

RUDYCT ACADEMIC SERIES 2026

MASA DEPAN ILMU MARITIM

**Digitalisasi, AI, dan Visi Indonesia sebagai
Poros Maritim Dunia**

Prof. Ir. Rudy C. Tarumingkeng, PhD

www.ruduct.com/cv.pdf

Institut Bisnis dan Multimedia (IBM ASMI)

OCEAN DATA • TRUSTWORTHY AI • DIGITAL TWIN • MARITIME SOVEREIGNTY

RUDYCT ACADEMIC SERIES 2026

MASA DEPAN ILMU MARITIM

DIGITALISASI, AI, DAN VISI INDONESIA
SEBAGAI POROS MARITIM DUNIA



DIGITALISASI

AI

POROS MARITIM

- **OCEAN BIG DATA**

Satelit • sensor • robotika laut

- **TRUSTWORTHY AI**

Prediksi • digital twin • keputusan

- **VISI INDONESIA 2045**

Sains • ekonomi biru • kedaulatan

Prof. Ir. Rudy C. Tarumingkeng, PhD

IBM-ASMI (Institut Bisnis dan Multimedia)

www.rudycct.com/cv.pdf



Abstrak

Transformasi digital dan kecerdasan artifisial mengubah ilmu maritim dari kegiatan observasi yang terpisah menjadi sistem pengetahuan yang semakin real-time, prediktif, otonom, dan terhubung dengan keputusan. Artikel ini membahas arsitektur observasi laut, satelit, sensor cerdas, robotika, Ocean Big Data, komputasi awan-tepi, AI oseanografi, digital twin, eDNA, computer vision, bioakustik, perikanan dan akuakultur presisi, konservasi, smart port, pelayaran otonom, dekarbonisasi, keamanan siber, maritime domain awareness, etika, kedaulatan data, inovasi industri, pendidikan, diplomasi sains, serta peta jalan 2026-2045. Argumen utamanya adalah bahwa digitalisasi tidak boleh dinilai dari jumlah aplikasi atau perangkat, melainkan dari kemampuannya memperbaiki mutu bukti, kecepatan respons, keselamatan, produktivitas, kesehatan ekosistem, keadilan, dan kedaulatan. AI yang dapat dipercaya memerlukan data representatif, integrasi teori fisik, estimasi ketidakpastian, audit, human oversight, serta tata kelola hak dan manfaat. Visi Indonesia sebagai Poros Maritim Dunia akan lebih kredibel bila dibangun di atas kepemimpinan ilmu maritim tropis, infrastruktur data yang berdaulat namun interoperabel, industri teknologi laut, SDM lintas disiplin, dan diplomasi sains Indo-Pasifik.

Kunci: ilmu maritim; digitalisasi; kecerdasan artifisial; Ocean Big Data; Digital Twin Ocean; robotika laut; smart port; kedaulatan data; Poros Maritim Dunia; Indonesia.

Pendahuluan: Ketika Laut Menjadi Ruang Data

Laut selalu menghasilkan sinyal: perubahan suhu, gerak arus, warna air, suara organisme, pantulan radar, jejak kapal, dan susunan DNA dalam sampel. Dulu sebagian besar sinyal hanya dapat diamati sesaat melalui ekspedisi. Kini satelit, sensor murah, kendaraan otonom, jaringan komunikasi, dan komputasi memungkinkan laut dibaca sebagai aliran data. Perubahan ini memperluas skala ilmu, tetapi juga menciptakan ilusi bahwa lebih banyak data selalu berarti lebih banyak pengetahuan. Padahal data menjadi pengetahuan hanya setelah kualitas, konteks, teori, dan ketidakpastian dipahami.

AI mempercepat pengenalan pola, prediksi, klasifikasi, optimasi, dan interaksi dengan data. Dalam ilmu maritim, AI dapat membantu memperkirakan gelombang, mendeteksi kapal gelap, mengenali karang, mengoptimalkan pakan, atau mensimulasikan skenario pesisir. Namun model juga dapat gagal diam-diam ketika lingkungan berubah, sensor bergeser, atau kelompok tertentu tidak terwakili. Karena itu, masa depan bukan pilihan antara manusia dan mesin, melainkan desain pembagian kerja yang menempatkan mesin pada tugas berskala besar serta berulang, dan manusia pada perumusan tujuan, penilaian konteks, tanggung jawab, serta kebijaksanaan.

Bagi Indonesia, transformasi digital adalah agenda pembangunan dan kedaulatan. Negara kepulauan membutuhkan kemampuan melihat wilayahnya, menghubungkan pusat-pusat produksi, melindungi ekosistem, merespons bencana, dan bernegosiasi berdasarkan bukti. Jika data, model, sensor, cloud, dan tenaga ahli sepenuhnya bergantung pada pihak luar, kemampuan bertindak menjadi rapuh. Sebaliknya, kedaulatan tidak berarti menutup data. Kedaulatan berarti mampu memilih apa yang dibuka, dilindungi, dibagi, dan dikembangkan bersama berdasarkan kepentingan publik serta hukum.

1. Dari Ilmu Kelautan Konvensional menuju Ilmu Maritim Digital

Membahas dari ilmu kelautan konvensional menuju ilmu maritim digital berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka transformasi epistemik, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup survei kapal, observasi lapangan, model numerik, komputasi, dan AI. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk dari ilmu kelautan konvensional menuju ilmu maritim digital, nilai terbesar muncul ketika bukti, prediksi, dan tindakan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui kapal riset, satelit, buoy, laboratorium, dan pusat komputasi. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah data yang tersebar serta budaya kerja yang masih berpusat pada proyek. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun siklus observasi-data-model-keputusan yang berkesinambungan. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan dari ilmu kelautan konvensional menuju ilmu maritim digital bergantung pada kemampuan menghubungkan bukti, prediksi, dan tindakan. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus kapal riset, satelit, buoy, laboratorium, dan pusat komputasi sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

2. Indonesia sebagai Laboratorium Maritim Dunia

Membahas Indonesia sebagai laboratorium maritim dunia berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka keunggulan geografis, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup pertemuan dua samudra, dua benua, ribuan pulau, dan keragaman ekosistem. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk Indonesia sebagai laboratorium maritim dunia, nilai terbesar muncul ketika geografi, pengetahuan, dan pengaruh diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui Arus Lintas Indonesia, Coral Triangle, laut dalam, pulau kecil, dan selat strategis. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah potensi ilmiah belum sepenuhnya berubah menjadi kepemimpinan pengetahuan. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menjadikan wilayah Indonesia lokasi observasi kelas dunia dengan manfaat nasional. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan Indonesia sebagai laboratorium maritim dunia bergantung pada kemampuan menghubungkan geografi, pengetahuan, dan pengaruh. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus Arus Lintas Indonesia, Coral Triangle, laut dalam, pulau kecil, dan selat strategis sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

3. Arsitektur Observasi Laut Nasional

Membahas arsitektur observasi laut nasional berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka infrastruktur observasi, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup sensor in situ, penginderaan jauh, kapal, radar, glider, dan pengamatan masyarakat. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk arsitektur observasi laut nasional, nilai terbesar muncul ketika cakupan, kontinuitas, dan kualitas diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui BMKG, BRIN, KKP, TNI AL, perguruan tinggi, industri, dan komunitas. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah cakupan tidak merata, pemeliharaan lemah, dan standar yang berbeda. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun jaringan berlapis dengan prioritas risiko dan kebutuhan pengguna. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan arsitektur observasi laut nasional bergantung pada kemampuan menghubungkan cakupan, kontinuitas, dan kualitas. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus BMKG, BRIN, KKP, TNI AL, perguruan tinggi, industri, dan komunitas sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

4. Satelit dan Penginderaan Jauh

Membahas satelit dan penginderaan jauh berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka observasi dari angkasa, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup warna laut, suhu muka laut, tinggi muka laut, angin, kapal, mangrove, dan terumbu. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk satelit dan penginderaan jauh, nilai terbesar muncul ketika skala, frekuensi, dan validasi diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui zona penangkapan, tumpahan minyak, abrasi, dan pemutihan karang. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah awan tropis, resolusi, validasi lapangan, dan ketergantungan data eksternal. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menggabungkan satelit nasional, data terbuka, serta ground truth yang kuat. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan satelit dan penginderaan jauh bergantung pada kemampuan menghubungkan skala, frekuensi, dan validasi. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur dasar,

dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus zona penangkapan, tumpahan minyak, abrasi, dan pemutihan karang sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

5. Sensor Cerdas dan Internet of Underwater Things

Membahas sensor cerdas dan internet of underwater things berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka jaringan sensor laut, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup buoy, hidrofon, sensor kualitas air, modem akustik, dan edge computing. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk sensor cerdas dan internet of underwater things, nilai terbesar muncul ketika sensor, konektivitas, dan ketahanan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui teluk perkotaan, kawasan budidaya, pelabuhan, terumbu, dan laut dalam. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah komunikasi bawah air, energi, biofouling, korosi, serta biaya pemeliharaan. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah merancang jaringan modular yang tahan lingkungan dan dapat diperbaiki lokal. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan sensor cerdas dan internet of underwater things bergantung pada kemampuan menghubungkan sensor, konektivitas, dan ketahanan. Pemerintah menyediakan misi,

aturan, infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus teluk perkotaan, kawasan budidaya, pelabuhan, terumbu, dan laut dalam sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

6. Kapal Riset Generasi Baru

Membahas kapal riset generasi baru berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka platform penelitian, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup laboratorium bergerak, multibeam, CTD, akustik, sampling, dan telepresence. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk kapal riset generasi baru, nilai terbesar muncul ketika platform, misi, dan utilisasi diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui pemetaan dasar laut, oseanografi, biodiversitas, geologi, dan respons bencana. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah waktu kapal mahal, antrean misi, serta data yang terlambat diproses. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah mengelola armada sebagai fasilitas nasional dengan misi terbuka dan data cepat. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan kapal riset generasi baru bergantung pada kemampuan menghubungkan platform, misi, dan utilisasi. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur dasar, dan pengadaan

strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus pemetaan dasar laut, oseanografi, biodiversitas, geologi, dan respons bencana sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

7. Robotika Laut: AUV, ROV, USV, dan Glider

Membahas robotika laut: auv, rov, usv, dan glider berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka otonomi robotik, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup kendaraan bawah air, permukaan tanpa awak, wahana kendali jauh, dan glider. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk robotika laut: auv, rov, usv, dan glider, nilai terbesar muncul ketika otonomi, keselamatan, dan cakupan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui survei terumbu, inspeksi kabel, pemetaan palung, patroli, dan pencarian. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah navigasi tanpa GPS, komunikasi terbatas, keselamatan, dan yurisdiksi. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun armada robotik bertingkat dengan standar operasi dan pusat kendali. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan robotika laut: auv, rov, usv, dan glider bergantung pada kemampuan menghubungkan otonomi, keselamatan, dan cakupan. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus survei terumbu, inspeksi kabel, pemetaan palung, patroli, dan pencarian sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

8. Ocean Big Data dan Data Commons

Membahas ocean big data dan data commons berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka tata kelola data, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup volume, kecepatan, keragaman, kualitas, metadata, dan akses. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk ocean big data dan data commons, nilai terbesar muncul ketika keterbukaan, mutu, dan kepercayaan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui portal nasional, repositori riset, data operasional, dan data komunitas. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah silo lembaga, format tertutup, duplikasi, dan hilangnya data historis. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun commons data laut dengan prinsip FAIR dan kedaulatan data. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan ocean big data dan data commons bergantung pada kemampuan menghubungkan keterbukaan, mutu, dan kepercayaan. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus portal nasional, repositori riset, data operasional, dan data komunitas sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

9. Komputasi Awan, Tepi, dan Kinerja Tinggi

Membahas komputasi awan, tepi, dan kinerja tinggi berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka infrastruktur komputasi, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup cloud, edge, high-performance computing, kontainer, dan alur kerja ilmiah. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk komputasi awan, tepi, dan kinerja tinggi, nilai terbesar muncul ketika kapasitas, latensi, dan resiliensi diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui model cuaca laut, pengenalan citra, pelabuhan, kapal, dan pulau terpencil. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah latensi, biaya, vendor lock-in, kesenjangan jaringan, dan jejak energi. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menggunakan arsitektur hibrida sesuai sensitivitas dan kebutuhan real-time. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan komputasi awan, tepi, dan kinerja tinggi bergantung pada kemampuan menghubungkan kapasitas, latensi, dan resiliensi. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus model cuaca laut, pengenalan citra, pelabuhan, kapal, dan pulau terpencil sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

10. Kecerdasan Artifisial dalam Oseanografi

Membahas kecerdasan artifisial dalam oseanografi berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka AI ilmiah, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup machine learning, deep learning, physics-informed AI, dan surrogate models. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk kecerdasan artifisial dalam oseanografi, nilai terbesar muncul ketika akurasi, konsistensi fisik, dan ketidakpastian diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui prediksi arus, gelombang, suhu, klorofil, upwelling, dan ekstrem laut. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah bias data, overfitting, kurang interpretabilitas, dan pelanggaran hukum fisika. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menggabungkan pembelajaran data dengan teori, validasi, dan ketidakpastian. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan kecerdasan artifisial dalam oseanografi bergantung pada kemampuan menghubungkan akurasi, konsistensi fisik, dan ketidakpastian. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus prediksi arus, gelombang, suhu, klorofil, upwelling, dan ekstrem laut sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

11. AI untuk Prakiraan Laut dan Peringatan Dini

Membahas ai untuk prakiraan laut dan peringatan dini berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka prediksi operasional, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup nowcasting, ensemble, asimilasi data, deteksi anomali, dan komunikasi risiko. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk ai untuk prakiraan laut dan peringatan dini, nilai terbesar muncul ketika kecepatan, relevansi, dan tindakan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui gelombang tinggi, rob, badai, tsunami, harmful algal bloom, dan tumpahan minyak. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah peringatan tidak sampai kepada pengguna atau tidak diterjemahkan menjadi tindakan. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah mendesain layanan berbasis dampak yang diuji bersama masyarakat. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan ai untuk prakiraan laut dan peringatan dini bergantung pada kemampuan menghubungkan kecepatan, relevansi, dan tindakan. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus gelombang tinggi, rob, badai, tsunami, harmful algal bloom, dan tumpahan minyak sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

12. Computer Vision untuk Biodiversitas

Membahas computer vision untuk biodiversitas berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka visi komputer, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup klasifikasi spesies, segmentasi habitat, photogrammetry, dan pelacakan objek. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk computer vision untuk biodiversitas, nilai terbesar muncul ketika deteksi, validasi, dan skala diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui terumbu karang, ikan, megafauna, plankton, sampah, dan bentos. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah dataset tidak seimbang, kondisi cahaya, spesies lokal, dan false detection. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun dataset Indonesia yang terkurasi serta human-in-the-loop. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan computer vision untuk biodiversitas bergantung pada kemampuan menghubungkan deteksi, validasi, dan skala. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur dasar,

dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus terumbu karang, ikan, megafauna, plankton, sampah, dan bentos sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

13. Bioakustik dan AI untuk Mendengar Laut

Membahas bioakustik dan ai untuk mendengar laut berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka akustik pasif, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup suara paus, lumba-lumba, ikan, kapal, ledakan, dan kebisingan latar. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk bioakustik dan ai untuk mendengar laut, nilai terbesar muncul ketika sinyal, perilaku, dan perlindungan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui koridor mamalia laut, taman nasional, pelabuhan, dan kawasan migas. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah data audio sangat besar, sumber bertumpuk, serta kekurangan label. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah mengembangkan pustaka suara, sensor jangka panjang, dan model transparan. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan bioakustik dan ai untuk mendengar laut bergantung pada kemampuan menghubungkan sinyal, perilaku, dan perlindungan. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus koridor mamalia laut, taman nasional, pelabuhan, dan kawasan migas sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

14. eDNA, Omics, dan Bioinformatika Laut

Membahas edna, omics, dan bioinformatika laut berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka biologi digital, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup DNA lingkungan, genomik, metagenomik, transcriptomics, dan biobank. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk edna, omics, dan bioinformatika laut, nilai terbesar muncul ketika sampel, identitas, dan manfaat diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui mikroba, larva ikan, spesies invasif, organisme langka, dan bioprospecting. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah kontaminasi, referensi tak lengkap, kepemilikan sampel, dan pembagian manfaat. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun referensi genom laut Indonesia dengan protokol akses yang adil. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan edna, omics, dan bioinformatika laut bergantung pada kemampuan menghubungkan sampel, identitas, dan manfaat. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus mikroba, larva ikan, spesies invasif, organisme langka, dan bioprospecting sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

15. Digital Twin Ocean

Membahas digital twin ocean berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka representasi digital dinamis, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup observasi, model, AI, visualisasi 4D, dan skenario what-if. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk digital twin ocean, nilai terbesar muncul ketika realitas, simulasi, dan keputusan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui teluk, pelabuhan, kawasan konservasi, perikanan, dan kota pesisir. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah twin yang tampak meyakinkan tetapi tidak terkalibrasi atau tidak relevan bagi keputusan. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun twin bertahap dari kasus penggunaan prioritas dan audit ketidakpastian. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan digital twin ocean bergantung pada kemampuan menghubungkan realitas, simulasi, dan keputusan. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur dasar, dan pengadaan

strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus teluk, pelabuhan, kawasan konservasi, perikanan, dan kota pesisir sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

16. AI untuk Perikanan Berkelanjutan

Membahas ai untuk perikanan berkelanjutan berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka perikanan cerdas, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup estimasi stok, identifikasi tangkapan, electronic monitoring, pelacakan kapal, dan pasar. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk ai untuk perikanan berkelanjutan, nilai terbesar muncul ketika stok, kepatuhan, dan kesejahteraan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui WPP-NRI, tuna, rajungan, pelagis kecil, dan armada skala kecil. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah pengawasan berlebihan, kesenjangan nelayan kecil, data gelap, dan insentif salah. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menggunakan AI untuk kepatuhan sekaligus layanan dan perlindungan hak. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan ai untuk perikanan berkelanjutan bergantung pada kemampuan menghubungkan stok, kepatuhan, dan kesejahteraan. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus WPP-NRI, tuna, rajungan, pelagis kecil, dan armada skala kecil sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

17. Akuakultur Presisi

Membahas akuakultur presisi berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka budidaya cerdas, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup sensor air, kamera, pemberian pakan adaptif, diagnosis penyakit, dan prediksi panen. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk akuakultur presisi, nilai terbesar muncul ketika produktivitas, kesehatan, dan daya dukung diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui udang, ikan laut, rumput laut, kerang, dan integrated multi-trophic aquaculture. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah biaya adopsi, kegagalan sensor, ketergantungan platform, dan biosekuriti. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah mengembangkan teknologi tepat guna yang interoperabel dan dapat dirawat. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan akuakultur presisi bergantung pada kemampuan menghubungkan produktivitas, kesehatan, dan daya dukung. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur dasar,

dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus udang, ikan laut, rumput laut, kerang, dan integrated multi-trophic aquaculture sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

18. Konservasi Digital dan Kawasan Perlindungan

Membahas konservasi digital dan kawasan perlindungan berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka conservation technology, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup remote sensing, camera trap bawah air, drone, AIS, eDNA, dan dashboard. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk konservasi digital dan kawasan perlindungan, nilai terbesar muncul ketika bukti, perlindungan, dan legitimasi diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui MPA, OECM, habitat kritis, spesies migratori, dan restorasi. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah data pengawasan tidak diikuti penegakan atau partisipasi masyarakat. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menghubungkan teknologi dengan rencana pengelolaan, patroli, dan pembelajaran. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan konservasi digital dan kawasan perlindungan bergantung pada kemampuan menghubungkan bukti, perlindungan, dan legitimasi. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus MPA, OECM, habitat kritis, spesies migratori, dan restorasi sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

19. Restorasi Ekosistem Berbasis Data

Membahas restorasi ekosistem berbasis data berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka restorasi adaptif, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup pemetaan kesesuaian, monitoring, eksperimen, drone, dan analitik perubahan. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk restorasi ekosistem berbasis data, nilai terbesar muncul ketika proses, hasil, dan pembelajaran diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui mangrove, lamun, terumbu karang, rawa pasang surut, dan pantai. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah penanaman seragam, baseline lemah, serta klaim keberhasilan terlalu dini. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah mengutamakan pemulihan proses dan evaluasi jangka panjang. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan restorasi ekosistem berbasis data bergantung pada kemampuan menghubungkan proses, hasil, dan pembelajaran. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus mangrove, lamun, terumbu karang, rawa pasang surut, dan pantai sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

20. Smart Port dan Port Community System

Membahas smart port dan port community system berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka digitalisasi pelabuhan, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup single window, IoT, AI, otomasi, digital twin, dan visibilitas rantai pasok. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk smart port dan port community system, nilai terbesar muncul ketika interoperabilitas, efisiensi, dan keamanan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui Tanjung Priok, Tanjung Perak, Belawan, Makassar, dan pelabuhan pengumpan. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah silo data, proses buruk yang sekadar dipindahkan ke layar, dan serangan siber. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah meredesain proses end-to-end dengan identitas dan standar data bersama. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan smart port dan port community system bergantung pada kemampuan menghubungkan interoperabilitas, efisiensi, dan keamanan. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus Tanjung Priok, Tanjung Perak, Belawan, Makassar, dan pelabuhan pengumpan sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

21. Pelayaran Cerdas dan Kapal Otonom

Membahas pelayaran cerdas dan kapal otonom berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka autonomous shipping, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup navigasi, sensor fusion, remote operation, decision support, dan MASS. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk pelayaran cerdas dan kapal otonom, nilai terbesar muncul ketika otonomi, keselamatan, dan akuntabilitas diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui kapal niaga, feri, kapal perintis, patroli, dan survei. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah tanggung jawab hukum, human factors, keamanan siber, dan transisi pelaut. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah mengadopsi otomasi bertingkat dengan manusia tetap bertanggung jawab. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan pelayaran cerdas dan kapal otonom bergantung pada kemampuan menghubungkan otonomi, keselamatan, dan akuntabilitas. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus kapal niaga, feri, kapal perintis, patroli, dan survei sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

22. AI untuk Dekarbonisasi Maritim

Membahas ai untuk dekarbonisasi maritim berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka maritim rendah karbon, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup optimasi rute, kecepatan, trim, mesin, pelabuhan, dan bahan bakar alternatif. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk ai untuk dekarbonisasi maritim, nilai terbesar muncul ketika efisiensi, emisi, dan transisi adil diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui biofuel, metanol, amonia, hidrogen, shore power, dan koridor hijau. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah rebound effect, data emisi lemah, serta optimasi yang memindahkan beban. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menggunakan analisis siklus hidup dan optimasi lintas kapal-pelabuhan. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan ai untuk dekarbonisasi maritim bergantung pada kemampuan menghubungkan efisiensi, emisi, dan transisi adil. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus biofuel, metanol, amonia, hidrogen, shore power, dan koridor hijau sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

23. Keamanan Siber Maritim

Membahas keamanan siber maritim berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka ketahanan digital, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup kapal, pelabuhan, satelit, GNSS, OT, IT, dan rantai pasok perangkat lunak. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk keamanan siber maritim, nilai terbesar muncul ketika kerahasiaan, integritas, dan ketersediaan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui terminal peti kemas, vessel traffic service, kapal, dan pusat data. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah ransomware, spoofing, gangguan navigasi, akses pihak ketiga, dan budaya keamanan rendah. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menerapkan zero trust, segmentasi, latihan, backup, dan pelaporan insiden. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan keamanan siber maritim bergantung pada kemampuan menghubungkan kerahasiaan, integritas, dan ketersediaan. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur dasar, dan

pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus terminal peti kemas, vessel traffic service, kapal, dan pusat data sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

24. Maritime Domain Awareness Berbasis AI

Membahas maritime domain awareness berbasis ai berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka kesadaran domain maritim, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup AIS, radar, satelit, citra, intelijen, sensor pesisir, dan laporan masyarakat. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk maritime domain awareness berbasis ai, nilai terbesar muncul ketika deteksi, atribusi, dan respons diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui Natuna Utara, Selat Malaka, ALKI, perbatasan, dan kawasan konservasi. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah false positives, kapal gelap, fragmentasi lembaga, serta risiko pengawasan. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun fusi data dengan aturan penggunaan dan audit yang jelas. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan maritime domain awareness berbasis ai bergantung pada kemampuan menghubungkan deteksi, atribusi, dan respons. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus Natuna Utara, Selat Malaka, ALKI, perbatasan, dan kawasan konservasi sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

25. AI, Hukum Laut, dan Yurisdiksi Digital

Membahas ai, hukum laut, dan yurisdiksi digital berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka hukum teknologi maritim, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup UNCLOS, data lintas batas, kendaraan otonom, bukti digital, dan tanggung jawab. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk ai, hukum laut, dan yurisdiksi digital, nilai terbesar muncul ketika aturan, bukti, dan legitimasi diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui MASS, drone laut, survei ZEE, kabel bawah laut, dan cloud lintas negara. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah teknologi bergerak lebih cepat daripada aturan dan praktik penegakan. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah mengembangkan regulasi adaptif, sandbox, standar bukti, dan diplomasi teknis. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan ai, hukum laut, dan yurisdiksi digital bergantung pada kemampuan menghubungkan aturan, bukti, dan legitimasi. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur dasar,

dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus MASS, drone laut, survei ZEE, kabel bawah laut, dan cloud lintas negara sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

26. Etika AI dan Keadilan Data Laut

Membahas etika ai dan keadilan data laut berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka etika digital, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup fairness, transparansi, privasi, consent, hak adat, dan pembagian manfaat. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk etika ai dan keadilan data laut, nilai terbesar muncul ketika hak, representasi, dan akuntabilitas diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui pemetaan wilayah adat, data nelayan, genom laut, dan pengawasan kapal. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah data komunitas diekstraksi tanpa kendali atau manfaat yang setara. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menerapkan data stewardship, social license, dan mekanisme keberatan. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan etika AI dan keadilan data laut bergantung pada kemampuan menghubungkan hak, representasi, dan akuntabilitas. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus pemetaan wilayah adat, data nelayan, genom laut, dan pengawasan kapal sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

27. Kedaulatan Data dan Infrastruktur Kritis

Membahas kedaulatan data dan infrastruktur kritis berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka kedaulatan digital, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup pusat data, kabel bawah laut, satelit, model dasar, chip, cloud, dan standar. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk kedaulatan data dan infrastruktur kritis, nilai terbesar muncul ketika kendali, interoperabilitas, dan redundansi diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui kabel antarpulau, gateway satelit, pusat komputasi, dan model maritim nasional. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah ketergantungan vendor, pembatasan akses, dan gangguan geopolitik. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun portofolio kemampuan domestik serta kemitraan yang beragam. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan kedaulatan data dan infrastruktur kritis bergantung pada kemampuan menghubungkan kendali, interoperabilitas, dan redundansi. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus kabel antarpulau, gateway satelit, pusat komputasi, dan model maritim nasional sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

28. Inovasi, Startup, dan Industri Teknologi Laut

Membahas inovasi, startup, dan industri teknologi laut berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka ekosistem inovasi, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup riset, prototipe, sertifikasi, pengadaan, modal sabar, dan pasar awal. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk inovasi, startup, dan industri teknologi laut, nilai terbesar muncul ketika penemuan, validasi, dan skala diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui sensor, robot, perangkat lunak, bioteknologi, energi, dan layanan data. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah lembah kematian, spesifikasi pengadaan kaku, dan skala pasar terfragmentasi. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun testbed, challenge fund, standardisasi, dan first buyer pemerintah. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan inovasi, startup, dan industri teknologi laut bergantung pada kemampuan menghubungkan penemuan, validasi, dan skala. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus sensor, robot, perangkat lunak, bioteknologi, energi, dan layanan data sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

29. Pendidikan Maritim pada Era AI

Membahas pendidikan maritim pada era ai berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka transformasi pendidikan, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup oseanografi, data science, teknik, kebijakan, bisnis, etika, dan komunikasi. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk pendidikan maritim pada era ai, nilai terbesar muncul ketika kompetensi, praktik, dan pembelajaran sepanjang hayat diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui universitas, politeknik, sekolah pelaut, balai latihan, dan industri. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah kurikulum terpisah, akses komputasi tidak merata, dan cepat usangnya keterampilan. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun program lintas disiplin dengan proyek nyata serta microcredentials. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan pendidikan maritim pada era ai bergantung pada kemampuan menghubungkan kompetensi, praktik, dan pembelajaran sepanjang hayat. Pemerintah menyediakan misi,

aturan, infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus universitas, politeknik, sekolah pelaut, balai latihan, dan industri sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

30. Masa Depan Pekerjaan Maritim

Membahas masa depan pekerjaan maritim berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka transformasi tenaga kerja, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup pelaut, nelayan, teknisi, analis, ahli data, operator robot, dan pengelola ekosistem. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk masa depan pekerjaan maritim, nilai terbesar muncul ketika produktivitas, martabat, dan mobilitas diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui remote operations center, smart port, akuakultur, riset, dan konservasi. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah otomasi menggeser tugas, memperlebar kesenjangan, dan menciptakan risiko transisi. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menjalankan reskilling, sertifikasi modular, serta perlindungan sosial adaptif. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan masa depan pekerjaan maritim bergantung pada kemampuan menghubungkan produktivitas, martabat, dan mobilitas. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus remote operations center, smart port, akuakultur, riset, dan konservasi sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

31. Citizen Science dan Demokratisasi Ilmu Laut

Membahas citizen science dan demokratisasi ilmu laut berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka sains partisipatif, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup pengamatan masyarakat, aplikasi, sensor murah, pengetahuan lokal, dan komunikasi. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk citizen science dan demokratisasi ilmu laut, nilai terbesar muncul ketika partisipasi, kualitas, dan kepemilikan diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui nelayan, penyelam, sekolah pesisir, komunitas adat, dan wisatawan. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah mutu data, kelelahan relawan, ekstraksi pengetahuan, dan umpan balik lemah. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah mendesain kemitraan dua arah dengan validasi dan manfaat lokal. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan citizen science dan demokratisasi ilmu laut bergantung pada kemampuan menghubungkan partisipasi, kualitas, dan kepemilikan. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus nelayan, penyelam, sekolah pesisir, komunitas adat, dan wisatawan sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

32. Pembiayaan Infrastruktur Ilmu Maritim

Membahas pembiayaan infrastruktur ilmu maritim berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka ekonomi pengetahuan, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup anggaran publik, dana abadi, blended finance, pengadaan layanan, dan data as infrastructure. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk pembiayaan infrastruktur ilmu maritim, nilai terbesar muncul ketika investasi, pemeliharaan, dan manfaat publik diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui kapal riset, sensor, pusat data, twin, laboratorium, dan pelatihan. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah belanja modal tanpa operasi-pemeliharaan dan proyek pendek yang tidak berlanjut. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membiayai total life-cycle cost dan hasil pengetahuan jangka panjang. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan pembiayaan infrastruktur ilmu maritim bergantung pada kemampuan menghubungkan investasi, pemeliharaan, dan manfaat publik. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus kapal riset, sensor, pusat data, twin, laboratorium, dan pelatihan sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

33. Diplomasi Sains dan Indo-Pasifik

Membahas diplomasi sains dan indo-pasifik berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka diplomasi maritim, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup observasi bersama, data, standardisasi, transfer teknologi, dan respons bencana. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk diplomasi sains dan indo-pasifik, nilai terbesar muncul ketika kerja sama, otonomi, dan pengaruh diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui ASEAN, IOC-WESTPAC, Samudra Hindia, Pasifik, dan Coral Triangle Initiative. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah kompetisi strategis, data sensitif, ketimpangan kemampuan, dan agenda donor. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menjalankan open science selektif dengan kepentingan nasional yang jelas. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan diplomasi sains dan indo-pasifik bergantung pada kemampuan menghubungkan kerja sama, otonomi, dan pengaruh. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus ASEAN, IOC-WESTPAC, Samudra Hindia, Pasifik, dan Coral Triangle Initiative sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

34. Model Kelembagaan untuk Misi Maritim Digital

Membahas model kelembagaan untuk misi maritim digital berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka tata kelola misi, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup mandat, arsitektur perusahaan, data steward, chief scientist, dan evaluasi. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk model kelembagaan untuk misi maritim digital, nilai terbesar muncul ketika mandat, koordinasi, dan hasil diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui KKP, BRIN, BMKG, BIG, TNI AL, Bakamla, kampus, dan industri. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah ego sektoral, proyek aplikasi ganda, serta indikator keluaran yang lemah. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah membangun satu peta hasil tanpa menciptakan superlembaga baru. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan model kelembagaan untuk misi maritim digital bergantung pada kemampuan menghubungkan mandat, koordinasi, dan hasil. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur

dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus KKP, BRIN, BMKG, BIG, TNI AL, Bakamla, kampus, dan industri sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

35. Indonesia sebagai Poros Maritim Dunia

Membahas Indonesia sebagai poros maritim dunia berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka strategi nasional, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup konektivitas, sains, industri, lingkungan, diplomasi, keamanan, dan budaya. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk Indonesia sebagai poros maritim dunia, nilai terbesar muncul ketika kapabilitas, kredibilitas, dan pengaruh diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui pelabuhan, armada, observatorium, ekosistem sehat, dan SDM unggul. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah slogan besar tidak selalu diterjemahkan menjadi kapabilitas dan prioritas. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah menjadikan kepemimpinan pengetahuan sebagai inti kekuatan maritim. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan Indonesia sebagai poros maritim dunia bergantung pada kemampuan menghubungkan kapabilitas, kredibilitas, dan pengaruh. Pemerintah menyediakan misi, aturan,

infrastruktur dasar, dan pengadaan strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus pelabuhan, armada, observatorium, ekosistem sehat, dan SDM unggul sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

36. Peta Jalan 2026-2045

Membahas peta jalan 2026-2045 berarti membahas perubahan pada cara manusia mengetahui laut. Dalam kerangka transformasi bertahap, teknologi bukan sekadar alat baru, melainkan bagian dari sistem produksi pengetahuan yang mencakup fondasi data, platform nasional, aplikasi prioritas, skala industri, dan kepemimpinan global. Sistem tersebut menentukan apa yang dapat dilihat, seberapa cepat anomali diketahui, siapa yang dapat mengakses bukti, dan keputusan apa yang mungkin diambil. Laut bersifat dinamis, luas, tiga dimensi, mahal diamati, dan penuh ketidakpastian. Digitalisasi memperluas jangkauan pengamatan, sedangkan AI membantu menemukan pola yang sukar terlihat. Namun pengetahuan yang lebih cepat tidak otomatis menjadi kebijakan yang lebih baik apabila kualitas data, kompetensi, legitimasi, dan mekanisme akuntabilitas tidak dibangun bersamaan.

Transformasi digital perlu dibedakan menjadi tiga lapisan. Lapisan pertama adalah digitization, yakni mengubah sinyal atau catatan analog menjadi data digital. Lapisan kedua ialah digitalization, yaitu merancang ulang alur kerja agar data mengalir antarproses. Lapisan ketiga adalah transformation, ketika organisasi mengubah mandat, insentif, kompetensi, dan model layanannya berdasarkan kemampuan baru. Banyak program berhenti pada lapisan pertama: formulir menjadi aplikasi, tetapi keputusan tetap lambat dan data tidak terhubung. Untuk peta jalan 2026-2045, nilai terbesar muncul ketika tahapan, ukuran, dan koreksi diperlakukan sebagai satu rantai nilai pengetahuan, dari observasi hingga tindakan dan pembelajaran.

Indonesia memiliki ruang penerapan yang sangat kaya melalui fase 2026-2030, 2031-2035, 2036-2040, dan 2041-2045. Keanekaragaman kondisi ini memungkinkan pengujian teknologi pada laut dangkal dan dalam, kota pesisir dan pulau kecil, wilayah industri dan konservasi. Akan tetapi, keragaman juga menciptakan tantangan generalisasi. Model yang akurat di satu teluk belum tentu bekerja di teluk lain; sensor yang tahan di perairan jernih dapat cepat rusak di perairan produktif; algoritma yang dilatih dengan data negara subtropis dapat bias ketika diterapkan di Coral Triangle. Karena itu, Indonesia harus menjadi produsen dataset, benchmark, model, dan standar maritim tropis, bukan hanya pengguna akhir solusi yang dirancang dari konteks ekologis serta sosial yang berbeda.

Masalah pokoknya adalah jarak antara ambisi, anggaran, kapasitas manusia, dan disiplin implementasi. Hambatan tersebut mempunyai dimensi teknis dan kelembagaan. Data dapat hilang karena metadata buruk, tetapi juga karena kontrak tidak mengatur penyerahan; sensor dapat gagal akibat korosi, tetapi juga karena anggaran pemeliharaan tidak tersedia; model dapat bias karena distribusi sampel, tetapi juga karena kelompok terdampak tidak terlibat menentukan pertanyaan. Analisis yang matang perlu memeriksa seluruh siklus hidup: perumusan masalah, pengumpulan, penyimpanan, pelabelan, pemodelan, validasi, penerapan, pemantauan, dan penghentian. Setiap tahap memiliki risiko, pemilik, serta kontrol yang berbeda.

Respons strategis yang disarankan adalah mengurutkan investasi menurut ketergantungan, risiko, serta manfaat publik. Pendekatan ini dimulai dari kasus penggunaan yang mempunyai pemilik keputusan, garis dasar, manfaat publik, dan konsekuensi kegagalan yang jelas. Teknologi kemudian dipilih berdasarkan kebutuhan, bukan karena sedang populer. Arsitektur harus modular, berstandar terbuka, dapat diaudit, dan mempunyai rencana keluar dari vendor. Untuk sistem berisiko tinggi, keputusan otomatis harus dibatasi dan menyediakan jalur human override. Kinerja diukur melalui kualitas keputusan, waktu respons, pengurangan biaya atau risiko, serta distribusi manfaat; bukan sekadar jumlah sensor, akun, dashboard, atau model yang dibuat.

AI di bidang ini harus dipahami sebagai kombinasi data, algoritma, komputasi, pengetahuan domain, dan pengaturan manusia. Model tidak mengetahui laut secara langsung; model belajar dari representasi laut yang terdapat dalam data. Jika data jarang, tidak seimbang, atau berubah karena iklim dan perilaku manusia, akurasi historis dapat menyesatkan. Praktik yang baik membutuhkan validasi out-of-distribution, estimasi ketidakpastian, dokumentasi model, pengujian silang wilayah, serta monitoring drift. Physics-informed learning dan model hibrida dapat mempersempit ruang solusi, tetapi tetap membutuhkan pengukuran lapangan serta penilaian ahli. Tujuannya bukan mengganti ilmuwan, melainkan memperbesar kapasitas ilmuwan untuk merumuskan pertanyaan, menguji hipotesis, dan mengelola bukti dalam skala baru.

Implikasi sosialnya tidak boleh dipisahkan dari desain teknologi. Digitalisasi dapat memperluas akses nelayan, peneliti daerah, perempuan pengolah, dan masyarakat pulau kecil; namun juga dapat menciptakan eksklusi bagi mereka yang tidak memiliki perangkat, konektivitas, identitas formal, atau literasi data. Data lokasi penangkapan, wilayah adat, dan sumber daya genetik mempunyai nilai ekonomi serta politik. Tata kelola perlu mengatur hak akses, consent, perlindungan data, pembagian manfaat, dan mekanisme keberatan. Keadilan data berarti kelompok yang menghasilkan atau terdampak oleh data memperoleh suara dalam tujuan, interpretasi, dan penggunaan hasil.

Pada akhirnya, keberhasilan peta jalan 2026-2045 bergantung pada kemampuan menghubungkan tahapan, ukuran, dan koreksi. Pemerintah menyediakan misi, aturan, infrastruktur dasar, dan pengadaan

strategis; universitas serta lembaga riset menjamin mutu ilmiah; industri membawa rekayasa, operasi, dan skala; sementara masyarakat memberi pengetahuan kontekstual serta legitimasi. Kasus fase 2026-2030, 2031-2035, 2036-2040, dan 2041-2045 sebaiknya menjadi testbed yang terdokumentasi. Keberhasilan diperluas setelah mekanisme sebab-akibat dipahami, bukan setelah demo terlihat menarik. Dengan budaya evaluasi, Indonesia dapat mengubah kegagalan kecil menjadi pembelajaran dan mencegah kegagalan sistemik yang mahal.

Skenario Indonesia 2045: Sehari dalam Ekosistem Maritim Digital

Pada 2045, sebuah hari dalam ekosistem maritim digital Indonesia dapat dimulai sebelum matahari terbit. Jaringan satelit, buoy, radar pesisir, glider, kapal, dan sensor masyarakat memperbarui gambaran keadaan laut. Sistem tidak hanya menampilkan cuaca, tetapi menerjemahkan data menjadi risiko berbasis lokasi bagi nelayan, feri, pelabuhan, kawasan budidaya, dan kota pesisir. Setiap prakiraan menyertakan rentang ketidakpastian serta alasan perubahan dari prakiraan sebelumnya. Pengguna menerima informasi melalui saluran yang sesuai kemampuan konektivitasnya, dari pusat operasi hingga radio komunitas.

Di sebuah desa pulau kecil, koperasi nelayan menggunakan layanan rute dan zona tangkap yang menggabungkan kondisi laut, musim, harga, kebutuhan konservasi, dan batas keselamatan. Data operasi dimiliki bersama sesuai aturan koperasi; pemerintah memperoleh data agregat untuk pengelolaan stok, bukan akses tanpa batas ke perilaku individu. Jika model menyarankan area yang bertentangan dengan pengamatan nelayan, perbedaan itu ditandai dan diperiksa. Sistem belajar dari koreksi manusia, sementara komunitas memperoleh kompensasi atau manfaat yang disepakati atas kontribusi datanya.

Di pelabuhan, digital twin memperkirakan kepadatan, pasang surut, kebutuhan energi, emisi, dan kedatangan moda darat. Agen AI memberi alternatif penjadwalan, tetapi operator manusia menyetujui perubahan yang berisiko. Kapal menerima slot, panduan kecepatan, dan ketersediaan shore power sebelum tiba. Audit mencatat data, rekomendasi, keputusan, dan hasil sehingga efisiensi tidak mengorbankan keselamatan. Ketika komunikasi eksternal terganggu, sistem lokal tetap berfungsi dalam mode degradasi yang telah dilatih.

Pada kawasan konservasi, kamera bawah air, hidrofona, eDNA, dan citra satelit menghasilkan indikator kesehatan ekosistem. AI menyaring jutaan observasi, sedangkan ahli dan penjaga lokal memeriksa kasus penting. Dashboard publik tidak memamerkan lokasi sensitif yang dapat memicu perburuan; akses dibedakan menurut peran dan risiko. Patroli diarahkan berdasarkan indikasi, tetapi tindakan hukum hanya diambil setelah prosedur verifikasi dan bukti dipenuhi. Teknologi memperkuat pengelolaan, bukan menggantikan kehadiran, hubungan sosial, atau legitimasi pengelola.

Di universitas, mahasiswa oseanografi bekerja bersama mahasiswa informatika, hukum, manajemen, dan desain. Mereka tidak hanya melatih model, tetapi mempelajari kalibrasi sensor, bias sampling, keamanan siber, komunikasi risiko, dan hak masyarakat. Dataset nasional dapat digunakan melalui lingkungan komputasi aman, sehingga mahasiswa dari daerah tidak harus memindahkan data raksasa. Hasil terbaik masuk ke testbed dan pengadaan inovasi; kegagalan didokumentasikan sebagai aset pembelajaran, bukan disembunyikan untuk melindungi citra proyek.

Ketika gelombang panas laut terdeteksi, model ansambel memperkirakan risiko pemutihan dan pergeseran ikan. Digital twin mengevaluasi skenario penutupan sementara, pengalihan wisata, perlindungan refugia, dan bantuan pendapatan. Pemerintah melihat konsekuensi ekologis, fiskal, dan distribusional sebelum memilih. Keputusan, asumsi, serta ukuran keberhasilan diumumkan dalam bahasa yang dapat dipahami. Sesudah kejadian, data aktual dibandingkan dengan prediksi untuk memperbaiki model dan prosedur.

Skenario ini bukan gambaran laut yang dikendalikan sepenuhnya oleh mesin. Justru, manusia memegang tanggung jawab pada setiap titik kritis, sementara mesin memperluas kemampuan melihat, menghitung, dan mengingat. Sistem terbaik bukan yang selalu benar, melainkan yang mengetahui batasnya, meminta bantuan ketika ragu, tahan terhadap gangguan, dan dapat diperiksa setelah keputusan. Kepercayaan dibangun melalui kompetensi, transparansi proporsional, perlindungan hak, serta bukti bahwa manfaat teknologi tersebar secara adil.

Untuk mencapai skenario tersebut, Indonesia harus memulai dari keputusan hari ini mengenai standar, pendidikan, pemeliharaan, pengadaan, data historis, dan kemitraan. Infrastruktur yang dibangun sekarang dapat menjadi fondasi terbuka atau mengunci ketergantungan selama puluhan tahun. Karena itu, setiap investasi perlu dinilai bukan hanya menurut fitur saat peluncuran, tetapi juga biaya sepanjang umur, kemampuan migrasi, ketersediaan suku cadang, transfer pengetahuan, keamanan, serta kontribusinya pada ekosistem inovasi nasional.

Sintesis: Dari Digital Ocean menuju Maritime Intelligence

Transformasi juga membutuhkan disiplin portofolio. Tidak semua masalah memerlukan AI, dan tidak semua prototipe layak menjadi platform nasional. Pemerintah perlu membedakan penelitian dasar, eksperimen, layanan operasional, serta infrastruktur kritis karena masing-masing memiliki toleransi risiko dan model pembiayaan berbeda. Penelitian boleh mengejar kebaruan; layanan operasional harus mengejar reliabilitas; infrastruktur kritis harus menekankan keamanan, redundansi, dan pemulihan. Gerbang evaluasi yang transparan mencegah demonstrasi menarik berubah menjadi kewajiban anggaran permanen tanpa manfaat yang terukur. Pada saat yang sama, mekanisme pengadaan harus memberi ruang bagi startup, universitas, dan industri domestik untuk menguji solusi dalam lingkungan nyata,

memperoleh data kinerja, memperbaiki desain, dan mencapai sertifikasi. Dengan demikian, negara berperan sebagai pembentuk pasar yang cerdas, bukan pembeli pasif teknologi jadi.

Prinsip terakhir adalah keberlanjutan operasional. Nilai sistem maritim digital muncul dari kontinuitas data dan kepercayaan pengguna, bukan hanya kecanggihan saat peresmian. Anggaran, kontrak, dan organisasi karena itu harus menjamin kalibrasi, pembaruan keamanan, penggantian komponen, dokumentasi, serta regenerasi tenaga ahli. Tanpa pekerjaan rutin tersebut, kesenjangan data tumbuh, model mengalami drift, dan keputusan kembali bergantung pada perkiraan yang rapuh.

Sintesis seluruh bagian menunjukkan bahwa masa depan ilmu maritim bukan kumpulan teknologi, melainkan arsitektur kemampuan nasional. Observasi menyediakan data; interoperabilitas membuat data dapat digabungkan; model dan AI mengubah data menjadi prediksi; digital twin menghubungkan prediksi dengan skenario; lembaga menerjemahkan skenario menjadi keputusan; dan evaluasi mengembalikan hasil ke sistem pembelajaran. Jika salah satu mata rantai lemah, investasi pada mata rantai lain kehilangan nilai.

Maritime intelligence yang dibutuhkan Indonesia berbeda dari sekadar intelijen keamanan. Ia merupakan kemampuan kolektif untuk memahami keadaan laut, memperkirakan perubahan, memilih tindakan, dan belajar dari hasil. Kemampuan ini mencakup ilmu alam, rekayasa, ekonomi, hukum, manajemen, etika, dan pengetahuan lokal. Satu dashboard nasional tidak dapat menggantikan jaringan ahli dan organisasi yang mampu menafsirkan informasi. Karena itu, transformasi harus menyeimbangkan platform bersama dengan komunitas praktik yang kuat.

Lima misi disarankan. Pertama, Ocean Data Commons Indonesia dengan katalog, standar, identitas, dan hak akses yang jelas. Kedua, jaringan observasi laut berkelanjutan yang menggabungkan satelit, in situ, robotik, dan citizen science. Ketiga, Trusted Maritime AI dengan benchmark tropis, audit, ketidakpastian, dan human oversight. Keempat, testbed industri untuk pelabuhan, perikanan, konservasi, iklim, dan keamanan. Kelima, diplomasi sains serta pengembangan talenta yang menjadikan Indonesia pusat ilmu maritim Indo-Pasifik.

Peta jalan perlu dimulai dari fondasi yang sering kurang menarik secara politik: metadata, kalibrasi, pemeliharaan, standar, kabel, pusat data, kompetensi, dan tata kelola pengadaan. Tanpa fondasi ini, aplikasi canggih menjadi pulau digital baru. Setelah fondasi stabil, Indonesia dapat memperluas digital twin, operasi robotik, AI prediktif, dan layanan data bernilai tambah. Urutan tersebut menjaga agar demonstrasi tidak mendahului kemampuan operasional.

Visi Poros Maritim Dunia seharusnya diukur melalui hasil yang dapat diuji: kesehatan laut, biaya logistik, keselamatan, kualitas pekerjaan, kemampuan industri, mutu publikasi dan paten, waktu respons bencana,

kemandirian teknologi kritis, dan pengaruh Indonesia dalam pembentukan standar. Ukuran semacam itu mengubah visi dari slogan menjadi kontrak kinerja antargenerasi.

Pada akhirnya, teknologi maritim harus memperbesar kebijaksanaan manusia dalam hidup bersama laut. AI dapat memperkirakan, tetapi masyarakat menentukan tujuan; digital twin dapat mensimulasikan, tetapi pemerintah bertanggung jawab memilih; robot dapat mengamati, tetapi ilmuwan menilai makna; data dapat dipertukarkan, tetapi hukum dan etika menentukan batas. Indonesia menjadi poros bukan hanya karena berada di antara dua samudra, melainkan karena mampu menghasilkan pengetahuan, teknologi, tata kelola, dan teladan yang dipercaya dunia.

Matriks Peta Jalan Transformasi Ilmu Maritim

Fase	Prioritas	Produk Strategis	Indikator Utama
2026-2030	Fondasi dan standardisasi	Katalog data, standar sensor, identitas, testbed, kurikulum AI-maritim	Cakupan data, uptime, interoperabilitas, talenta
2031-2035	Integrasi dan layanan	Ocean Data Commons, forecast-as-a-service, pusat operasi, AI benchmark tropis	Waktu layanan, kualitas prediksi, penggunaan lintas lembaga
2036-2040	Skala industri	Robot dan sensor domestik, digital twin prioritas, koridor pelayaran cerdas	Kandungan lokal, ekspor jasa, keselamatan, efisiensi
2041-2045	Kepemimpinan global	Standar Indo-Pasifik, jaringan twin, pusat sains tropis, diplomasi data	Pengaruh standar, kolaborasi, paten, dampak ekologi-sosial

Glossarium

AI generatif: Sistem AI yang menghasilkan konten baru, termasuk teks, kode, gambar, atau representasi data.

AIS: Automatic Identification System, sistem identifikasi dan pelacakan kapal.

Algoritma: Urutan aturan komputasional untuk memproses input dan menghasilkan keluaran.

AUV: Autonomous Underwater Vehicle, kendaraan bawah air tanpa awak yang menjalankan misi terprogram.

Bioakustik: Ilmu mengenai produksi, transmisi, dan penerimaan suara oleh organisme.

Cloud computing: Penyediaan sumber daya komputasi melalui jaringan sebagai layanan.

Computer vision: Bidang AI yang mengekstraksi informasi dari citra atau video.

Data commons: Sumber daya data bersama dengan aturan akses, standar, dan tata kelola.

Data drift: Perubahan distribusi data yang dapat menurunkan kinerja model.

Digital twin: Representasi digital dinamis yang disinkronkan dengan sistem fisik untuk analisis dan skenario.

Edge computing: Pemrosesan data dekat dengan sumbernya untuk mengurangi latensi dan kebutuhan transmisi.

eDNA: DNA lingkungan yang diperoleh dari air, sedimen, atau media lain untuk mendeteksi organisme.

FAIR: Prinsip agar data mudah ditemukan, diakses, dioperasikan bersama, dan digunakan kembali.

Foundation model: Model berskala besar yang dapat diadaptasi untuk berbagai tugas.

GNSS spoofing: Pemalsuan sinyal navigasi satelit sehingga penerima menghitung posisi atau waktu yang keliru.

HPC: High-performance computing, komputasi berperforma tinggi untuk pekerjaan ilmiah intensif.

Human-in-the-loop: Desain sistem yang mempertahankan keterlibatan manusia dalam pelatihan, validasi, atau keputusan.

IoUT: Internet of Underwater Things, jaringan perangkat dan sensor yang berkomunikasi di lingkungan bawah air.

Machine learning: Metode yang memungkinkan sistem mempelajari pola dari data.

MASS: Maritime Autonomous Surface Ship, kapal permukaan dengan tingkat operasi independen dari interaksi manusia.

Metadata: Data yang menjelaskan asal, waktu, metode, kualitas, dan struktur data lain.

Model hibrida: Model yang menggabungkan hukum fisik dengan pembelajaran berbasis data.

Ocean Big Data: Kumpulan data laut berskala besar, beragam, cepat, dan kompleks beserta infrastrukturnya.

Physics-informed AI: AI yang memasukkan hukum atau kendala fisika ke proses pembelajaran.

Port Community System: Platform pertukaran informasi antara pelaku pelabuhan dan logistik.

Remote sensing: Pengamatan objek atau proses tanpa kontak langsung, umumnya menggunakan satelit atau pesawat.

ROV: Remotely Operated Vehicle, wahana bawah air yang dikendalikan dari permukaan.

Sensor fusion: Penggabungan data beberapa sensor untuk menghasilkan estimasi yang lebih andal.

Surrogate model: Model komputasi cepat yang mendekati perilaku model kompleks.

USV: Uncrewed Surface Vehicle, wahana permukaan laut tanpa awak.

Zero trust: Pendekatan keamanan yang tidak mempercayai pengguna atau perangkat secara otomatis dan selalu melakukan verifikasi.

Daftar Pustaka

- Beyan, C., & Browman, H. I. (2020). Setting the stage for the machine intelligence era in marine science. *ICES Journal of Marine Science*, 77(4), 1267-1273. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa084>
- Brönnner, U., et al. (2023). Digital twins of the ocean can foster a sustainable blue economy in a protected marine environment. *The International Hydrographic Review*, 29, 90-95. <https://doi.org/10.58440/ihr-29-a07>
- Chowdhury, A., et al. (2024). Coral reef surveillance with machine learning: A review. *Electronics*, 13(24), 5027. <https://doi.org/10.3390/electronics13245027>
- Ditria, E. M., et al. (2022). Artificial intelligence and automated monitoring for assisting conservation of marine ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, 9, 918104. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.918104>
- González-Rivero, M., et al. (2020). Monitoring of coral reefs using artificial intelligence: A feasible and cost-effective approach. *Remote Sensing*, 12(3), 489. <https://doi.org/10.3390/rs12030489>
- Hu, Z. Z., et al. (2025). The application and development of digital twin in marine domain. *Ocean*, 1, 1-22. <https://doi.org/10.26599/OCEAN.2025.9470001>
- International Maritime Organization. (2021). Guidelines on maritime cyber risk management (MSC-FAL.1/Circ.3/Rev.2). IMO.

- International Maritime Organization. (2023). 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. IMO.
- Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2025). Rencana strategis Kementerian Kelautan dan Perikanan 2025-2029. KKP.
- Liu, K., et al. (2024). A maneuverable underwater vehicle for near-seabed observation. *Nature Communications*, 15, 10143. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54376-1>
- Miedtank, A., et al. (2024). Marine digital twins for enhanced ocean understanding. *Digital Geography and Society*, 7, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.diggeo.2024.100104>
- Pastra, A., et al. (2025). The use of emerging autonomous technologies for ocean observation: Legal and governance challenges. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1561737. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1561737>
- Reichstein, M., et al. (2019). Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 566, 195-204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
- Siringoringo, R. M., et al. (2022). Buku panduan penyelaman ilmiah biologi laut dan kesehatan keselamatan kerja bawah air. Penerbit BRIN. <https://doi.org/10.55981/brin.654>
- Song, T., et al. (2023). A review of artificial intelligence in marine science. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1090185. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1090185>
- UNESCO-IOC. (2021). The United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030) implementation plan. UNESCO. <https://doi.org/10.25607/OBP-1352>
- Waycott, M., et al. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(30), 12377-12381. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905620106>
- Zhang, Z., et al. (2025). A review of machine learning applications in ocean color remote sensing. *Remote Sensing*, 17(10), 1776. <https://doi.org/10.3390/rs17101776>