secara global memang sangat bergantung pada infrastruktur, peralatan, tenaga ahli, pendanaan, dan mekanisme pertukaran teknologi [8]. Dalam banyak kasus, proyek berhenti setelah demonstrasi laboratorium karena tidak tersedia fasilitas untuk uji tekanan, endurance, korosi, electromagnetic compatibility, kalibrasi sensor, hardware-in-the-loop, serta sea trial yang berulang. Akibatnya, produk tidak memiliki evidence package yang cukup untuk sertifikasi, pengadaan, dan penerimaan pengguna.



Perkembangan global menunjukkan bahwa kendaraan bawah air semakin beralih dari platform tunggal menuju sistem yang terhubung, memiliki otonomi lebih tinggi, mampu menggunakan multi-sensor, serta dapat beroperasi dalam jangka lebih lama. Agenda United Nations Decade of Ocean Science 2021–2030 mendorong peningkatan pengetahuan, data, infrastruktur, dan kapasitas teknologi untuk menghasilkan ilmu laut yang dapat digunakan dalam pengambilan keputusan [9]. Pada saat yang sama, literatur AUV menegaskan bahwa navigasi, komunikasi, energi, persepsi lingkungan, docking, keselamatan, dan mission planning masih menjadi area teknologi kritis [17]–[26]. Indonesia perlu memilih titik masuk yang realistis agar tidak sekadar mengikuti tren teknologi, tetapi membangun kompetensi yang relevan dengan kebutuhan operasional nasional.

Penelitian ini bertujuan memperbaiki dan memperluas naskah awal melalui empat kontribusi. Pertama, artikel membangun taksonomi kapabilitas yang memisahkan kebutuhan misi, sistem, subsistem, fasilitas, kompetensi, dan tata kelola. Kedua, artikel menyusun analisis kesenjangan secara kualitatif tanpa mengklaim tingkat kesiapterapan nasional yang tidak didukung inventaris data publik. Ketiga, artikel merumuskan model operasional Triple Helix yang menghubungkan universitas/lembaga riset, industri/off-taker, serta pemerintah/badan standar dalam satu program berbasis misi. Keempat, artikel mengusulkan roadmap 2026–2045 yang dilengkapi gate keputusan, indikator kinerja, risiko implementasi, dan prioritas program.

LANDASAN KONSEPTUAL DAN RUANG LINGKUP

Taksonomi Teknologi Bawah Air

Underwater technology dapat dipahami sebagai kumpulan teknologi yang memungkinkan manusia melakukan sensing, intervention, communication, transport, dan decision-making di bawah permukaan air. ROV umumnya dikendalikan melalui tether dan cocok untuk inspeksi visual, manipulasi, serta pekerjaan intervensi yang membutuhkan komunikasi data real time. AUV beroperasi tanpa tether dan menjalankan misi berdasarkan perintah, sensor, dan algoritma yang ditanamkan. Glider menggunakan perubahan buoyancy untuk efisiensi energi dan cocok untuk observasi oseanografi jangka panjang. Sistem sensor tetap dan acoustic network melengkapi kendaraan bergerak dengan pengamatan kontinu.

Dari sudut pandang rekayasa sistem, platform adalah lapisan paling terlihat, tetapi nilai strategis justru banyak ditentukan oleh subsistem: pressure-resistant structure, sealing, propulsion, energy storage, power management, navigation, control, payload, communication, mission software, data processing, launch-and-recovery, dan maintenance. Literatur menunjukkan bahwa perkembangan AUV sangat dipengaruhi oleh kemajuan propulsion, sensor, komputasi, kontrol, navigasi, dan energi [19], sedangkan survei navigasi modern mengelompokkan pendekatan ke dalam dead reckoning, signal-based navigation, dan geophysical navigation [20]. Dengan demikian, kebijakan nasional tidak cukup menetapkan target “membuat AUV”, tetapi harus menentukan subsistem mana yang dikuasai, diintegrasikan, diproduksi, dan didukung dalam negeri.

Komunikasi bawah air memiliki keterbatasan mendasar. Jaringan akustik menghadapi bandwidth rendah, delay propagasi, multipath, fading, dan konsumsi energi [23]. Komunikasi optik menawarkan laju data lebih tinggi dengan latensi rendah, tetapi jangkauan sangat dipengaruhi absorpsi, scattering, dan kondisi kejernihan air [24]. Konsekuensinya, arsitektur komunikasi perlu bersifat hibrida dan disesuaikan dengan misi. Untuk inspeksi jarak dekat, optical link dapat digunakan; untuk komunikasi jarak lebih jauh, acoustic modem tetap dominan; sedangkan pemindahan data volume besar dapat dilakukan setelah docking atau recovery.

Sistem Inovasi, Triple Helix, dan Off-taker

Model Triple Helix memandang inovasi sebagai hasil interaksi universitas, industri, dan pemerintah, bukan sebagai proses linear dari penelitian menuju pasar [10]. Untuk teknologi bawah air, interaksi tersebut harus diwujudkan dalam pembagian peran yang konkret. Universitas dan lembaga riset menghasilkan konsep, model, algoritma, prototipe, serta talenta. Industri melakukan design-for-manufacture, integrasi sistem, produksi, quality assurance, maintenance, dan dukungan operasional. Pemerintah menetapkan misi, menyediakan fasilitas bersama, membangun standardisasi, mengatur pengadaan, serta mengurangi risiko awal pasar.

Kehadiran off-taker merupakan pembeda antara kolaborasi simbolik dan kolaborasi yang menghasilkan produk. Off-taker adalah pengguna awal yang menyediakan kebutuhan operasional nyata, data lingkungan, kriteria penerimaan, lokasi uji, personel operasi, dan peluang kontrak. Tanpa off-taker, spesifikasi mudah bergeser mengikuti minat periset, bukan kebutuhan misi. Praktik komersialisasi riset publik di berbagai negara juga menunjukkan pentingnya mekanisme lisensi, spin-off, collaborative research, demonstrator, dan procurement untuk menghubungkan pengetahuan publik dengan pemanfaatan ekonomi [11].

Tingkat Kesiapterapan dan Kualifikasi Teknologi



Technology Readiness Level (TRL) memberikan bahasa umum untuk menilai kematangan teknologi dari prinsip dasar sampai sistem terbukti dalam operasi. ISO 16290 mendefinisikan kriteria TRL agar penilaian tidak hanya bergantung pada opini [12]. Namun, TRL bukan satu-satunya ukuran. Sistem dapat memiliki TRL tinggi pada satu subsistem tetapi gagal di tingkat integrasi karena interface, software, operator, lingkungan, atau supply chain. Oleh karena itu, roadmap nasional harus menggabungkan TRL dengan manufacturing readiness, integration readiness, reliability growth, certification readiness, dan operational readiness.

Kualifikasi teknologi adalah proses menghasilkan bukti bahwa sistem mampu memenuhi requirement dalam lingkungan relevan dengan tingkat risiko yang dapat diterima. Untuk AUV, standar ISO 20682:2026 menempatkan risiko dan reliabilitas sebagai bagian penting dari desain dan operasi [13]. ISO 25451:2026 juga memberikan persyaratan dan pedoman pemetaan dasar laut menggunakan kendaraan laut tanpa awak, termasuk aspek navigasi, konfigurasi kendaraan, parameter survei, echo sounding, dan pengolahan data [14]. Perkembangan standar tersebut menunjukkan bahwa kemandirian teknologi bukan hanya persoalan membuat perangkat, melainkan kemampuan membuktikan performa, keselamatan, kualitas data, dan konsistensi operasi.

Standardisasi, Klasifikasi, dan Assurance

Assurance mencakup design review, risk assessment, verification, validation, testing, configuration control, software assurance, cybersecurity, dan audit kompetensi. Lembaga klasifikasi internasional telah menyediakan layanan klasifikasi dan sertifikasi untuk ROV, AUV, unmanned underwater systems, ocean monitoring systems, serta subsistem dan peralatan [15]. Di bidang hidrografi, standar IHO S-44 menekankan ketelitian, coverage, dan kemampuan mendeteksi fitur dasar laut sesuai kelas survei [16]. Hal ini menegaskan bahwa produk teknologi bawah air harus dinilai terhadap tujuan misi, bukan hanya terhadap kemampuan bergerak atau menyelam.



Gambar 1. Kerangka penelitian dan alur analisis.

Bagi Indonesia, penguatan BKI, laboratorium kalibrasi, badan standardisasi, lembaga pendidikan, dan pengguna akhir perlu dilakukan secara terkoordinasi. Standar nasional dapat mengadopsi atau memodifikasi standar internasional, tetapi harus tetap memperhatikan lingkungan tropis, tingkat kekeruhan, biofouling, arus lokal, logistik kepulauan, dan variasi kedalaman. Tujuannya bukan menciptakan persyaratan yang menghambat inovasi, melainkan menyediakan jalur penerimaan yang jelas dan proporsional terhadap risiko.

METODE PENELITIAN

Desain Kajian

Penelitian menggunakan structured narrative review dan policy analysis. Pendekatan ini dipilih karena tujuan penelitian bukan menghitung effect size, melainkan menyintesis bukti teknis, institusional, dan kebijakan yang berasal dari jenis sumber berbeda. Naskah awal digunakan sebagai basis untuk mempertahankan empat fokus utama: kesenjangan teknologi, fasilitas/sertifikasi/SDM, kolaborasi Triple Helix, dan roadmap nasional. Fokus tersebut kemudian diperluas menjadi kerangka kapabilitas end-to-end.

Sumber mencakup peraturan perundang-undangan dan dokumen perencanaan nasional; laporan lembaga internasional; standar ISO, IHO, dan praktik klasifikasi; serta artikel ilmiah mengenai AUV/ROV, navigasi, sensor fusion, komunikasi, docking, dan risk analysis. Rentang publikasi utama adalah 2000–2026, dengan beberapa sumber dasar yang lebih lama dipertahankan apabila masih relevan secara konseptual. Prioritas diberikan kepada dokumen resmi, standar, artikel jurnal peer-reviewed, dan buku referensi teknik.

Kerangka Analisis

Setiap sumber dikodekan secara kualitatif ke dalam enam dimensi: (1) kebutuhan misi dan permintaan pengguna; (2) sistem, subsistem, dan komponen kritis; (3) fasilitas pengujian dan sea trial; (4) standardisasi, keselamatan, dan assurance; (5) kompetensi serta jalur pengembangan SDM; dan (6) industri, pembiayaan, pengadaan, serta tata kelola. Temuan kemudian disintesis menjadi matriks kesenjangan, portofolio program, pembagian peran, dan roadmap. Penilaian “rendah–menengah–tinggi” digunakan hanya sebagai prioritas kualitatif berdasarkan konsekuensi operasional dan urgensi, bukan sebagai skor statistik nasional.

Batasan Penelitian

Kajian ini tidak menggunakan inventaris lengkap seluruh laboratorium, industri, produk, paten, personel, dan proyek teknologi bawah air di Indonesia karena basis data nasional yang konsisten dan terbuka belum tersedia. Oleh sebab itu, artikel tidak menyatakan secara kuantitatif bahwa seluruh kapasitas nasional berada pada TRL tertentu. Roadmap yang disusun merupakan kerangka strategis yang perlu dikalibrasi melalui audit kapabilitas nasional, survei pemangku kepentingan, dan workshop validasi. Selain itu, aspek sensitif terkait pertahanan dibahas pada tingkat kebijakan umum tanpa memasukkan data operasional atau spesifikasi terklasifikasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemetaan Kebutuhan Misi Nasional

Kapasitas teknologi sebaiknya dimulai dari mission pulls, bukan technology push. Mission pull berarti pengguna menetapkan masalah, kondisi operasi, output, ketelitian, endurance, risiko, dan batas biaya; tim riset dan industri kemudian memilih arsitektur teknologi. Tabel 1 menunjukkan contoh kelompok misi dan teknologi kritis. Daftar ini tidak dimaksudkan sebagai katalog final, tetapi sebagai dasar penyusunan portofolio nasional.

Tabel 1. Kelompok misi, kebutuhan operasional, dan teknologi kritis.

Kelompok misi	Kebutuhan operasional utama	Teknologi kritis	Pengguna awal potensial
Survei hidrografi dan pemetaan dasar laut	coverage tinggi, ketelitian posisi, kualitas data, operasi di perairan dangkal–dalam	multibeam/side-scan sonar, INS–DVL–USBL, mission planning, quality control	Pushidrosal, BRIN, KKP, pelabuhan, konsultan survei
Inspeksi infrastruktur subsea	visualisasi, deteksi anomali, pengukuran ketebalan, manipulasi ringan	ROV, imaging sonar, camera-lighting, NDT payload, tether management	operator migas, kabel telekomunikasi, energi lepas pantai
Oseanografi dan lingkungan	endurance, sampling, data time series, biaya operasi rendah	glider, sensor CTD/DO, acoustic network, data telemetry	BRIN, universitas, KKP, BMKG
Pencarian dan pertolongan	mobilisasi cepat, pencarian area, klasifikasi target, recovery surveillance, mine	observation ROV, side-scan sonar, positioning, command center	Basarnas, TNI AL, Bakamla, kepolisian perairan
Pertahanan dan keamanan	countermeasure, komunikasi aman, low observability	AUV, sonar, autonomy, secure communication, cooperative missions	TNI AL dan lembaga keamanan maritim
Konstruksi dan pemeliharaan	intervensi, tooling, force feedback, reliability tinggi	work-class ROV, manipulator, hydraulic power, subsea tooling	operator migas, kontraktor subsea, galangan dan integrator

Arsitektur Kapabilitas dan Titik Kegagalan Rantai Nilai

Hasil sintesis menunjukkan bahwa kapabilitas nasional harus dipandang sebagai lima lapisan yang saling tergantung: misi/pasar, sistem/platform, teknologi kritis, fasilitas/assurance, dan ekosistem pendukung. Gambar 2 memperlihatkan hubungan tersebut. Kegagalan pada lapisan bawah akan membatasi lapisan di atas. Sebagai contoh, desain AUV dapat selesai, tetapi tanpa pressure chamber dan prosedur sealing yang



tervalidasi, sistem tidak dapat memperoleh confidence untuk operasi lebih dalam. Demikian pula, produk dapat lulus uji teknis tetapi tidak digunakan apabila tidak ada skema pengadaan, dukungan suku cadang, dan jaminan keselamatan.

Ketertarikan impor perlu dianalisis pada tingkat fungsi dan interface, bukan sekadar daftar komponen. Thruster impor mungkin dapat diterima pada fase awal apabila interface mekanik, listrik, dan komunikasi dikuasai sehingga pemasok dapat diganti. Sebaliknya, ketergantungan pada mission software tertutup, protokol komunikasi proprietari, atau data format yang tidak dapat diakses dapat menciptakan lock-in jangka panjang. Karena itu, arsitektur sistem terbuka dan penguasaan interface control document harus menjadi kebijakan desain sejak fase fondasi.



Gambar 2. Arsitektur kapabilitas nasional teknologi bawah air.

Analisis Kesenjangan Prioritas

Matriks kesenjangan pada Tabel 2 disusun berdasarkan perbandingan antara kebutuhan sistem yang dapat dioperasikan secara berulang dengan pola masalah yang diidentifikasi dalam naskah awal dan literatur. Prioritas “sangat tinggi” diberikan pada faktor yang dapat menggagalkan keseluruhan program walaupun purwarupa tersedia.

Tabel 2. Matriks kesenjangan kapabilitas prioritas.

Dimensi	Kondisi masalah yang umum	Dampak	Prioritas penguatan
Requirement dan CONOPS	spesifikasi berasal dari fitur teknologi, bukan kebutuhan pengguna	prototipe tidak cocok dengan operasi dan kriteria penerimaan	Sangat tinggi
Pressure integrity dan sealing	uji kedalaman terbatas; evidence material dan sealing tidak konsisten	kebocoran, kehilangan sistem, risiko keselamatan	Sangat tinggi
Navigasi dan positioning	ketergantungan pada sensor impor dan integrasi ad hoc battery pack, BMS, thermal management, dan charging belum terintegrasi	drift posisi, data survei tidak memenuhi standar	Sangat tinggi
Energi dan endurance	bandwidth terbatas, protokol proprietari, data pipeline terpisah	misi pendek, kegagalan daya, risiko termal	Tinggi
Komunikasi dan data	pressure chamber, calibration, HIL, basin, dan sea trial tidak terhubung	kendali dan pengambilan keputusan tidak andal	Tinggi
Fasilitas uji	jalur penerimaan produk belum jelas dan tidak berbasis bukti bertahap	uji mahal, lambat, tidak dapat diulang	Sangat tinggi
Standardisasi/sertifikasi		pengguna enggan membeli dan mengoperasikan	Sangat tinggi

Dimensi	Kondisi masalah yang umum	Dampak	Prioritas penguatan
SDM dan operasi	kompetensi desain, pilot, technician, mission planner, safety officer terpisah	operasi tidak konsisten dan pengetahuan hilang	Tinggi
Supply chain dan MRO	komponen kritis, konfigurasi, spare part, dan dokumentasi tidak terkendali	downtime tinggi dan biaya siklus hidup tidak pasti	Tinggi
Pengadaan dan off-taker	kontrak membeli unit tanpa fase demonstrasi dan learning period	produk lokal kalah sebelum memperoleh rekam jejak	Sangat tinggi

Infrastruktur Laboratorium dan Jaringan Sea Trial

Pengembangan teknologi bawah air tidak memerlukan seluruh fasilitas berada dalam satu institusi. Model yang lebih efisien adalah national distributed test network: beberapa laboratorium memiliki spesialisasi berbeda tetapi menggunakan prosedur, format data, dan mekanisme booking yang terintegrasi. Fasilitas tersebut harus mendukung progression dari uji bahan dan komponen, uji subsistem, uji sistem, hingga sea trial. Kebutuhan fasilitas yang diusulkan ditampilkan pada Tabel 3.

Hyperbaric pressure chamber menjadi fasilitas kritis untuk menguji pressure housing, penetrator, connector, battery enclosure, dan sensor. Namun, pressure test saja tidak cukup. Sistem perlu diuji terhadap cyclic pressure, soak time, temperature, leakage, corrosion, vibration, shock, electromagnetic compatibility, dan long-duration operation. Untuk software dan autonomy, diperlukan simulator, hardware-in-the-loop, digital twin, fault injection, serta replay data. Sea trial perlu menggunakan koridor uji bertingkat: sheltered water untuk commissioning, coastal site untuk misi operasional menengah, dan deep-water site untuk qualification lebih lanjut.

Fasilitas harus memiliki governance yang memastikan traceability: identitas unit, konfigurasi, kalibrasi instrumen, prosedur, kondisi lingkungan, raw data, anomaly log, keputusan acceptance, dan lesson learned. Tanpa data tersebut, pengujian hanya menghasilkan demonstrasi visual dan sulit digunakan sebagai bukti sertifikasi atau pengadaan.

Tabel 3. Fasilitas inti dan bukti kualifikasi yang dihasilkan.

Fasilitas	Fungsi utama	Bukti yang dihasilkan	Model pengelolaan
Pressure chamber dan leak test	uji tekanan statik/siklik, sealing, penetrator, enclosure	pressure curve, leakage rate, inspection record, failure mode	pusat nasional/regional dengan akreditasi konsorsium universitas–BRIN–industri
Towing tank/maneuvering basin	drag, stability, control response, launch-recovery	hydrodynamic coefficient, trajectory, repeatability	laboratorium terakreditasi
Sensor calibration laboratory	kalibrasi CTD, pressure, compass, acoustic, camera	certificate, uncertainty budget, calibration traceability	laboratorium bersama industri
Electrical, battery, EMC laboratory	BMS, endurance, thermal, vibration, EMC	power profile, thermal margin, safety evidence	open test platform dengan data replay
Software/HIL testbed	mission software, navigation, control, fault injection	requirement coverage, test report, failure response	izin terpadu dan safety governance
Sea-trial corridor	uji lingkungan relevan dan operasi end-to-end	operating hours, recovery success, data quality, anomaly log	national underwater technology data trust
Data repository	penyimpanan konfigurasi, raw data, test evidence, lessons learned	digital evidence pack dan baseline kinerja	

Navigasi, Persepsi, Komunikasi, dan Otonomi



[Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Navigasi merupakan salah satu penentu keberhasilan AUV karena sinyal GNSS tidak tersedia saat kendaraan terendam. Sistem umumnya menggabungkan inertial navigation system, Doppler velocity log, depth sensor, compass, acoustic positioning, dan sensor berbasis lingkungan. Review positioning UUV menegaskan perlunya integrasi acoustic systems, inertial navigation, DVL, geophysical methods, dan sensor fusion [21]. Sensor fusion dan underwater SLAM berkembang untuk mengurangi drift dan meningkatkan persepsi lingkungan [22], tetapi performa sangat dipengaruhi kualitas kalibrasi, sinkronisasi waktu, noise, kondisi seabed, dan observability.

Strategi nasional sebaiknya tidak langsung mengejar otonomi paling kompleks. Prioritas awal adalah reliable autonomy: mission execution yang dapat diprediksi, geofence, abort logic, fault detection, health monitoring, safe state, dan recovery. Setelah evidence operasi terkumpul, kemampuan dapat ditingkatkan menuju adaptive path planning, cooperative AUV, dan swarm. Literatur path planning dan risk analysis menunjukkan bahwa peningkatan otonomi harus diiringi pemodelan risiko, validasi algoritma, dan monitoring keselamatan [25], [27], [28].

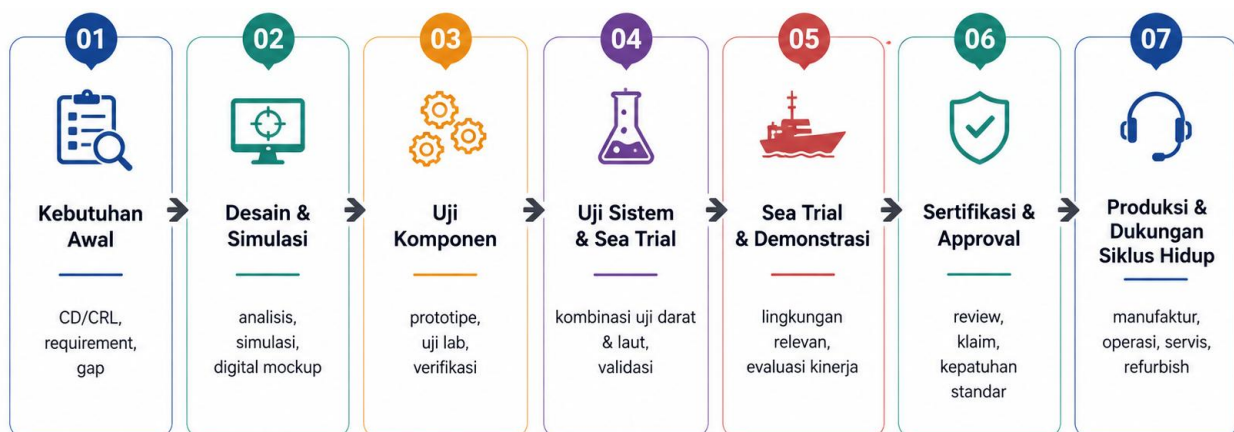
Pada komunikasi, pengembangan modem nasional perlu dilakukan bersama pengembangan protokol dan network management. Tantangan acoustic channel [23] dan keterbatasan optical communication [24] menunjukkan bahwa satu teknologi tidak dapat memenuhi semua misi. Program perlu menetapkan modular payload bay, software-defined interface, dan protocol gateway agar platform dapat menggabungkan acoustic, optical, RF-at-surface, satellite, atau tether sesuai kebutuhan.

Standardisasi, Sertifikasi, dan Model Assurance Bertahap

Produk lokal sering menghadapi dilema: pengguna meminta sertifikasi sebelum membeli, sementara sertifikasi membutuhkan biaya dan data operasi yang belum dimiliki. Solusinya adalah assurance bertahap berbasis risiko. Pada tahap pertama, assessor menilai requirement, design basis, material, interface, dan risk register. Tahap kedua mengevaluasi hasil uji komponen dan subsistem. Tahap ketiga menilai uji sistem di laboratorium dan sea trial. Tahap terakhir memberikan approval untuk operational envelope tertentu, bukan persetujuan tanpa batas.

ISO 20682:2026 menyediakan kerangka risiko dan reliabilitas AUV [13], sementara praktik klasifikasi DNV menunjukkan bahwa ROV, AUV, unmanned underwater systems, monitoring systems, dan subsistem dapat diklasifikasi atau disertifikasi melalui design assessment, testing, risk analysis, dan technical support [15]. Untuk misi hidrografi, kualitas output perlu diselaraskan dengan standar survei IHO dan persyaratan data [16]. Dengan pendekatan ini, sertifikasi menjadi instrumen pembelajaran dan peningkatan desain, bukan sekadar dokumen administratif.

BKI dapat mengambil peran sebagai national assurance integrator dengan bekerja bersama BSN, KAN, laboratorium, operator, universitas, dan lembaga internasional. Tahap awal dapat berupa guideline nasional untuk observation ROV, prosedur sea trial, kompetensi operator, serta acceptance test. Seiring meningkatnya kapabilitas, guideline dapat berkembang menjadi rules untuk AUV, work-class ROV, dan sistem monitoring bawah air.



Gambar 3. Tahapan kualifikasi dan hilirisasi teknologi berbasis evidence.

Kompetensi SDM dan Jalur Profesi

Teknologi bawah air membutuhkan tim multidisiplin. Kesenjangan SDM tidak dapat diselesaikan hanya dengan satu program studi baru. Pendekatan yang lebih realistis adalah competency framework yang menghubungkan pendidikan formal, microcredential, sertifikasi profesi, apprenticeship, dan pengalaman

operasi. Kompetensi juga harus dibedakan antara engineer, integrator, operator, technician, data specialist, dan safety/assurance personnel.

Pendidikan perlu menggabungkan teori dengan engineering evidence. Mahasiswa tidak cukup membuat prototipe untuk demonstrasi; mereka perlu belajar menyusun requirement, interface control, risk register, test plan, configuration baseline, calibration record, dan post-mission report. Industri dapat menyediakan problem statement, equipment loan, mentor, dan lokasi magang. Pemerintah dapat mendanai teaching factory, fellowship, dan sertifikasi.

Tabel 4. Kerangka kompetensi SDM teknologi bawah air.

Kelompok kompetensi	Kemampuan inti	Bentuk pengembangan	Bukti kompetensi
System engineer	requirement, architecture, interface, V&V, trade-off	magister/profesi, project-based learning, mentoring industri	system design review dan evidence pack
Mechanical/pressure engineer	pressure vessel, sealing, corrosion, materials, fabrication	kursus desain, workshop manufaktur, uji tekanan	qualified design dan test report
Electrical/power engineer	battery, BMS, power distribution, EMC, sensor interface	laboratory training dan vendor certification	endurance/thermal/EMC report
Navigation/control/software	INS/DVL/USBL, estimation, control, autonomy, simulation	research project, HIL, code review, field test	requirement coverage dan mission log
ROV/AUV operator	mission planning, piloting, recovery, emergency response	simulator, apprenticeship, sea time	logbook dan competency assessment
Technician/MRO	assembly, sealing, connector, troubleshooting, calibration	vocational programme, OEM training	maintenance task sign-off
Data and hydrography	data quality, sonar processing, uncertainty, metadata	IHO-aligned training, software practice	survey report dan QC evidence
Safety and assurance	risk assessment, FMEA, verification, audit, incident learning	professional certification dan assessor training	approved risk case/audit report

Model Operasional Triple Helix

Kebuntuan kolaborasi terjadi ketika setiap aktor hanya menjalankan fungsi tradisionalnya. Universitas mengejar publikasi, industri menunggu produk matang, dan pemerintah membiayai proyek tahunan yang terpisah. Model yang diusulkan mengubah hubungan tersebut menjadi programme partnership. Setiap program memiliki mission owner, technical authority, system integrator, lead laboratory, assessor, dan off-taker. Struktur ini menjaga akuntabilitas tanpa menghilangkan kontribusi berbagai institusi.

Gambar 4 menunjukkan bahwa pusat kolaborasi bukan rapat koordinasi, melainkan program bersama yang menghasilkan requirement, demonstrator, test campaign, certification evidence, procurement pathway, dan dukungan siklus hidup. Tabel 5 menjelaskan pembagian tanggung jawab utama.

Tabel 5. Pembagian tanggung jawab dalam programme partnership.

Fungsi	Universitas/BRIN	Industri/off-taker	Pemerintah/badan standar
Penetapan kebutuhan	analisis teknis dan feasibility	menyediakan use case, data, acceptance criteria	menetapkan misi prioritas dan pemilik program
Riset dan desain	model, algoritma, prototipe, eksperimen	design-for-manufacture, system integration	pendanaan multi-tahun dan akses fasilitas
Pengujian	test method, instrumentation, analysis	unit test, production test, sea trial operation	koridor uji, izin, akreditasi, safety oversight



Fungsi	Universitas/BRIN	Industri/off-taker	Pemerintah/badan standar
Assurance	evidence generation dan independent review	configuration control dan corrective action	standar, assessment, sertifikasi/approval
Hilirisasi	IP management, spin-off, training	produksi, MRO, warranty, supply chain	procurement, TKDN bertahap, insentif pasar awal
Pembelajaran	kurikulum, thesis, publication	apprenticeship dan lesson learned	national repository dan evaluasi program



Gambar 4. Model operasional Triple Helix teknologi bawah air.

Portofolio Program Prioritas 2026–2030

Fase fondasi perlu memusatkan sumber daya pada program yang memberi efek pengungkit. Terlalu banyak proyek kecil akan mengulang fragmentasi. Delapan program prioritas pada Tabel 6 dipilih karena membangun capability stack yang dapat digunakan oleh berbagai misi.

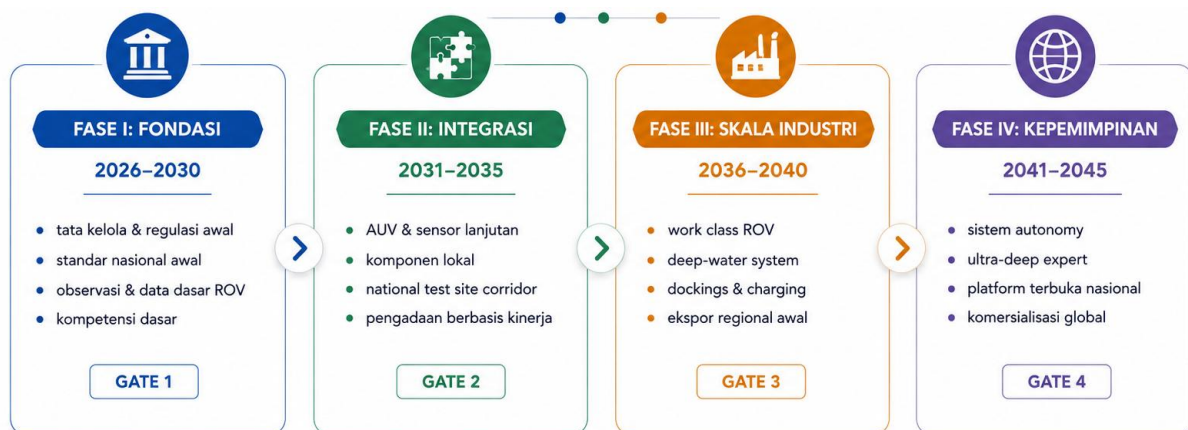
Tabel 6. Portofolio program prioritas fase fondasi.

Program prioritas	Output 2030	Lead yang disarankan	Indikator utama
National observation-class ROV	platform modular 300 m, payload standar, data interface terbuka	konsorsium universitas–BRIN–integrator	≥ 1.000 jam operasi kumulatif; availability terukur
AUV mapping demonstrator	AUV pemetaan coastal dengan INS/DVL/acoustic aiding	BRIN/universitas dan industri survei	data memenuhi acceptance criteria misi terpilih
Pressure and subsea component centre	pressure chamber, sealing qualification, connector and housing database	BRIN/BKI/universitas/industri	jumlah komponen qualified dan failure database
Underwater navigation and autonomy stack	middleware, estimator, mission manager, abort logic, simulator	universitas/BRIN/software integrator	test coverage, HIL hours, sea-trial success rate
Acoustic communication programme	modem, protocol, gateway, field channel database	universitas elektro, industri telekomunikasi	range-data-rate-energy map pada perairan Indonesia
National sea-trial corridor	sheltered, coastal, dan deep-water test zones	pemerintah daerah/lembaga maritim/BRIN	jumlah kampanye uji, safety performance, data reuse

Program prioritas	Output 2030	Lead yang disarankan	Indikator utama
Competency and certification scheme	role-based curriculum, operator/technician/assessor pathways	universitas, BNSP, BKI, industri	jumlah personel tersertifikasi dan sea-time
First-buyer procurement mechanism	kontrak demonstrasi, pilot operation, service-based procurement	kementerian/lembaga/BUMN pengguna	jumlah kontrak, local value, repeat order

Roadmap 2026–2045

Roadmap dibagi menjadi empat fase agar kenaikan ambisi mengikuti bukti kapabilitas. Setiap fase memiliki gate keputusan. Program hanya bergerak ke fase berikutnya apabila bukti teknis, operasional, industri, dan tata kelola memenuhi kriteria. Pendekatan ini mengurangi risiko target simbolik yang tidak didukung kemampuan aktual.



Gambar 5. Roadmap penguatan kapasitas nasional teknologi bawah air 2026–2045.

Fase I (2026–2030) berfokus pada fondasi: audit kapabilitas, fasilitas inti, platform observation ROV, AUV mapping demonstrator, standar uji awal, dan skema kompetensi. Fase II (2031–2035) berfokus pada integrasi: AUV semi-otonom, komponen lokal, test corridor, open architecture, serta procurement berbasis kinerja. Fase III (2036–2040) mendorong skala industri melalui work-class ROV, deep-water system, docking/charging, dan ekspor regional awal. Fase IV (2041–2045) menargetkan kepemimpinan teknologi pada swarm autonomy, ultra-deep-water, interoperabilitas data, dan komersialisasi global.

Roadmap tidak menetapkan kedalaman atau kandungan lokal sebagai satu-satunya ukuran. Sistem yang mampu menyelam dalam tetapi tidak andal, tidak memiliki data berkualitas, atau tidak dapat dipelihara di dalam negeri belum menunjukkan kemandirian. Oleh karena itu, KPI lintas fase harus mengukur reliability, availability, maintainability, data quality, certification, human competence, industrial contract, dan total cost of ownership.

Tabel 7. Milestone dan gate keputusan roadmap nasional.

Fase	Milestone teknis	Milestone ekosistem	Gate keputusan
I. Fondasi 2026–2030	ROV 300 m modular; AUV coastal demonstrator; fasilitas pressure/HIL/sea trial	guideline uji; skema kompetensi; first-buyer pilot; national inventory	requirement tervalidasi, evidence uji tersedia, ≥ 2 off-taker aktif
II. Integrasi 2031–2035	AUV semi-otonom; komponen kritis lokal; acoustic network; common software stack	standard nasional lanjutan; supply chain; procurement berbasis service/performance	reliability growth terbukti dan repeat order
III. Skala industri 2036–2040	work-class ROV; deep-water payload; docking/charging; multi-vehicle operation	Production Quality System; MRO network; ekspor regional awal	produk tersertifikasi, operasi komersial berulang, unit economics layak

Fase	Milestone teknis	Milestone ekosistem	Gate keputusan
IV. Kepemimpinan 2041–2045	ultra-deep-water; cooperative/swarm autonomy; integrated seabed observatory	platform terbuka nasional; international certification; global partnership	posisi pasar regional/global dan continuous innovation pipeline

Pembiayaan, Pengadaan, dan Model Bisnis

Pendanaan riset tahunan tidak sesuai untuk teknologi yang memerlukan siklus desain–uji–perbaikan berulang. Program prioritas perlu menggunakan pendanaan multi-tahun berbasis milestone. Pembayaran tidak hanya dikaitkan dengan laporan atau unit prototipe, tetapi dengan evidence: design review, test readiness review, hasil uji, corrective action closure, sea-trial hours, reliability growth, dan acceptance pengguna. Mekanisme ini tetap menjaga akuntabilitas karena setiap tahap memiliki deliverable objektif.

Pengadaan juga perlu membedakan pembelian produk komersial matang dan pengadaan inovasi. Untuk produk baru, pemerintah/BUMN dapat menggunakan pre-commercial procurement, challenge-based contract, pilot service, atau outcome-based procurement. Pengguna membeli kemampuan—misalnya pemetaan area dengan kualitas tertentu atau inspeksi panjang pipa tertentu—bukan sekadar membeli satu unit kendaraan. Model service-based procurement membantu produk lokal membangun jam operasi, data reliability, dan pendapatan berulang tanpa membebani pengguna dengan risiko kepemilikan awal.

Kebijakan kandungan lokal perlu bertahap dan berbasis fungsi. Pada fase awal, target dapat difokuskan pada desain sistem, struktur, enclosure, harness, software, integration, testing, dan MRO. Komponen yang belum ekonomis diproduksi dapat tetap diimpor, tetapi interface, data, dokumentasi, dan hak pemeliharaan harus dikuasai. Pada fase berikutnya, komponen dengan volume dan nilai strategis tinggi—thruster, acoustic modem, connector, pressure sensor, battery module—dapat diprioritaskan untuk substitusi.

Risiko Implementasi dan Strategi Mitigasi

Roadmap teknologi berisiko gagal apabila hanya disusun sebagai daftar target. Tabel 8 merangkum risiko implementasi dan mitigasi. Risk register perlu diperbarui pada tingkat program dan portofolio, serta dikaitkan dengan keputusan pendanaan.

Tabel 8. Risiko implementasi roadmap dan mitigasi.

Risiko	Mekanisme kegagalan	Mitigasi utama	Indikator dini
Fragmentasi kelembagaan	proyek dan fasilitas berjalan sendiri; duplikasi alat dan data	single programme owner, national inventory, shared test protocol	duplikasi belanja; rendahnya pemakaian fasilitas
Technology push	fitur tidak sesuai kebutuhan pengguna	CONOPS dan acceptance criteria ditandatangani off-taker sejak awal	perubahan requirement terlambat; pengguna pasif
Prototype trap	berhenti setelah demo tanpa reliability growth	multi-cycle test–fix–test, jam operasi target, corrective action closure	anomaly berulang; dokumentasi tidak lengkap
Import lock-in	interface dan software proprietari menghambat substitusi	open architecture, ICD, source escrow, data ownership	ketergantungan satu vendor; biaya lisensi meningkat
Safety incident	kegagalan baterai, tether, recovery, pressure housing	safety case, operational envelope, emergency/recovery plan	near miss tidak dilaporkan; bypass prosedur
SDM turnover	pengetahuan berada pada individu dan hilang saat personel pindah	configuration management, training pipeline, logbook, communities of practice	proyek berhenti saat key person keluar
Tidak ada pasar awal	produk tidak memperoleh rekam jejak dan kontrak	first-buyer procurement dan minimum pilot service	prototipe tersimpan; tidak ada repeat mission
Target terlalu ambisius	deep-water/swarm dikejar sebelum fondasi reliability	phase gate dan independent review	milestone teknis tanpa evidence operasional

Monitoring, Evaluasi, dan Data Nasional

Monitoring harus memisahkan input, output, outcome, dan impact. Jumlah dana, alat, atau publikasi adalah input/output; outcome adalah sistem yang digunakan, jam operasi, data berkualitas, personel kompeten, dan kontrak; impact adalah penurunan biaya impor, peningkatan kedaulatan data, keselamatan operasi, pertumbuhan industri, serta kontribusi pada ilmu kelautan dan ekonomi biru. Program yang banyak menghasilkan purwarupa tetapi tidak menghasilkan operasi berulang tidak dapat dinilai berhasil hanya berdasarkan output akademik.

Diperlukan National Underwater Technology Observatory berupa repositori terkurasi, bukan portal informasi biasa. Repositori menyimpan katalog fasilitas, kemampuan uji, produk, TRL beserta evidence, personel kompeten, proyek, paten, standar, sea-trial data, failure/anomaly database, dan peluang pengadaan. Data sensitif dapat diberi klasifikasi akses. Repositori memungkinkan pemerintah menghindari duplikasi, industri menemukan mitra, periset menggunakan data uji, dan assessor menilai rekam jejak.

Indikator utama yang disarankan adalah: (1) jumlah requirement yang berasal dari off-taker; (2) jumlah teknologi yang melewati gate dengan evidence lengkap; (3) jam operasi kumulatif dan mean time between critical failure; (4) keberhasilan launch–mission–recovery; (5) kualitas data terhadap standar misi; (6) kandungan nilai lokal dan kemampuan MRO; (7) jumlah personel kompeten; (8) produk tersertifikasi; (9) kontrak dan repeat order; serta (10) nilai ekspor atau substitusi impor.

Implikasi Strategis

Temuan utama kajian ini adalah bahwa kemandirian teknologi bukan kondisi biner antara “impor” dan “buatan dalam negeri”. Kemandirian adalah kemampuan nasional untuk menentukan requirement, menguasai arsitektur dan interface, mengevaluasi risiko, menghasilkan bukti kinerja, mengoperasikan, memperbaiki, memodifikasi, dan mengembangkan generasi berikutnya. Pada fase awal, penggunaan komponen impor dapat tetap rasional selama tidak menimbulkan lock-in dan digunakan untuk mempercepat pembelajaran sistem.

Strategi catch-up yang realistis perlu memilih niche misi dengan permintaan domestik kuat. Observation-class ROV, AUV pemetaan coastal, glider lingkungan, inspection payload, dan acoustic monitoring merupakan titik masuk yang lebih realistis daripada langsung mengejar sistem ultra-deep-water penuh. Jam operasi dan data yang dihasilkan dari niche tersebut akan membangun reliability culture, supply chain, kompetensi, dan kepercayaan pengguna. Setelah capability stack matang, sistem dapat ditingkatkan untuk misi yang lebih dalam dan kompleks.

Standar internasional baru untuk risiko/reliabilitas AUV dan pemetaan menggunakan kendaraan tanpa awak [13], [14] memberikan momentum bagi Indonesia untuk menyusun jalur kualifikasi sejak awal, bukan setelah produk selesai. Hal ini juga membuka peluang diplomasi standar: Indonesia dapat membawa pengalaman perairan tropis, kepulauan, arus kompleks, kekeruhan, biofouling, dan logistik terpencil ke forum standarisasi internasional. Kontribusi pada standar merupakan bentuk kedaulatan teknologi karena mempengaruhi cara performa dan keselamatan didefinisikan.

Akhirnya, roadmap harus dihubungkan dengan agenda ilmu laut dan ekonomi biru. Infrastruktur uji dan kendaraan yang dibangun untuk industri dapat sekaligus menghasilkan data oseanografi, bathymetry, habitat, dan lingkungan, selama governance data dirancang sejak awal. Sinergi ini mendukung peningkatan kapasitas ilmu kelautan sebagaimana ditekankan UNESCO-IOC [8], [9], sekaligus memperluas basis pengguna dan model bisnis teknologi nasional.

Rekomendasi Kebijakan

Program Nasional Teknologi Bawah Air perlu dibangun sebagai program berbasis misi dengan satu pemilik program, technical authority, serta mekanisme evaluasi independen. Pembagian program sebaiknya tidak didasarkan pada institusi, tetapi pada capability stack dan mission outcome yang ingin dicapai. Sebagai langkah awal, pada 2026–2027 perlu dilaksanakan audit kapabilitas nasional yang memetakan fasilitas, peralatan, produk, personel, proyek, paten, kontrak, standar, dan data operasi. Hasil audit harus menjadi baseline yang dapat diperbarui secara berkala sehingga mampu menunjukkan perkembangan kapabilitas nasional dari waktu ke waktu.

Penguatan infrastruktur perlu dilakukan melalui pembangunan distributed national test network yang mengintegrasikan pressure chamber, towing tank, maneuvering basin, calibration laboratory, hardware-in-the-loop (HIL), sea-trial corridor, dan data repository dengan prosedur serta format bukti yang konsisten. Proses pengembangan produk selanjutnya menerapkan assurance bertahap dan phase-gate procurement, sehingga persetujuan diberikan untuk operational envelope tertentu setelah produk menunjukkan bukti desain, hasil pengujian, reliability growth, kompetensi operator, dan recovery plan. Untuk mempercepat hilirisasi, minimal dua first-buyer programme perlu diterapkan pada observation ROV dan AUV pemetaan pesisir melalui skema

pilot service atau outcome-based procurement. Pendekatan ini memungkinkan produk memperoleh jam operasi nyata, data kinerja, dan umpan balik pengguna sebelum memasuki pasar yang lebih luas.

Pengembangan teknologi juga harus didukung oleh competency framework nasional bagi system engineer, pressure engineer, navigation/control engineer, operator, teknisi, hydrographic data specialist, dan assessor. Kurikulum pendidikan dan pelatihan perlu diarahkan pada kemampuan menghasilkan engineering evidence, bukan hanya purwarupa. Pada setiap proyek yang dibiayai publik juga perlu diterapkan persyaratan open architecture, interface control, data ownership, configuration management, dan cybersecurity untuk mengurangi vendor lock-in serta menjamin keberlanjutan pengembangan teknologi. Keberhasilan program pada akhirnya harus diukur berdasarkan outcome dan dampaknya, antara lain reliability, availability, data quality, jumlah produk tersertifikasi, local value, misi operasional, repeat order, dan export readiness, bukan semata-mata berdasarkan jumlah publikasi, purwarupa, atau kegiatan koordinasi.

KESIMPULAN

Penguatan kapasitas nasional dalam teknologi bawah air memerlukan perubahan paradigma dari pembangunan purwarupa menjadi pembangunan sistem kapabilitas. Kesenjangan utama tidak hanya terdapat pada kendaraan atau komponen, tetapi pada hubungan antara kebutuhan misi, arsitektur sistem, fasilitas uji, standarisasi, sertifikasi, SDM, supply chain, pengadaan, dan dukungan siklus hidup. Tanpa rantai evidence yang utuh, produk lokal sulit memperoleh kepercayaan pengguna meskipun demonstrasi awal berhasil.

Model Triple Helix yang efektif harus diwujudkan sebagai programme partnership: universitas/lembaga riset menghasilkan pengetahuan dan bukti teknis; industri mengintegrasikan, memproduksi, dan memelihara; pemerintah menetapkan misi, pendanaan, fasilitas bersama, standar, serta jalur pengadaan; dan off-taker memberikan kebutuhan operasional serta pasar awal. Struktur ini harus memiliki pemilik program tunggal dan gate keputusan yang transparan.

Roadmap 2026–2045 yang diusulkan terdiri atas fase fondasi, integrasi, skala industri, dan kepemimpinan teknologi. Keberhasilan setiap fase dinilai melalui TRL yang didukung bukti, reliability, jam operasi tanpa kegagalan kritis, data quality, kemampuan MRO, kandungan nilai lokal, kompetensi personel, sertifikasi, kontrak, dan repeat order. Dengan urutan prioritas yang realistis—dimulai dari observation ROV, AUV pemetaan coastal, fasilitas uji, navigasi/komunikasi, dan first-buyer procurement—Indonesia dapat membangun kemandirian secara bertahap sekaligus memberi kontribusi pada ilmu kelautan, ekonomi biru, keselamatan, dan kedaulatan maritim menuju 2045.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Republik Indonesia, Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2014 tentang Kelautan, Jakarta, Indonesia, 2014.
- [2] Republik Indonesia, Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 16 Tahun 2017 tentang Kebijakan Kelautan Indonesia, Jakarta, Indonesia, 2017.
- [3] Republik Indonesia, Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 34 Tahun 2022 tentang Rencana Aksi Kebijakan Kelautan Indonesia Tahun 2021–2025, Jakarta, Indonesia, 2022.
- [4] Republik Indonesia, Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 59 Tahun 2024 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional Tahun 2025–2045, Jakarta, Indonesia, 2024.
- [5] Republik Indonesia, Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2025 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional Tahun 2025–2029, Jakarta, Indonesia, 2025.
- [6] Republik Indonesia, Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2018 tentang Rencana Induk Riset Nasional Tahun 2017–2045, Jakarta, Indonesia, 2018.
- [7] Republik Indonesia, Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2019 tentang Sistem Nasional Ilmu Pengetahuan dan Teknologi, Jakarta, Indonesia, 2019.
- [8] Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Global Ocean Science Report 2020: Charting Capacity for Ocean Sustainability. Paris, France: UNESCO Publishing, 2020.
- [9] Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, The Science We Need for the Ocean We Want: United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021–2030) Implementation Plan. Paris, France: UNESCO, 2021.
- [10] H. Etzkowitz and L. Leydesdorff, “The dynamics of innovation: From national systems and ‘Mode 2’ to a Triple Helix of university–industry–government relations,” *Research Policy*, vol. 29, no. 2, pp. 109–123, 2000, doi: 10.1016/S0048-7333(99)00055-4.

- [11] Organisation for Economic Co-operation and Development, *Commercialising Public Research: New Trends and Strategies*. Paris, France: OECD Publishing, 2013, doi: 10.1787/9789264193321-en.
- [12] International Organization for Standardization, *ISO 16290:2013, Space Systems—Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and Their Criteria of Assessment*. Geneva, Switzerland: ISO, 2013.
- [13] International Organization for Standardization, *ISO 20682:2026, Autonomous Underwater Vehicles—Risk and Reliability*. Geneva, Switzerland: ISO, 2026.
- [14] International Organization for Standardization, *ISO 25451:2026, Ships and Marine Technology—Technical Requirements and Guidelines for Seafloor Mapping with Uncrewed Marine Vehicles*. Geneva, Switzerland: ISO, 2026.
- [15] DNV, “Unmanned underwater vehicles—Classification, certification and testing services,” DNV, Høvik, Norway, 2026. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/services/maritime-certification-materials-components/underwater-technology-services-1751/unmanned-underwater-vehicles-1710/>. Accessed: Aug. 2, 2026.
- [16] International Hydrographic Organization, *IHO Standards for Hydrographic Surveys, S-44*, 6th ed. Monaco: IHO, 2022.
- [17] J. Yuh, “Design and control of autonomous underwater robots: A survey,” *Autonomous Robots*, vol. 8, no. 1, pp. 7–24, 2000, doi: 10.1023/A:1008984701078.
- [18] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2021.
- A. Sahoo, S. K. Dwivedy, and P. S. Robi, “Advancements in the field of autonomous underwater vehicle,” *Ocean Engineering*, vol. 181, pp. 145–160, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.04.011.
- B. Zhang, D. Ji, S. Liu, X. Zhu, and W. Xu, “Autonomous underwater vehicle navigation: A review,” *Ocean Engineering*, vol. 273, Art. no. 113861, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.113861.
- C. Alexandris, P. Papageorgas, and D. Piromalis, “Positioning systems for unmanned underwater vehicles: A comprehensive review,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 21, Art. no. 9671, 2024, doi: 10.3390/app14219671.
- [19] F. F. R. Merveille, B. Jia, Z. Xu, and B. Fred, “Advancements in sensor fusion for underwater SLAM: A review on enhanced navigation and environmental perception,” *Sensors*, vol. 24, no. 23, Art. no. 7490, 2024, doi: 10.3390/s24237490.
- [20] F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, “Underwater acoustic sensor networks: Research challenges,” *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257–279, 2005, doi: 10.1016/j.adhoc.2005.01.004.
- [21] N. Saeed, A. Çelik, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Underwater optical wireless communications, networking, and localization: A survey,” *Ad Hoc Networks*, vol. 94, Art. no. 101935, 2019, doi: 10.1016/j.adhoc.2019.101935.
- [22] X. Chen, N. Bose, M. Brito, F. Khan, B. Thanyamanta, and T. Zou, “A review of risk analysis research for the operations of autonomous underwater vehicles,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 216, Art. no. 108011, 2021, doi: 10.1016/j.res.2021.108011.
- [23] Liu, F. Yu, B. He, and C. G. Soares, “A review of underwater docking and charging technology for autonomous vehicles,” *Ocean Engineering*, vol. 297, Art. no. 117154, 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.117154.
- [24] M. Brito and G. Griffiths, “A Bayesian approach for predicting risk of autonomous underwater vehicle loss during their missions,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 146, pp. 55–67, 2016, doi: 10.1016/j.res.2015.10.004.
- [25] C. A. Thieme and I. B. Utne, “Safety performance monitoring of autonomous marine systems,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 159, pp. 264–275, 2017, doi: 10.1016/j.res.2016.11.024.
- [26] S. B. Williams and I. Mahon, “Simultaneous localisation and mapping on the Great Barrier Reef,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 11, no. 3, pp. 37–46, Sep. 2004, doi: 10.1109/MRA.2004.1337824.
- [27] B. Jalving, K. Gade, O. K. Hagen, and K. Vestgård, “A toolbox of aiding techniques for the HUGIN AUV integrated inertial navigation system,” in *Proc. OCEANS 2003*, San Diego, CA, USA, 2003, pp. 1146–1153, doi: 10.1109/OCEANS.2003.178456.
- [28] International Maritime Organization, *Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process, MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2*. London, U.K.: IMO, 2018.
- [29] Biro Klasifikasi Indonesia, *Rules for Approval of Manufacturers and Service Suppliers*. Jakarta, Indonesia: BKI, 2024.