



**untuk Biodiversitas Indonesia**



Buku ini dipersembahkan untuk memperingati  
150 tahun terbitnya *The Malay Archipelago* karya Alfred Russel Wallace

Sains untuk Biodiversitas Indonesia

Copyright ©2019 Akademi Ilmu Pengetahuan Indonesia  
Agustus 2019

236 halaman, ukuran 17,5 x 24 cm

Diterbitkan oleh Akademi Ilmu Pengetahuan Indonesia  
Akademi Ilmu Pengetahuan Indonesia  
Gedung Perpustakaan Nasional RI, lantai 17-18  
Jalan Medan Merdeka Selatan No. 11 Jakarta Pusat  
Email: info@aipi.or.id  
www.aipi.or.id

ISBN 978-602-61626-5-6

Tidak untuk diperjualbelikan

Sampul depan: Heimlo Studio  
Tata letak dan desain: Heimlo Studio

*Didukung oleh*



*Terima kasih*

**UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA**

**Pasal 2**

1. Hak Cipta merupakan hak eksklusif bagi Pencipta atau Pemegang Hak Cipta untuk mengumumkan atau memperbanyak Ciptaannya, yang timbul secara otomatis setelah suatu ciptaan dilahirkan tanpa mengurangi pembatasan menurut peraturan perundang-undangan yang berlaku.

**KETENTUAN PIDANA**

**Pasal 72**

1. Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
2. Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak memperbanyak penggunaan untuk kepentingan komersial suatu Program Komputer dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).



# Tim Penulis dan Sekretariat

## TIM PENULIS

Jamaluddin Jompa—*Ketua*  
 Alan F. Koropitan  
 Berry Juliandi  
 Lisman Suryanegara  
 Roby Muhamad  
 Sonny Mumbunan  
 Sudirman Nasir  
 Tika Y. Sukarna  
 Vanny Narita  
 Budhi M. Suyitno  
 Jatna Supriatna  
 Sangkot Marzuki

## SEKRETARIAT

Hasnawati Saleh—*Direktur Studi*  
 Uswatul Chabibah—*Editor*  
 Anggrita D. Cahyaningtyas (*sampai September 2018*)  
 —*Penulis & Hubungan Media*  
 Rahayu Dwi Sulistyowati  
 Shita Azalia

# Daftar Isi

<b>PENGANTAR</b>	10
<b>I. APA DAN MENGAPA BIODIVERSITAS</b>	16
Biodiversitas dalam Konteks Indonesia	20
Isu-isu Strategis	22
Sains untuk Biodiversitas Indonesia	25
<i>Si Buta dari Amboina</i>	26
<b>II. MEGABIODIVERSITAS: KADO ALAM UNTUK INDONESIA</b>	28
Pendorong Fisik untuk Biodiversitas Indonesia	30
Perspektif Paleontologi dan Evolusi	30
<i>Danau Purba Impian Wallace</i>	33
Variabilitas Iklim dan Pola Arus Laut	38
Biodiversitas Terrestrial	39
Endemisitas Fauna Terrestrial	45
Biodiversitas Laut dan Ekosistem Perairan Umum Daratan	48
Indonesia sebagai Pusat Biodiversitas Kelautan Dunia	48
Biodiversitas di Perairan Tawar	54
<b>III. EKONOMI BIODIVERSITAS INDONESIA</b>	58
Pada Sumber Hayati, Ekonomi Bertumpu	60
<i>Perubahan Iklim dan Jasa Ekosistem dalam Secangkir Kopi</i>	61
Ekonomi Sirkuler	71
Potensi Biodiversitas untuk Pembangunan Ekonomi	72
Ekowisata	72
<i>Great Barrier Reef: Nilai Suatu Harta Karang</i>	75
Bioekonomi Pangan	76
Pencarian Obat	78
<i>Rayuan Afrodisiak Nusantara: Untuk Ekonomi yang Lebih Perkasa</i>	79
<i>Ramuan Nobel Tu Youyou</i>	84
Energi Alternatif	85

<b>IV. ANCAMAN, TANTANGAN, DAN UPAYA KONSERVASI</b>	88	<b>VI. KEBIJAKAN STRATEGIS: PENGARUSUTAMAAN SAINS BIODIVERSITAS INDONESIA</b>	148
<i>Menilik Kondisi Biodiversitas dalam Laporan IPBES</i>	91	Kebijakan Indonesia dalam Upaya Mengarusutamakan Biodiversitas	151
Tantangan terhadap Biodiversitas	92	<i>Mengarusutamakan Biodiversitas dalam Kebijakan Publik</i>	152
Deforestasi Tanpa Kendali	92	Kebijakan Berbasis Bukti	155
Eksplorasi yang Kelewatan	94	<i>Indonesia dengan Satu Basis Data Biodiversitas</i>	157
Lingkungan yang Kian Tercemar	95	Pendanaan Berkelanjutan untuk Sains Biodiversitas Indonesia	158
Lautan Plastik	97	Kebijakan Indonesia dalam Pendanaan Lingkungan Hidup dan Konservasi Biodiversitas	158
Nyok Kite Bebersih Kali Sentiong Pake Mikrob!	99	Pendanaan Sains Biodiversitas Indonesia	162
Perubahan Iklim Global	100	Universitas Riset	164
Spesies Asing Invasif	102	<i>Riwayat Amerika Serikat Bertransformasi Menjadi Negara Adidaya</i>	166
Ancaman terhadap Kesehatan dan Kehidupan Manusia	105	Kolaborasi Internasional dan Berbagi Manfaat Bersama	169
Konservasi Biodiversitas	109	Rumah Kliring	173
Kearifan Lokal dalam Pemeliharaan Biodiversitas	111		
<b>V. SAINS DAN TEKNOLOGI GARDA DEPAN UNTUK BIODIVERSITAS INDONESIA</b>	114	<b>VII. REKOMENDASI</b>	176
Prioritas Sains dan Teknologi untuk Biodiversitas Indonesia	117	Prioritas Investasi Nasional dalam Pemanfaatan dan Pengelolaan Biodiversitas	178
Sains untuk Ekowisata dan Konservasi	119	1. Pengembangan Ekowisata Berbasis Sains	178
Sains untuk Penemuan Obat dan Bioprospeksi	120	2. Bioprospeksi untuk Penemuan Obat dan Energi	180
Sains untuk Eksplorasi Laut Dalam: Kehidupan di Lingkungan yang Ekstrem	127	3. Eksplorasi Laut Dalam	182
Pengembangan Sains dan Teknologi untuk Mendukung Biodiversitas Indonesia	129	Mengembangkan Sains dan Teknologi untuk Biodiversitas Indonesia	183
Sains untuk Bioenergi	130	Mengembangkan Sains dan Teknologi untuk Memahami Sifat-sifat Dasar Megabiodiversitas Indonesia	183
Eksplorasi Potensi Ekonomi Mikrob	132	Meningkatkan Partisipasi Masyarakat dalam Upaya Mengelola Biodiversitas yang Produktif dan Berkelanjutan	186
Biomimikri: Alam <i>Takambang</i> Jadi Guru—Inspirasi Alam untuk Inovasi Teknologi	135	Meningkatkan Pemanfaatan dan Nilai Ekonomi Keunggulan Biodiversitas Indonesia	188
<i>Big Data</i> untuk Biodiversitas Indonesia	138	Mengembangkan dan Meningkatkan Efektivitas Konservasi dan Tata Kelola Biodiversitas	191
Pendidikan Biodiversitas Melalui Sains Warga	143	Pengembangan Sumber Daya Manusia	192
Sains untuk Memahami dan Mengantisipasi Perubahan Iklim	145	Kelembagaan dan Pendanaan	194
Mendokumentasikan Spesimen Biodiversitas Indonesia: Bekal Pembelajaran Masa Depan	146		
		<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	198
		<b>GLOSARIUM</b>	225
		<b>LAMPIRAN</b>	232

# Pengantar

Penyusunan *Sains untuk Biodiversitas Indonesia* ini berangkat dari (kegelisahan atas) keberhasilan dokumen yang diterbitkan AIPI sebelumnya, *SAINS45: Agenda Ilmu Pengetahuan Indonesia Menyongsong Satu Abad Kemerdekaan*. Penyusunan *SAINS45* yang melibatkan para alumni kegiatan Frontiers of Sciences yang difasilitasi AIPI dalam rentang 2014-2016 menjadi tonggak sejarah lahirnya Akademi Ilmuwan Muda Indonesia (ALMI) pada 2016. Para ilmuwan muda yang tergabung dalam ALMI ini bekerja keras di dalam organisasi yang masih sangat muda tersebut, berupaya berkontribusi untuk negeri yang kekayaannya merupakan laboratorium dunia yang tak henti menginspirasi.

Ketika *SAINS45* diadopsi oleh Dana Ilmu Pengetahuan Indonesia (DIPI) sebagai area fokus penelitian dalam pendanaan penelitian pertamanya, kami sadar bahwa *SAINS45* sungguh telah menjadi sebuah dokumen hidup seperti impian kami. *SAINS45* juga diperkenalkan di bangku-bangku sekolah lewat para anggota ALMI. Doktor-doktor muda terkemuka yang sedang berada di puncak karier ini kembali ke sekolahnya lewat inisiatif ALMI bertajuk *Scientist Goes to School*. Mereka memperkenalkan sains dan pentingnya ilmu pengetahuan, sembari membawa buku *SAINS45* dan mengajak para remaja Indonesia bermimpi untuk Indonesia. Para ilmuwan muda ini bak pendakwah yang menyeru kepada generasi muda untuk senantiasa berpijak dan melandaskan pikir pada sains dan ilmu pengetahuan, serta menjadikan bumi Indonesia ini ladang karya yang harus dirawat dan dijaga untuk dunia. *SAINS45* senantiasa bergulir dan tak berhenti menjadi dokumen mati.

Untuk menjaga supaya dokumen ini senantiasa hidup dan menjadi inspirasi, tak hanya bagi masyarakat umum, namun juga bagi para pemangku kebijakan, kami sadar *SAINS45* perlu dimaksimalkan melalui dokumen lain. Penyusunan *Sains untuk Biodiversitas Indonesia* merupakan sebuah upaya untuk memperkuat dampak *SAINS45* sekaligus memperkuat ALMI itu sendiri, dengan menjadi anggota Komite Studi *Sains untuk Biodiversitas Indonesia*.

*Sains untuk Biodiversitas Indonesia* adalah dokumen yang berusaha menerjemahkan sebagian inspirasi di dalam *SAINS45* menjadi rekomendasi yang lebih siap dikembangkan sebagai kebijakan. Dokumen ini tetap berangkat dari pertanyaan-pertanyaan yang diajukan di dalam *SAINS45*, namun memfokuskan pada pentingnya riset dasar untuk pembangunan berkelanjutan dalam upaya menguatkan ekonomi. *Sains untuk Biodiversitas Indonesia* mengajak pemerintah bertransisi dari pembangunan ekonomi berbasis sumber daya alam menjadi ekonomi berbasis sains—yang akan mengarah pada transformasi Indonesia sebagai negara maju pada 2045. Untuk dapat melakukan transisi dan transformasi tersebut, dokumen ini berfokus pada kekayaan biodiversitas Indonesia, sebagai keunggulan komparatif yang belum banyak digali, dengan memperkuat kontribusi sains dan teknologi untuk memaksimalkan manfaatnya. Sebagai dokumen rekomendasi kebijakan, buku ini dapat menjadi dasar pengembangan agenda riset nasional.

*Sains untuk Biodiversitas Indonesia* terdiri atas tiga bagian utama yang sekaligus merupakan mandat komite studi yang tertuang dalam *Statement of Tasks* (Pernyataan Tugas) sebagai acuan penyusunan dokumen yang mutlak dipatuhi.

Tiga bagian utama tersebut, pertama, mengidentifikasi kekayaan biodiversitas Indonesia sekaligus mengidentifikasi tantangan-tantangan besarnya sehingga sains dapat menyumbangkan solusi. Kedua, memformulasikan suatu strategi kebijakan berbasis sains untuk mencapai *Sustainable Development Goals* (SDGs) untuk kehidupan di bawah air dan daratan, maupun kehidupan di antara keduanya. Dan yang ketiga adalah mengidentifikasi intervensi prioritas dan usulan-usulan langkah pengembangan dan rencana implementasi. Dokumen ini juga memberikan skala prioritas dan ambisi, serta dampak ekonomi dan sains yang ditimbulkan dari masing-masing prioritas.

Ketiga bagian yang juga bagian dari *Statement of Tasks* komite studi tersebut menjadi acuan proses penjaminan mutu dokumen *Sains untuk Biodiversitas Indonesia* ini. Edisi konsultasi dokumen ini telah dikirimkan kepada 265 anggota jejaring ilmuwan muda Indonesia dan mengundang mereka untuk memberikan masukan, komentar, dan kritik atas kepatuhan dokumen ini terhadap *Statement of Tasks*. Sebanyak 41 orang mengirimkan kritik dan saran yang sangat berharga bagi dokumen ini—kami sangat berterima kasih kepada 41 pengulas sejawat tersebut. Tanggapan komite studi atas masukan dan kritik dari para pengulas sejawat juga telah dinilai memadai oleh tim monitor. Kami berterima kasih kepada tim monitor sehingga buku ini berhasil memenuhi proses putaran terakhir dari upaya penjaminan mutu dokumen AIPI, untuk sekali lagi, memastikan bahwa dokumen ini patuh kepada mandat *Statement of Tasks*.

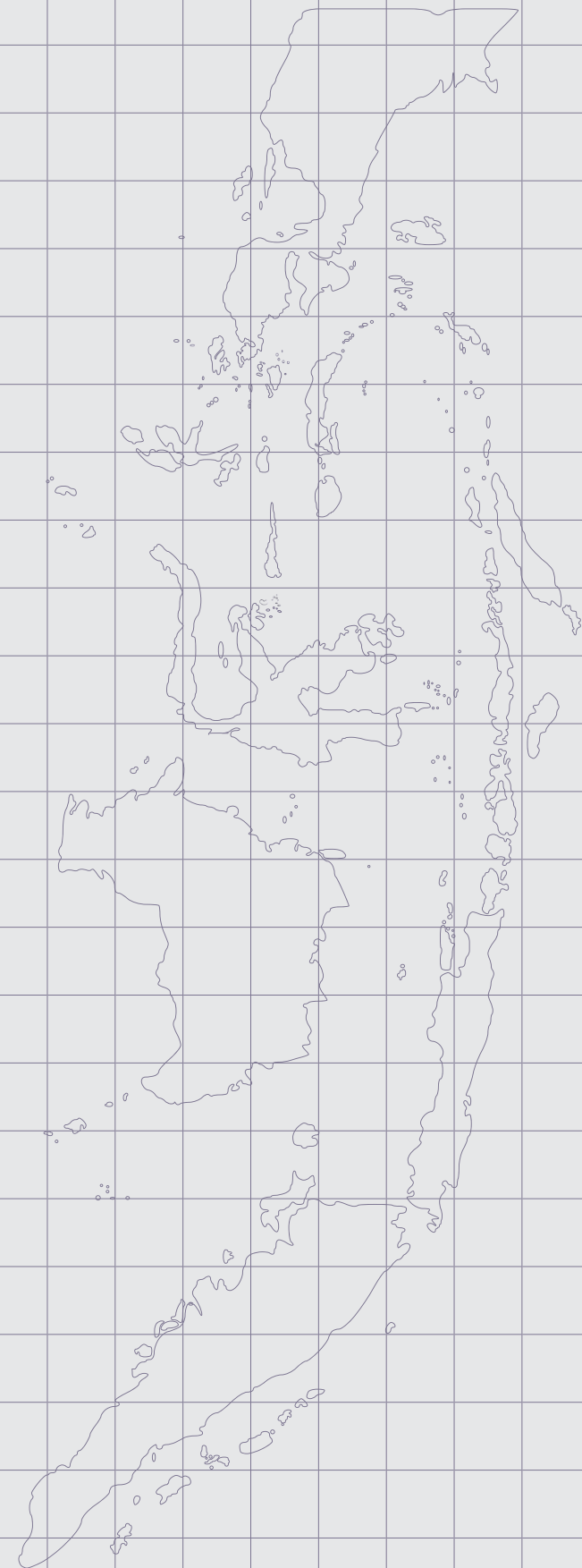
AIPI beruntung telah mendapatkan dukungan dari berbagai pihak yang bersama-sama berusaha mewujudkan dokumen ini. ALMI merupakan pendukung utama penyusunan *Sains untuk Biodiversitas Indonesia*, yang hadir sebagai 12 anggota komite studi. USAID Indonesia sejak awal dukungannya dalam penyusunan *SAINS45* telah melihat pentingnya dokumen ini sebagai bentuk translasi *SAINS45*. Melalui National Academy of Sciences (NAS), USAID Indonesia melanjutkan dukungannya karena percaya bahwa *Sains untuk Biodiversitas Indonesia* merupakan dokumen penting bagi para pengambil kebijakan untuk menyusun suatu agenda kebijakan nasional berbasis sains demi pembangunan ekonomi berkelanjutan, yang juga sejalan dengan agenda dunia. AIPI sangat berterima kasih atas kepercayaan tersebut, khususnya kepada Dr. Clara Davis.

Hibah dari The Scientific Programme Indonesia-the Netherlands of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW), memungkinkan terlaksananya program pengayaan untuk dokumen ini di Belanda pada September 2018. Terima kasih atas dukungan yang diberikan NIOO-KNAW (The Netherlands Institute of Technology), Wageningen University, dan De Jonge Akademie (DJA), serta The Royal Netherlands Institute of Southeast Asian and Caribbean Studies (KITLV) dalam program tersebut. Terima kasih khusus kami berikan kepada Profesor Louise Vet, Profesor Marten Scheffer, Dr. Sikko Visscher, dan Dr. Lisa Becking. Tak lupa terima kasih kami untuk Sekretariat Negara yang atas dukungannya telah memungkinkan pertemuan-pertemuan penting dalam proses penyusunan dokumen ini terselenggara. Kami juga berterima kasih kepada Pusat Penelitian Biologi Lembaga Ilmu Pengetahuan

Indonesia (LIPI) yang telah menyampaikan masukan berharga untuk dokumen ini.

Kehadiran *Tempo Institute* memberi warna yang berbeda dalam dokumen ini. Sebagaimana *SAINS45* juga mendapat sentuhan *Tempo*, demikian juga penyusunan *Sains untuk Biodiversitas* ini. Tanpa berkali-kali pertemuan dengan *Tempo*, buku ini akan menjadi dokumen kering yang membosankan. Kotak Cerita dalam buku ini yang disajikan dengan cara bertutur populer dan berbeda dari gaya bahasa naskah utamanya merupakan bukti pengaruh *Tempo*. Kami berterima kasih atas budi baik kawan-kawan *Tempo* yang senantiasa memantik keberanian kami berbahasa dan bercerita.

Dokumen ini tak akan pernah terbit tanpa tekad dan komitmen kuat sekretariat: direktur studi, editor, penulis dan hubungan media, serta staf lainnya. Kerja sama yang baik dari semua belah pihak telah memungkinkan *Sains untuk Biodiversitas Indonesia* terbit pada waktunya. Untuk itu, AIPI mengucapkan terima kasih tak terhingga. Selamat membaca.





# APA DAN MENGAPA BIODIVERSITAS

*Seperti apakah Indonesia di tahun 2045, satu abad setelah kemerdekaan?  
Apakah Indonesia sudah berhasil bertransformasi menjadi negara maju?  
Bukankah Indonesia memiliki keunggulan keanekaragaman hayati luar biasa  
sebagai modal untuk mencapainya?*

Memajukan kesejahteraan umum dan mencerdaskan kehidupan bangsa adalah dua cita-cita luhur yang dideklarasikan para pendiri bangsa sebagai dasar bernegara. Setelah lebih dari 70 tahun merdeka, Indonesia berhasil meningkatkan kesejahteraan rakyat sehingga menjadi negara berpendapatan menengah. Kini Indonesia tiba di persimpangan jalan: apakah terjebak dalam perangkap negara berpendapatan menengah, atau melejit menjadi sebuah negara maju.

Kita memiliki modal besar berupa alam dan manusia yang potensial membawa bangsa ini menjadi bangsa maju yang disegani di dunia. Jika itikad kuat dan modal dasar telah kita miliki, maka pertanyaannya adalah strategi apa yang akan membawa kita menuju Indonesia maju?

Alam dan manusia Indonesia adalah modal utama pembangunan. Namun, pengelolaannya di abad ke-21 ini membutuhkan paradigma baru. Kekayaan alam hayati Indonesia memang melimpah dan merupakan keunggulan komparatif kita, tetapi apabila tidak dikelola secara cerdas dan berkelanjutan serta

memanfaatkannya secara optimal, maka kekayaan alam hayati pun dapat tergerus seiring waktu, seperti kekayaan mineral, minyak bumi, dan gas.

Kita juga harus melihat kekayaan alam dari keragamannya, yaitu keragaman flora, fauna, dan mikrob, baik di darat dan di laut, yang disebut sebagai biodiversitas, sebagai salah satu kunci meningkatkan kesejahteraan rakyat. Biodiversitas ini harus dikelola secara cerdas dan berkelanjutan serta dimanfaatkan secara optimal agar Indonesia dapat meningkatkan taraf kesejahteraan rakyat sekaligus menjadi negara maju. Indonesia dapat mengambil inspirasi dari alam untuk melakukan inovasi teknologi masa depan.

Kekayaan hayati Indonesia sesungguhnya dapat menjadi modal utama untuk bertransformasi dari negara yang mengandalkan sumber daya (*resource-based society*) menjadi negara yang mengandalkan ilmu pengetahuan, sains, dan teknologi (*knowledge-based society*). Seiring dengan itu, sumber daya manusia yang mumpuni pun dapat dibangun.

Ketika Georg Eberhard Rumphius mendokumentasikan flora dan fauna di Maluku pada pertengahan abad ke-17, lema "biodiversitas" belum dikenal. Baru tiga abad kemudian pada 1968, ahli konservasi Raymond F. Dasmann memperkenalkan istilah biodiversitas dalam buku berjudul *A Different Kind of Country*.

Biodiversitas atau keanekaragaman hayati memang seringkali dipahami secara berbeda. Biodiversitas bagi petani mungkin berupa aneka ragam benih yang mereka tanam di ladang. Bagi anak-anak, biodiversitas bisa jadi merupakan binatang-binatang lucu di hutan liar yang mereka lihat di gawai. Lain lagi bagi pedagang satwa liar: biodiversitas adalah komoditi bernilai tinggi.

Untuk mengerti konsep biodiversitas secara utuh, kita perlu memahaminya dalam berbagai tingkatan, mulai dari tingkat gen, spesies, komunitas, ekosistem, bahkan planet. Oleh sebab itu, *The Convention of Biological Diversity* mendefinisikannya sebagai "keragaman seluruh makhluk hidup baik di darat, laut dan perairan, serta lingkungan lainnya, termasuk keragaman spesies, antarspesies, dan ekosistem". Kamus Besar Bahasa

Indonesia memberikan definisi yang tidak jauh berbeda, yakni "keseluruhan keanekaragaman makhluk yang diperlihatkan suatu daerah mulai dari keanekaragaman genetik, jenis, dan ekosistemnya."

Iklm, geologi, hidrologi, ekologi, dan proses evolusi merupakan faktor-faktor yang menghasilkan keanekaragaman hayati serta menjadikannya senantiasa berubah. Beberapa perubahan berlangsung alami dan lambat, namun bisa terjadi lebih cepat dan luas akibat aktivitas manusia. Sebagai contoh, perubahan iklim, bencana alam, polusi lingkungan, introduksi spesies baru, pembabatan hutan, eksploitasi berlebih, dan hilangnya spesies tertentu.

Lebih jauh lagi, keanekaragaman hayati dapat dipahami melalui komponen-komponen hierarkinya—gen, spesies, dan ekosistem. Di tingkat terkecil, keanekaragaman genetik adalah sumber utama keanekaragaman hayati di semua tingkatan. Semakin beragam variasi genetik dalam suatu spesies, akan menjadikannya lebih mampu bertahan menghadapi ancaman serta perubahan. Setiap spesies akan

mengembangkan dan mengumpulkan perbedaan genetik yang memberi keuntungan dalam ketahanan hidup. Besaran perbedaan genetik di dalam dan di antara spesies dapat menunjukkan laju evolusi dan memetakan hubungan filogenetik di antara makhluk hidup. Jumlah gen yang unik serta ciri morfologi dan fisiologi yang dikodekannya seiring waktu akan bertambah dalam garis keturunan. Inilah penggerak evolusi.

Variasi di antara populasi adalah hasil adaptasi terhadap kondisi ekologis setempat. Suatu populasi dapat mempunyai nilai konservasi

yang besar karena kemampuannya beradaptasi terhadap lingkungan tertentu, termasuk kemampuan beradaptasi di tingkat genetik terhadap berbagai ragam karakter habitat. Dalam suatu ekosistem, terdapat hubungan saling ketergantungan di antara berbagai populasi dan spesies. Hilangnya populasi atau kepunahan suatu spesies mengurangi daya dukung kemampuan ekosistem untuk spesies lain yang hidup di sana. Inilah mengapa keanekaragaman—dalam berbagai tingkatan—harus senantiasa dijaga.

## Biodiversitas dalam Konteks Indonesia

Sebagai negara kepulauan terbesar di dunia, Indonesia memiliki keunikan dan keunggulan dibandingkan pusat-pusat biodiversitas lain. Gabungan biodiversitas daratan dan lautan, termasuk jasad reniknya, menjadikan Indonesia negara dengan biodiversitas terkaya di planet bumi. Di laut, Indonesia berada di jantung kawasan segi tiga karang yang memiliki spesies karang

keras dengan jumlah terbanyak di dunia. Lima belas persen terumbu karang dunia hidup di Indonesia, lengkap dengan ribuan jenis ikan karang, jauh melebihi kekayaan laut Australia, Hawai'i, dan Karibia. Bahkan, di perairan bagian selatan Kepulauan Maluku, diperkirakan jumlah ikan karangnya mencapai 28% dari jumlah ikan karang global (Limmon *et al.* 2018).

Berbagai studi di bidang genetika dan arkeologi menunjukkan pentingnya bumi Indonesia dalam proses kompleks migrasi dan evolusi manusia. Biodiversitas Indonesia yang tinggi dan unik merupakan kontribusi dari banyak faktor. Posisi geografis, iklim tropis, kompleksitas bentang alam, isolasi wilayah dalam waktu lama, pergerakan lempeng tektonik, hingga luas wilayah memengaruhi proses evolusi. Evolusi jutaan tahun di habitat tertentu, baik di darat maupun perairan, telah menghasilkan ekosistem yang menunjang keseimbangan alam, termasuk kehidupan manusia. Evolusi kreativitas umat manusia yang menghasilkan peradaban kunci seperti teknologi menyeberangi laut terlihat pada lukisan-lukisan kuno di berbagai tempat di Nusantara.

Biodiversitas Indonesia telah pula menginspirasi penemuan-penemuan ilmiah besar dunia. Di abad ke-19, Alfred Russel Wallace mendokumentasikan keanekaragaman hayati dari berbagai penjuru tanah air. Wallace menuliskan kisah kupu-kupu di Bantimurung, Sulawesi Selatan, sampai *The Ternate Paper* yang bercerita mengenai *survival of the*

*fittest* sebagai dasar seleksi alam yang membuatnya menjadi penemu teori evolusi bersama Charles Darwin. Dokumentasi Rumphius membuka cakrawala keilmuan botani tropis dan berkontribusi besar dalam pengembangan sistem penamaan ilmiah pada abad ke-18 oleh Carolus Linnaeus, yang dikenal sebagai *Linnaean taxonomy*.

Naskah Rumphius digali oleh peneliti di Mayo Clinic Amerika Serikat untuk pencarian obat (Buenz *et al.* 2006). Rumphius juga mencatat khasiat kacang hijau sebagai anti penyakit beri-beri, meskipun tanaman ini belum dibudidayakan di Maluku pada saat itu. Dua ratus tahun kemudian, di Jakarta, waktu itu masih bernama Batavia, laboratorium yang dipimpin Christiaan Eijkman menemukan vitamin B1 sebagai anti beri-beri dari kulit air beras, yang menandai era baru vitamin dalam dunia kedokteran. Atas terobosan ini, Eijkman dianugerahi Hadiah Nobel Kedokteran pada 1929.

Kini vitamin serta suplemen menjadi bisnis miliaran dolar. Di Amerika Serikat, angka penjualannya mencapai 37 miliar dolar setahun (National Institutes of Health 2016).

Di Indonesia, lembaga riset pasar Euromonitor International memperkirakan penjualan suplemen vitamin dan diet tahun 2018 mencapai 20,74 triliun rupiah, naik dari tahun sebelumnya, sekitar 20,11 triliun rupiah.

Contoh di atas menunjukkan bagaimana sains dan teknologi memberi nilai tambah yang jauh lebih besar dari nilai aslinya pada

biodiversitas. Itu baru contoh di darat. Laut Indonesia juga surga beraneka ragam biota laut yang belum banyak diidentifikasi, alih-alih diketahui manfaatnya. Lebih jauh lagi, Indonesia dengan keragaman genetik manusia serta kearifan lokalnya terkait kekayaan alam merupakan laboratorium alam ideal untuk upaya penemuan obat, pangan, kosmetik, dan sebagainya.

## Isu-isu Strategis

Kekayaan biodiversitas Indonesia merupakan aset yang sangat penting bagi kemajuan ekonomi, ketahanan pangan, dan daya saing bangsa. Isu-isu strategis berikut harus mendapat perhatian yang lebih serius dan oleh karena itu menjadi tema utama dari buku ini:

### 1. Pengetahuan mengenai kekayaan biodiversitas Indonesia yang memadai.

Untuk mendapatkan manfaat dari kekayaan biodiversitas kita, memiliki data lengkap mengenai keanekaragaman hayati di darat dan di laut, termasuk jasad

renik yang tak kasat mata, merupakan hal mutlak. Data keanekaragaman hayati, baik secara historis dan biogeografis, masih jauh dari memadai. Data yang kini tersedia pun masih terbatas, tersebar, belum terstandardisasi, serta belum terbuka. Data biodiversitas Indonesia di lembaga publik sebagian besar masih dihasilkan dan dikelola menggunakan pendekatan proyek dengan keberlanjutan yang cenderung rendah. Ketersediaan data terkait keanekaragaman hayati merupakan prasyarat

mendasar dalam pengembangan pengetahuan serta pemanfaatan biodiversitas Indonesia.

### 2. Perwujudan potensi keuntungan biodiversitas Indonesia yang optimal.

Kekayaan dan keunikan biodiversitas Indonesia dapat menjadi modal utama Indonesia bertransformasi menjadi negara maju. Pengetahuan tentang potensi pemanfaatan dan nilai ekonominya, juga pengelolaan secara strategis serta berkesinambungan, akan mendongkrak potensi biodiversitas, misalnya untuk penemuan obat, ekowisata, dan energi terbarukan.

### 3. Mitigasi kerusakan berbagai ekosistem penting dan ancaman kepunahan berbagai spesies.

Kerusakan habitat dan kepunahan berbagai jenis biota terus terjadi akibat perilaku manusia. Kebijakan-kebijakan pemerintah dan penerapannya baik di tingkat nasional maupun daerah masih belum mampu melindungi biodiversitas Indonesia dari kerusakan dan kepunahan. Walaupun

pemerintah telah menetapkan kawasan lindung atau kawasan konservasi baik di darat maupun di laut, aktivitas masyarakat dan industri masih sangat banyak yang menyebabkan degradasi habitat dan mengancam punahnya berbagai spesies. Kepunahan suatu spesies akan berdampak pada menurunnya ketahanan spesies lain yang kemudian berakibat negatif pada keragaman hayati secara keseluruhan. Oleh karena itu, pengetahuan, kesadaran, dan partisipasi publik terhadap pentingnya perlindungan dan pemanfaatan berkelanjutan dari kekayaan biodiversitas harus ditingkatkan.

### 4. Penguatan sains dan teknologi terkait konservasi dan pemanfaatan biodiversitas untuk daya saing bangsa.

Sains dan teknologi yang kuat mutlak diperlukan sebagai pengungkit inovasi yang menempatkan Indonesia dalam peta kemajuan ilmu pengetahuan dunia. Biodiversitas Indonesia mampu menopang kemajuan dalam berbagai bidang, antara lain, penemuan spesies baru,

kekayaan genetika, teknologi biomimikri, bioprospeksi penemuan obat dan biomaterial baru, eksplorasi potensi laut dalam, perubahan iklim, dan lingkungan. Kompetensi dan infrastruktur yang meliputi sains dasar dan terapan termasuk pengelolaan *big data* perlu diperkuat.

#### 5. Pengarusutamaan sains biodiversitas dalam perumusan berbagai kebijakan terkait.

Biodiversitas dan lingkungan harus menjadi arus utama kebijakan pembangunan. Alam beserta jasa ekosistemnya adalah fondasi yang menunjang keberlangsungan hidup di muka bumi, sehingga pertumbuhan sosial ekonomi harus mengindahkan kelestarian alam. Dengan demikian, semua kebijakan pembangunan harus menempatkannya sebagai pertimbangan utama, dengan pendekatan berwawasan ilmu pengetahuan atau berbasis sains.

Pemerintah telah berupaya menyusun berbagai dokumen untuk mendukung pelestarian keragaman hayati Indonesia

seperti melalui *Indonesian Biodiversity Strategic Action Plan (IBSAP 2015-2020)* yang berfokus pada upaya-upaya konservasi lingkungan. Kearifan lokal dalam menjaga keanekaragaman hayati sebenarnya juga telah tercermin dari kehidupan berbagai masyarakat adat di Nusantara yang sejak berabad silam hidup harmonis dengan alam. Lebih dari 700 kelompok etnis di Indonesia menggantungkan hidup dari sumber daya alam di sekitarnya untuk memenuhi kebutuhan pangan, air, sandang, serta obat-obatan. Mereka memiliki perilaku, kebiasaan, budaya, dan aturan-aturan adat terkait penghargaan dan pengelolaan alam beserta aneka ragam isinya, baik di darat maupun di laut. Ini merupakan contoh yang baik di mana kepentingan ekologi, ekonomi dan masyarakat tumbuh sesuai dengan daya dukung biosfer. Tantangannya adalah bagaimana kita dapat memanfaatkan kearifan lokal tersebut untuk kemajuan Indonesia dengan perubahan sosial yang sangat cepat ini serta bagaimana menjaga keberlangsungannya?

## Sains untuk Biodiversitas Indonesia

Buku *Sains untuk Biodiversitas Indonesia* merupakan salah satu upaya untuk lebih memahami biodiversitas sebagai keunggulan komparatif yang dimiliki Indonesia. Buku ini mengupas pentingnya sains dan sains apa yang dibutuhkan untuk mengelola biodiversitas kita secara lebih produktif dan berkelanjutan.

Ketujuh bab dalam buku ini menjabarkan apa itu biodiversitas, biodiversitas apa yang kita miliki dan bagaimana biodiversitas itu terbentuk; potensi keuntungan dari biodiversitas kita; ancaman, tantangan, dan upaya konservasi biodiversitas; sains garda depan yang diperlukan untuk mengoptimalkan manfaat biodiversitas; serta bagaimana mengarusutamakan sains dalam kebijakan terkait biodiversitas. Buku ini ditutup dengan sejumlah rekomendasi penting dalam pengelolaan biodiversitas Indonesia, misalnya, pengembangan ekowisata, penguatan bioprospeksi untuk penemuan obat dan energi, eksplorasi laut dalam, serta penguatan

kesadaran masyarakat akan pentingnya biodiversitas.

Buku ini merupakan lanjutan dari buku *SAINS45—Agenda Ilmu Pengetahuan Indonesia: Menyongsong Satu Abad Kemerdekaan (AIPPI 2016)*. Di dalam *SAINS45* yang merangkum 45 pertanyaan ilmiah mendasar di mana sains dapat memberikan sumbangsih bagi upaya memajukan negara dan bangsa Indonesia, tema biodiversitas di darat dan di lautan memang cukup menonjol. Buku *Sains untuk Biodiversitas Indonesia* ditujukan, antara lain, untuk menjawab pertanyaan pemerintah mengenai di bidang apa seharusnya negara mengalokasikan investasi strategis demi kemajuan bangsa.

Semoga buku ini menjadi pemicu dan pemandu bagi negara untuk mengadakan program investasi strategis pada bidang-bidang kunci yang akan mentransformasikan keunggulan komparatif (biodiversitas) kita menjadi keunggulan kompetitif bangsa.

## Si Buta dari Amboina

Georg Eberhard Rumphius, ahli tumbuhan kelahiran Jerman, tahun 1627, menghabiskan hidupnya di Maluku dan meninggal di Ambon pada 1702. Rumphius perlu waktu hampir setengah abad untuk mendokumentasikan keanekaragaman hayati Maluku. Dalam magnum opusnya, *Herbarium Amboinense*, yang terdiri dari 12 jilid, Rumphius mencatat 1.200 spesies, 140 di antaranya diidentifikasi hingga tingkat genus. Karya besarnya yang lain mencatat berbagai hewan laut, antara lain kerang, udang, kepiting, bahkan landak laut, dalam kitab bertajuk *D'Amboinsche Rariteitkamer*.

Rumphius adalah Beethoven dalam dunia yang berbeda: sains. Ia dalam keadaan buta karena glaukoma ketika menulis *Herbarium Amboinense*, seperti halnya Beethoven dalam keadaan tuli ketika mengubah beberapa komposisinya yang abadi hingga kini.

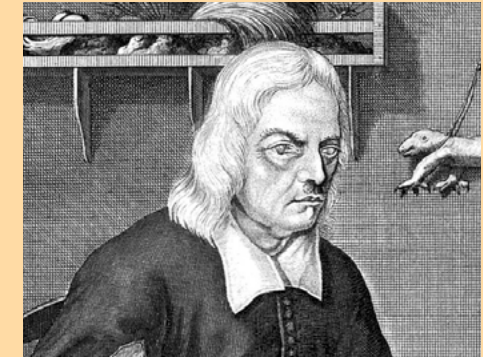
Bagaimana Beethoven yang tuli menemukan nada yang tidak ia dengar, lalu menenunnya menjadi melodi?

Bagaimana Rumphius mengidentifikasi berbagai tanaman dalam keadaan buta? Ia pasti menggunakan seluruh pancaindranya selain mata: menggigit, menghidu, meraba, dan mendengarkan cerita orang-orang di sekitarnya. Istri dan anaknya setia membantu Rumphius mencatat temuan-temuannya.

Rumphius mencatat nama semua tumbuhan di Maluku dalam bahasa lokal dan Latin, berikut ciri-ciri dan khasiatnya. Ia menggambarkan ciri-ciri tumbuhan itu seperti memindahkan piksel demi piksel citra yang diambil kamera dalam format HDR. Sungguh sangat detail. Berdasarkan ciri-ciri itu, ia kemudian memberi nama Latin dan mengelompokkannya.

Tak hanya itu, Rumphius juga mencari tahu khasiat dari tanaman-tanaman tersebut. Bagi Eropa waktu itu, informasi ini sangat berharga. Eropa di Zaman Renaisans sudah tahu banyak tentang gejala penyakit, tapi tidak memiliki cukup pengetahuan soal obat. Masa Rumphius adalah saat Eropa mencari obat-obat

Georg Eberhard Rumphius  
(Hanau, Jerman, 1 November 1627-  
Ambon, Hindia Belanda, 15 Juni 1702)



itu ke negeri Timur. Rumphius menulis, misalnya, khasiat kacang hijau sebagai penyembuh beri-beri, dua abad sebelum Christiaan Eijkman dan Gerrit Grijns mengidentifikasi defisiensi sebagai penyebab penyakit dan menemukan khasiat yang sama pada ari-ari beras lalu mengisolasi zat aktifnya, yang kemudian dinamai vitamin B. Laboratorium tempat mereka bekerja itu kini menjadi Lembaga Biologi Molekuler Eijkman, Jakarta.

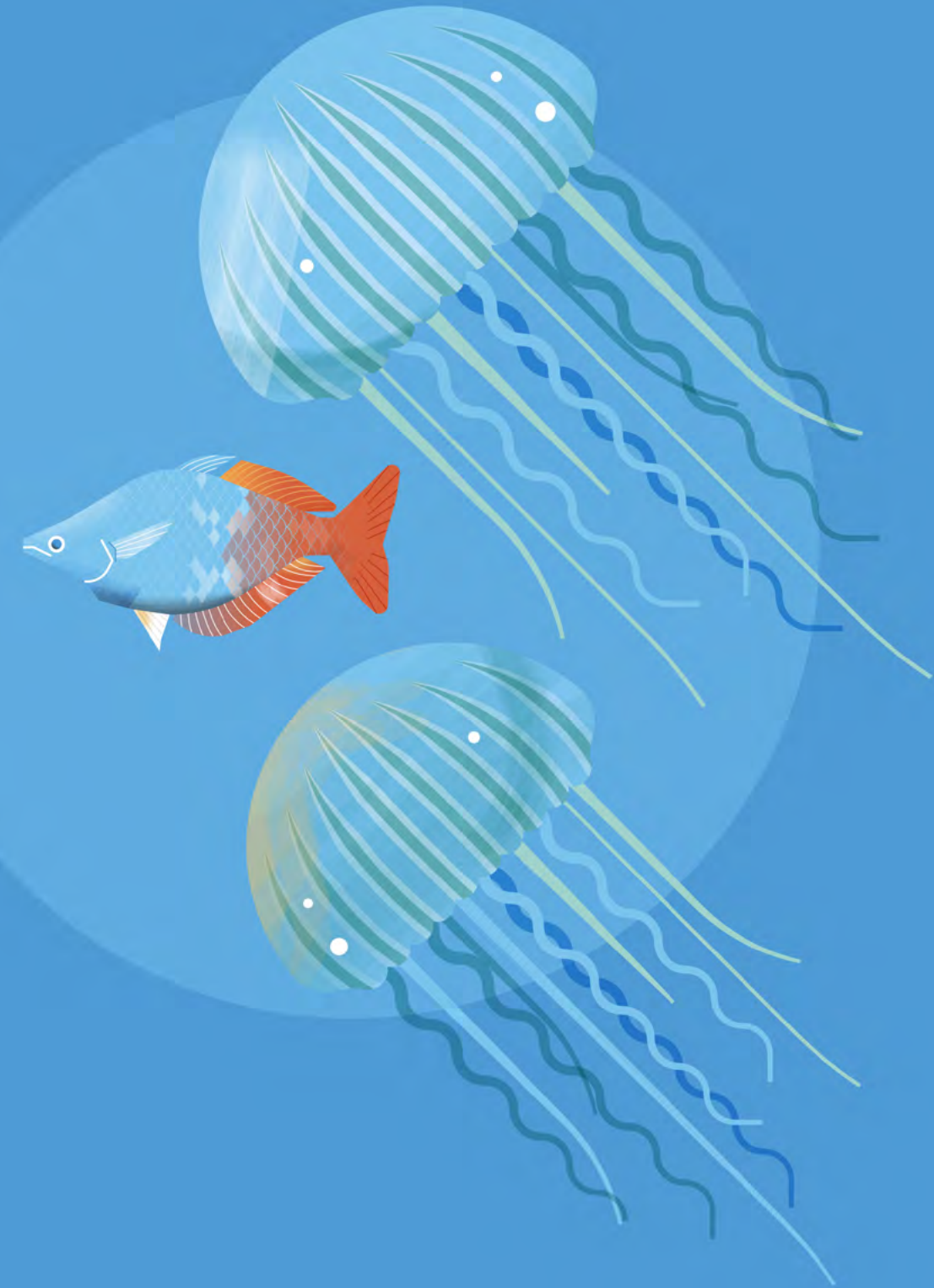
Tak berlebihan jika *Herbarium Amboinense* disandingkan dengan *Systema Naturae*, maha karya Carolus Linnaeus, atau bisa jadi malah lebih hebat. Sama-sama mengusulkan tata cara penamaan binomial pada tanaman, buku Rumphius sebenarnya kelar 50 tahun lebih dulu dari buku Linnaeus. Bila Linnaeus dikenal sebagai Bapak Taksonomi, maka kejadiannya mirip Wallace yang melakukan penelitian mengenai persebaran hewan dan evolusi di bumi Nusantara, namun Charles Darwin lebih dikenal sebagai Bapak Evolusi. Dalam kasus Rumphius, Belanda baru menerbitkan 12 jilid

karyanya setelah 40 tahun Rumphius mangkat. Alasannya semata ketakutan pemerintah Hindia-Belanda bahwa karya Rumphius memuat informasi yang dapat membahayakan Belanda. Begitulah.

Barangkali itu pula kesamaan lain antara Rumphius dan Beethoven. Beethoven tak pernah dapat mendengar karyanya dimainkan, Rumphius tak melihat karyanya diterbitkan. Dan karya kedua manusia besar ini masih hidup hingga kini. *Für Elise* dan karya Beethoven lain masih dimainkan hingga kini, buku Rumphius juga masih dipelajari. Mayo Clinic, lembaga riset medis papan atas dunia yang bermarkas di Amerika Serikat, tengah menggali catatan Rumphius untuk mencari tanaman berkhasiat obat. Karya akbar yang ditulis di Tanah Air hampir tiga abad silam ini, mengundang pemuda Indonesia untuk juga turut membukanya.



# MEGABIODIVERSITAS: KADO ALAM UNTUK INDONESIA



*Terbentang di sabuk khatulistiwa, Indonesia memiliki keanekaragaman hayati yang sangat kaya. Sejarah pembentukannya yang unik menjadikan negeri dengan tujuh belas ribu pulau ini dianugerahi biodiversitas yang berlimpah. Modal alam ini perlu dipahami sehingga dapat dikelola secara lestari.*

## Pendorong Fisik untuk Biodiversitas Indonesia

### Perspektif Paleontologi dan Evolusi

“Kini kita tiba di Pulau Sulawesi, yang dalam banyak hal merupakan pulau paling menakjubkan dan menarik di kepulauan ini, atau bahkan di seluruh planet, mengingat tidak ada pulau lain yang memiliki keganjilan sebanyak ini untuk dipecahkan.”—AR Wallace.

Dalam petualangannya di Kepulauan Nusantara pada abad ke-19, Alfred Russel Wallace—penemu teori evolusi makhluk hidup bersama Charles Darwin—tercengang dengan perbedaan yang sungguh menyolok, terutama dalam hal persebaran hewan-hewan. Di kepulauan ini tidak hanya ditemukan hewan-hewan khas Asia dan Australia, namun juga hewan yang bukan Asia maupun Australia. Terlebih di Sulawesi, yang bahkan muasal spesies-spesies endemiknya masih memantik perdebatan sejak 150 tahun lalu.

Persebaran hewan di Nusantara ini membuat Wallace bertanya-tanya: mengapa tidak ditemukan kuskus di Sumatra? Mengapa kakaktua

yang jamak ditemukan di Lombok tidak terlihat di Bali, yang hanya terpisah selat sempit? “Selat Lombok ini lebarnya hanya 15 mil, dan kita hanya memerlukan waktu dua jam untuk menyeberangi dua tempat yang memiliki perbedaan [fauna] sangat besar di muka bumi ini; sebegitu berbedanya selayaknya perbedaan hewan-hewan di Eropa dan Amerika,” renung Wallace.

Wallace adalah orang pertama yang menyadari perbedaan mencolok antara fauna Indonesia bagian barat dengan timur, Kalimantan dengan Sulawesi, dan antara Bali dan Lombok. Untuk menandai perbedaan ini, pada 1859 Wallace menarik garis antara Bali dan Lombok, serta antara Kalimantan dan Sulawesi. Kemudian pada 1896, Richard Lydekker juga menengarai perbedaan fauna antara Papua dan Kepulauan Maluku ke barat. Sebagaimana Wallace, Lydekker menarik garis maya untuk menandainya. Wilayah di antara garis maya yang dibuat Wallace dan garis Lydekker inilah yang kini disebut Kawasan Wallacea (Gambar 2.1).



Gambar 2.1. Kawasan Wallacea, terentang antara Garis Wallace dan Garis Lydekker.

Seperti dugaan Wallace, perbedaan fauna menyolok tadi ternyata disebabkan oleh sebaran maupun posisi daratan dan lautan yang senantiasa bergerak akibat pergeseran lempeng sejak awal proses pembentukan bumi. Kekayaan biodiversitas di bumi Indonesia merupakan manifestasi dari pola pergerakan tersebut. Secara geografis, Kepulauan Indonesia merupakan wilayah paling dinamis yang dipengaruhi oleh pergeseran lempeng, iklim, dan pola arus laut. Ketiganya berkontribusi pada kekayaan biodiversitas dan kompleksitasnya.

Sejarah alam yang rumit dan berkelindan ini tercermin jelas di Sulawesi, yang proses pembentukannya melalui berbagai tumbukan, subduksi, dan obduksi. Sulawesi mewakili pertemuan antara margin gunung berapi dan berbagai potongan lempeng mikro yang muncul dan bergabung di periode yang berbeda-beda.

Sulawesi terbagi dalam tiga potongan lempeng mikro yang menunjukkan betapa gado-gado muasal pulau yang oleh Wallace bahkan dijuluki "anomali". Tiga potongan itu Busur Plutono-vulkanik Sulawesi Barat,

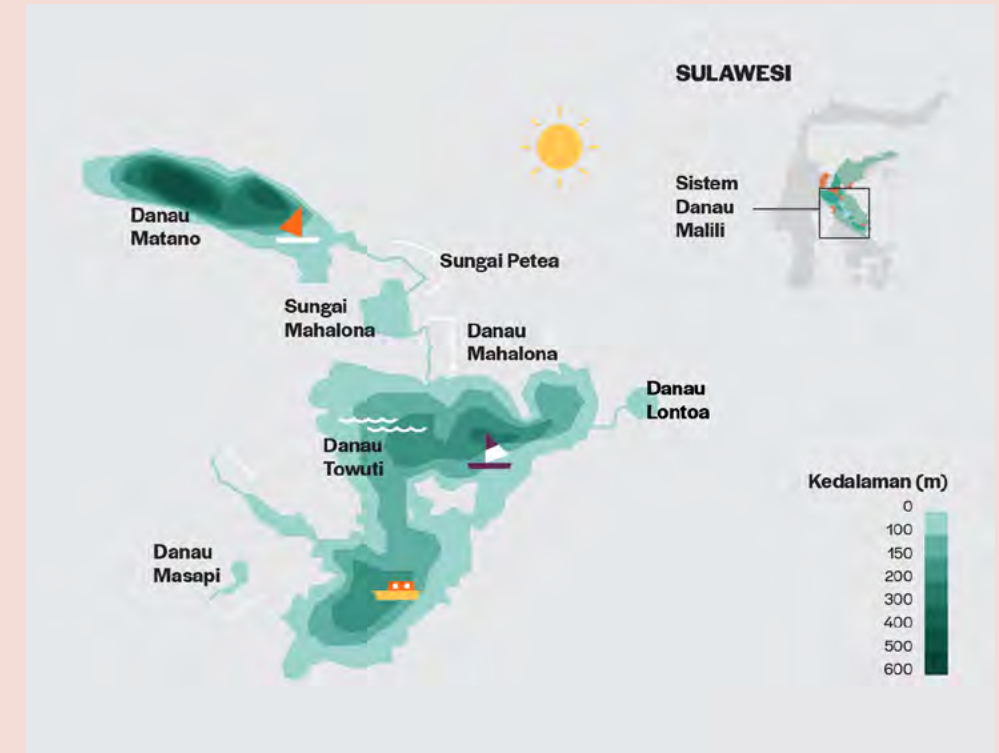
Sabuk Ofiolit Sulawesi Timur, dan Sabuk Metamorf Sulawesi Tengah, dengan dua potongan lempeng yang lebih kecil, yaitu Banggai-Sula di timur laut dan Blok Tukang Besi atau Kepulauan Wakatobi di tenggara.

Geologi kepulauan Indonesia dan Filipina pada umumnya, serta kawasan Wallacea pada khususnya, adalah ranah paling pelik di muka bumi. Serangkaian peristiwa abiotik akibat pergerakan lempeng tektonik justru membentuk alam biotik, yang lantas mendorong kemunculan pusat biodiversitas di Tanah Air.

Sejarah pembentukan Kawasan Wallacea sudah bermula 200 juta tahun silam ketika di planet ini hanya terdapat dua benua raksasa: Laurasia dan Gondwana. Laurasia terletak di belahan bumi utara, terdiri atas Amerika Utara, Eropa, dan sebagian besar benua Asia. Sementara Gondwana di belahan bumi selatan mencakup Antartika, Australia, India, Amerika Selatan, Selandia Baru, Kaledonia Baru, serta sebagian Asia bagian timur dan tenggara.

Pada rentang 160 juta sampai 100 juta tahun silam, fragmen Asia

## Danau Purba Impian Wallace



Tak hanya AR Wallace, epos klasik Bugis / *La Galigo* pun mencatat keganjilan Sulawesi. Di ujung selatan Soroako, sebuah kota tambang di Sulawesi Selatan, terletak Danau Matano, salah satu dari rangkaian danau purba Malili. Sistem Danau Malili terdiri dari lima danau, yaitu Matano, Mahalona, Towuti, Masapi, dan Lontoa, yang semua saling terhubung dengan sungai. Inilah rangkaian danau purba satu-satunya di dunia yang saling terhubung aliran air. Berumur antara 1-4 juta tahun lalu,

Sistem Danau Malili dengan biota yang luar biasa unik merupakan laboratorium alam ideal untuk mempelajari evolusi dan spesiasi. Tidak hanya itu, sifat biogeokimia yang ganjil menjadikan rangkaian Danau Malili terisolasi dari ekosistem akuatik lain tidak hanya secara geografis, namun juga ekologis.

Dari lima danau dalam Sistem Danau Malili, Matano merupakan yang tertua, dan terdalam (mencapai 590 m), dengan konsentrasi zat besi paling

tinggi dari perairan tawar mana pun di muka bumi (Vaillant *et al.* 2011). Berbeda dengan saudaranya, Towuti sebagai yang terluas (560 km<sup>2</sup>, dibandingkan dengan Matano yang hanya 164 km<sup>2</sup>) memiliki kekayaan spesies tertinggi, 39 di antaranya endemik Danau Towuti. Tiap danau di Sistem Danau Malili memang memiliki endemisitas masing-masing. Saling terhubung namun memiliki endemisitas masing-masing merupakan keanehan yang menjadikan Malili sebagai laboratorium alam impian.

Mengingat isolasi panjang yang dialami danau-danau purba, tak ayal jika spesies-spesies endemik dalam ekosistem ini memiliki karakter berbeda. Tapi Danau Malili sungguh istimewa. Sejumlah spesies di rangkaian Danau Malili menunjukkan ciri baru secara morfologis dan perilaku yang khas dalam kelompok taksonominya—yang lagi-lagi, berlainan untuk tiap danau. Danau Mahalona dan Towuti, misalnya, memiliki Calanoida dengan perbedaan genetik yang besar. Sungguh aneh, mengingat biasanya jenis plankton mudah tersebar pada ekosistem yang terhubung. Contoh lain endemisitas tiap danau adalah spesies ikan pelangi, *Telmatherina*. Danau Matano memiliki 10 spesies *Telmatherina*, sedangkan Mahalona dan Towuti masing-masing memiliki lima spesies *Telmatherina*, namun Danau Masapi tidak dihuni *Telmatherina*. Anehnya, *Telmatherina*-danau juga tidak ditemukan di Sungai

Petea, penghubung Matano dan Mahalona. Sungai Petea ini juga membatasi distribusi kepiting air tawar. Pola yang sama juga berlaku pada udang.

Terbatasnya keberadaan suatu spesies pada danau yang saling terhubung menunjukkan adanya penghalang-penghalang ekologis terhadap persebaran dan kolonisasi spesies, yang berlangsung hingga kini. Kondisi fisik, kimiawi, biologis, dan geografis merupakan aspek-aspek yang berkontribusi dalam pengelompokan spesies endemik Malili. Tiap danau di Malili berbeda-beda usia pembentukannya, termasuk berbeda “pengalamannya”. Matano dan Towuti, misalnya, mengalami fluktuasi ketinggian permukaan air, yang mungkin menyebabkan perubahan-perubahan dalam habitat maupun periode isolasi.

Sistem Danau Malili, yang memiliki endemisitas tiap danau termasuk pada sungai-sungai penghubungnya, merupakan sistem yang luar biasa untuk studi evolusi. Kondisi fisik dengan tingkat isolasi berbeda pada periode yang juga berlainan menawarkan model alami ideal untuk penelitian spesiasi, yang dapat didekati melalui berbagai bidang, yaitu geologi, limnologi, ekologi, genomik, serta antropogenik.

Andai Wallace tidak melewatkan Danau Malili.

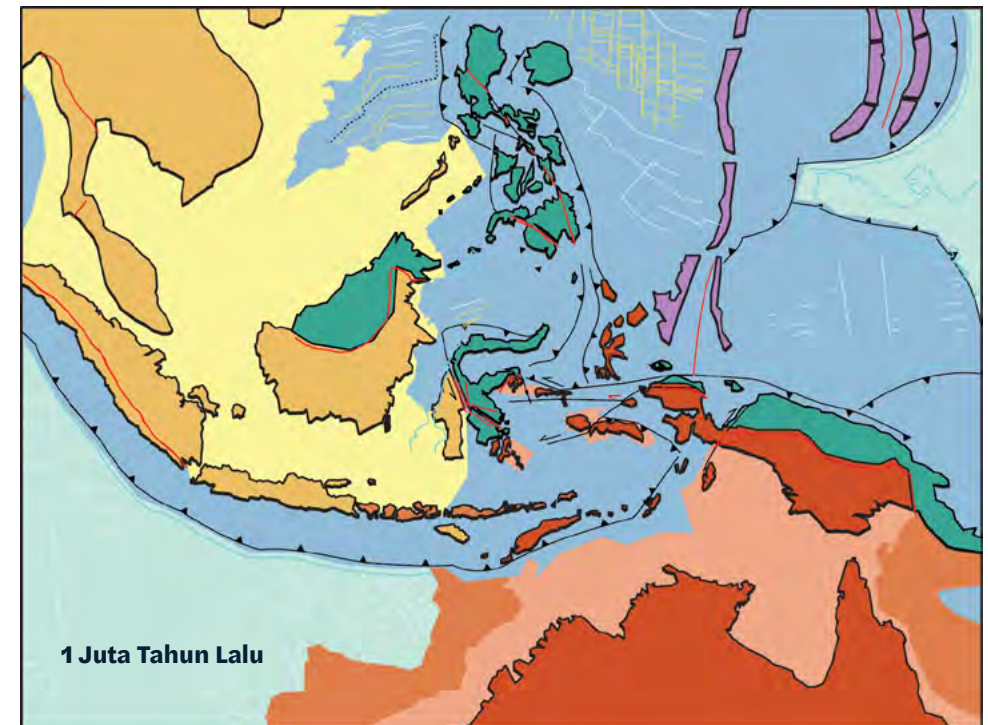
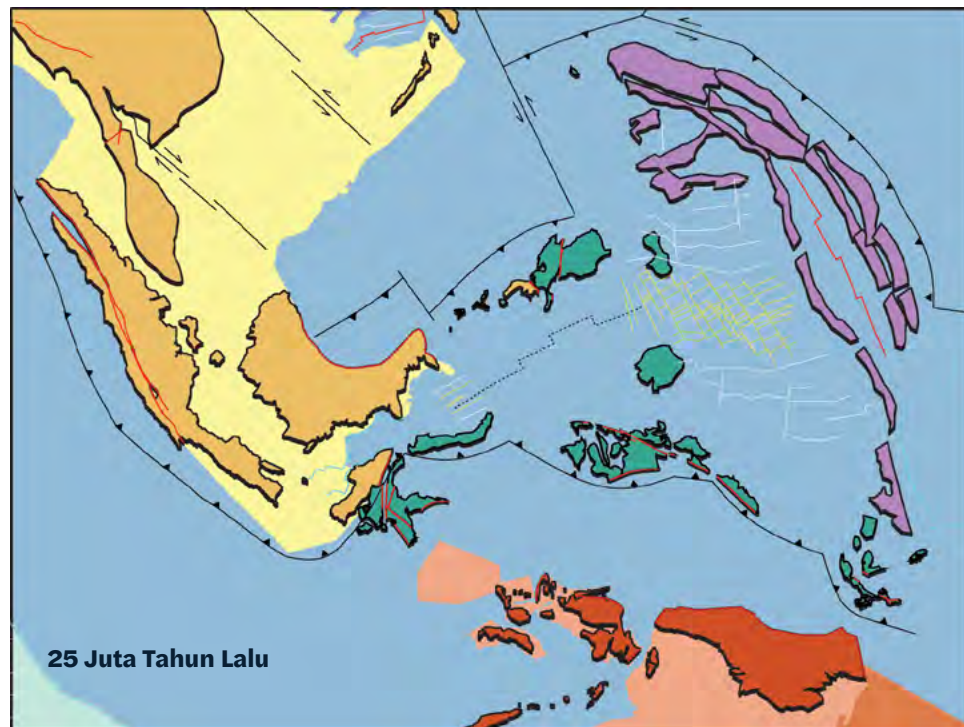
bagian tenggara ini mengapung dan terisolasi di Samudra Tethys, lautan kuno yang luas di antara Laurasia dan Gondwana. Kemudian, sekitar 70 juta tahun lalu, lempeng yang membawa Australia, Papua, Sulawesi timur, Seram, Timor, dan Tanimbar terpecah dari lempeng Antartika—bagian yang tersisa dari Gondwana—dan berlayar menuju utara. Dari Gondwana, Australia membawa bentuk-bentuk primitif satwa mamalia dan burung serta tumbuhan berbunga.

Sekitar 40 juta tahun lalu, fragmen Asia bagian tenggara mencapai wilayah khatulistiwa. Pada masa itu, nusantara bagian barat telah berada dalam posisi yang kurang lebih sama dengan hari ini. Semenanjung Melayu telah bersatu dengan Laurasia (Gambar 2.2). Posisi inilah yang diperkirakan berfungsi sebagai batu loncatan yang mangkus, sehingga memungkinkan perpindahan dua arah antara biota benua Asia dan Australia, khususnya yang mampu melewati lautan. Di Pulau Sulawesi, misalnya, terjadi pertemuan antara berbagai kuskus yang khas Gondwana dan babirusa yang khas Asia.

Pada 21 ribu tahun lampau di masa glasial maksimum terakhir (LGM),

perairan Paparan Sunda dan Sahul belum terbentuk. Pulau-pulau Sumatra, Jawa, serta Kalimantan, masih menyatu dengan Asia, dan sebagian Laut Natuna sampai laut Jawa masih berupa daratan. Demikian juga Papua masih menyatu dengan Australia, Laut Arafura masih berupa daratan, dan Teluk Carpentaria, masih berupa danau besar. Pasca-LGM, permukaan laut mengalami kenaikan 125 meter, membentuk kepulauan seperti sekarang ini.

Pembentukan pulau-pulau di Paparan Sunda di bagian barat dan Paparan Sahul di timur berdampak sangat kompleks terhadap biodiversitas Indonesia. Di bagian tengah, terdapat beberapa pulau yang disebut sebagai Kepulauan Sunda Kecil, Pulau Sulawesi, Pulau Halmahera, Kepulauan Maluku, serta pulau-pulau kecil yang banyak dan dikelilingi perairan dalam. Laut Banda, misalnya, memiliki kedalaman kurang lebih 7 km. Jelas tidak ada pulau yang menghubungkan laut dalam antara Paparan Sahul dan Sunda. Proses-proses tersebut mendukung proses isolasi, yang merupakan faktor paling kuat dalam menentukan endemisitas dan kekayaan spesies, sehingga menjadi “bahtera Nuh” flora dan fauna.



*Gambar 2.2 Pergerakan lempeng tektonik Asia Tenggara sejak 50 juta tahun lalu, yang membentuk Pulau Sulawesi (Hall et al. 2002)*

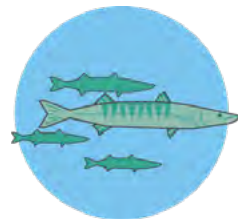
## Variabilitas Iklim dan Pola Arus Laut

Keanekaragaman biogeografi laut yang mencerminkan kekayaan biodiversitasnya ditentukan antara lain oleh keunikan posisi geografis, keberadaan pulau-pulau besar dan kecil, batimetri, pola arus, dan variabilitas iklim.

Iklim maritim Kepulauan Indonesia dipengaruhi oleh beberapa pola iklim yang berdetak pada skala waktu yang bervariasi. Berada di bentang tropis, variabilitas iklim musiman di Indonesia dipengaruhi oleh perubahan arah angin muson yang membawa uap air dari daratan Asia Laut Cina Selatan di puncak musim hujan (Januari-Februari). Dan sebaliknya pada musim kering dengan puncaknya di bulan Juni-Agustus. Variabilitas iklim ini telah membentuk pola kehidupan masyarakat Indonesia seperti waktu bercocok tanam dan melaut. Namun setiap 2-7 tahun, pola iklim ini didisrupsi oleh fenomena iklim El Niño Southern Oscillation (ENSO) di Samudra Pasifik dan Indian Ocean Dipole (IOD) di Samudra Hindia. Pada fase positif ENSO atau El Niño, mayoritas wilayah Indonesia mengalami kekeringan pada puncak musim hujan

sepanjang periode ini walaupun sedang musim hujan (karena angin muson). Dan pada saat fase negatif ENSO atau La Niña terjadi peningkatan curah hujan. Meskipun ada kemiripan antara IOD dan ENSO di mana fase positif IOD membawa kekeringan dan sebaliknya, kedua fenomena yang melibatkan interaksi laut dan atmosfer tersebut memiliki karakter masing-masing dan dapat terjadi di waktu yang berbeda.

Dalam skala regional, arus laut permukaan membawa biota, baik dari perairan Pasifik Barat dan Hindia Timur, maupun perairan Paparan Sunda dan Paparan Sahul. Implikasi pola arus laut ini yang pada akhirnya membentuk keanekaragaman dan sebaran biogeografi laut dalam berbagai skala luasan.



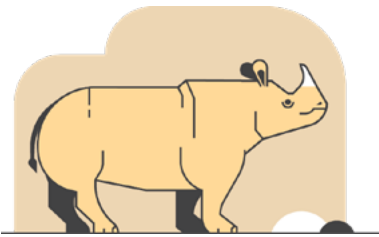
## Biodiversitas Terrestrial

Bak kotak pandora, alam Indonesia menyimpan kekayaan biodiversitas yang kerap tak terduga. Sejak abad ke-12 pun, pelancong Venesia, Marco Polo, sudah dibuat terperangah dengan binatang-binatang ganjil yang dilihatnya di Sumatra. Konon, ia melihat *unicorn*. "Ada gajah-gajah liar di negeri ini, dan beberapa *unicorn*, yang juga hampir sebesar gajah. Binatang itu berambut seperti kerbau, kakinya seperti gajah, dan memiliki sebuah tanduk yang sangat hitam dan tebal di tengah dahinya... Terlihat monyet-monyet yang banyak sekali jumlah dan jenisnya. Alap-alap yang tubuhnya sehitam burung gagak pun jamak ditemukan." (Marco Polo dan E. Latham 1958)

Makhluk fantastis yang dilihat Marco Polo itu bisa jadi badak bercula satu. Delapan abad kemudian pada abad ke-21, para ilmuwan masih menemukan spesies baru, misalnya orang utan Tapanuli (*Pongo tapanuliensis*) dan tarsius Jatna (*Tarsius supriatnai*). Tanah Indonesia tak pernah berhenti memberi kejutan dalam ilmu

pengetahuan. Penemuan orang utan Tapanuli, misalnya, membuka jalur evolusi silsilah genus *Pongo*. Spesies ketiga dari genus *Pongo* ini menguak distribusi dan perkawinan *Pongo* setelah meletusnya Gunung Toba 75.000-100.000 tahun lalu. Tak hanya endemik di wilayah Tapanuli (selatan, tengah, dan utara), sejarah evolusi *Pongo tapanuliensis* dapat dilacak hingga 3,38 juta tahun lalu, melengkapi sejarah kelompok Kera Besar yang terdiri atas simpanse, gorila, orang utan, dan bonobo.

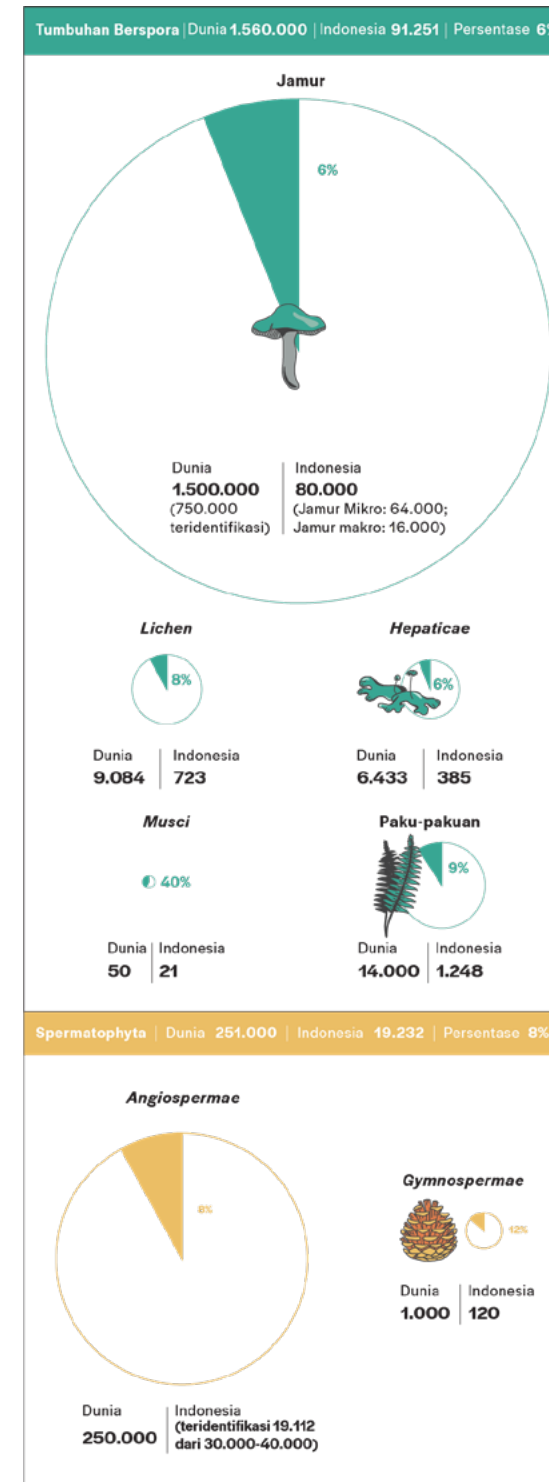
Walau luas area daratan Indonesia hanya 1,28% dari luas daratan dunia (1,9 juta km<sup>2</sup>/148,9 juta km<sup>2</sup>), namun kekayaan biodiversitas di daratan Indonesia merupakan salah satu yang tertinggi di dunia. Posisi geografis yang sangat unik merupakan kunci kekayaan berlimpah tersebut. Indonesia merupakan rumah bagi 720 spesies mamalia, 36% di antaranya merupakan mamalia endemik. Sedikitnya 781 spesies reptil dan 61 spesies primata hidup di Tanah Air. Sementara jenis burung mencapai 1.800 spesies, menjadikan



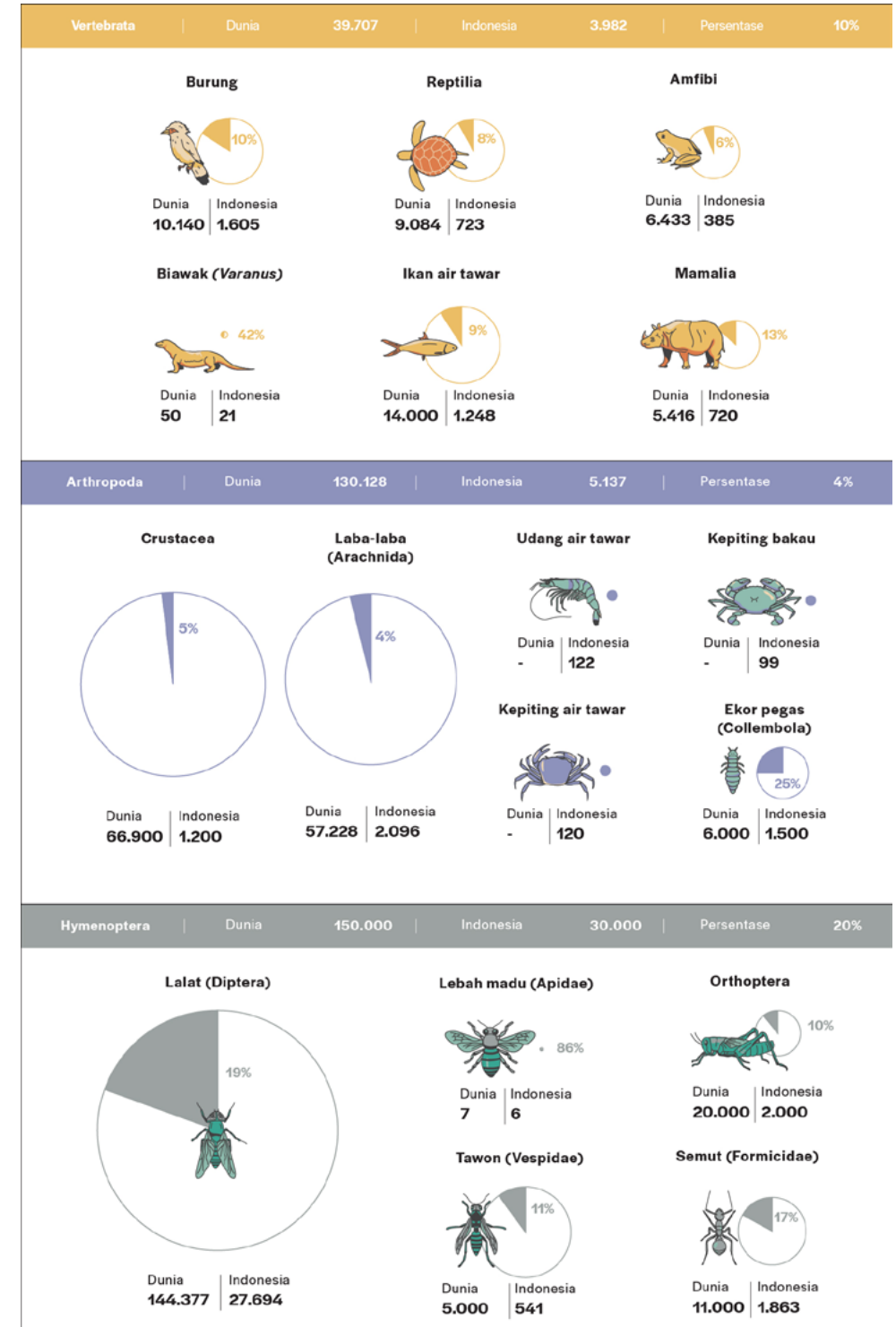
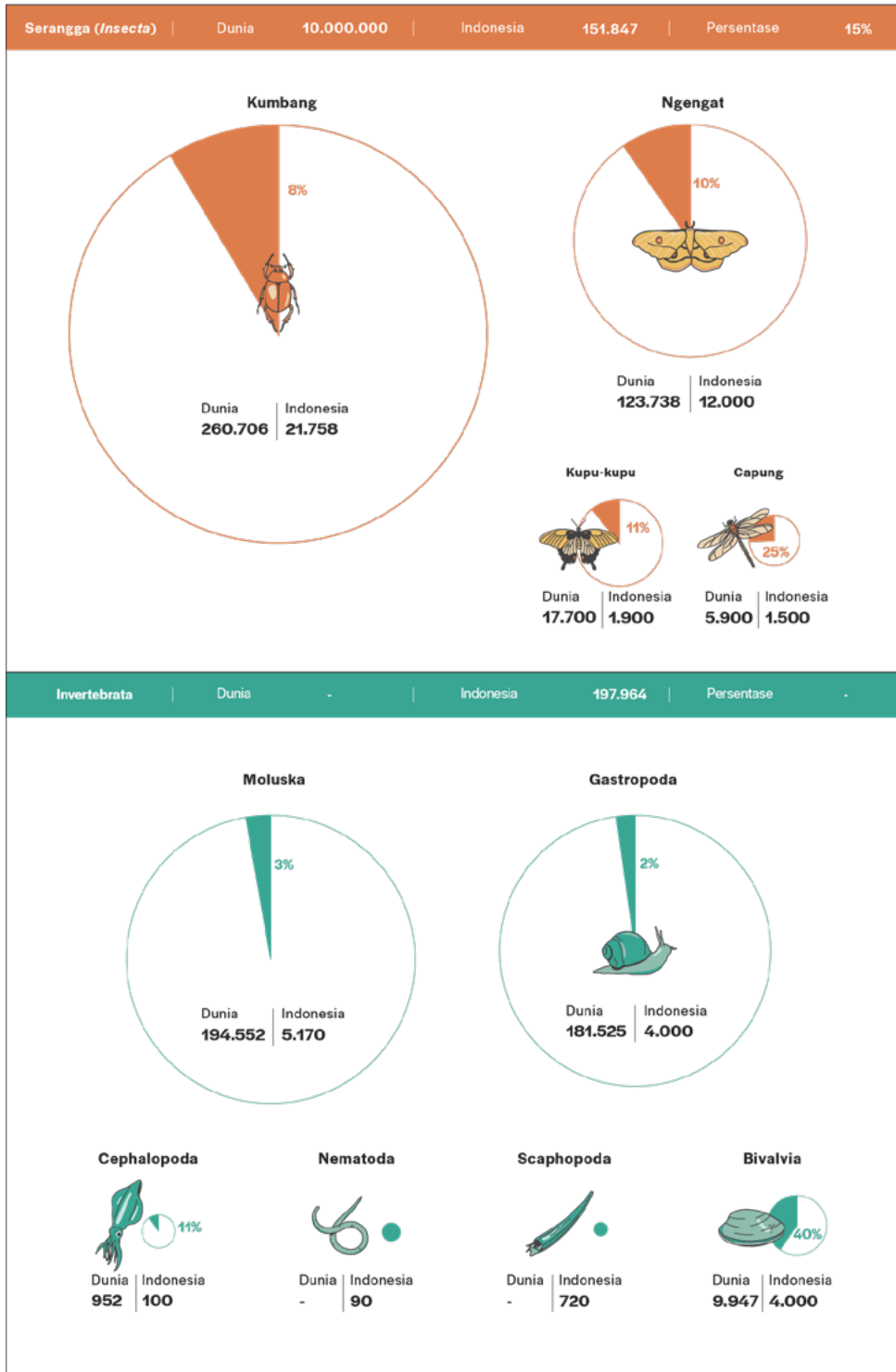
Indonesia berada pada urutan kelima dunia yang memiliki kekayaan aves terbesar.

Sebagai negara beriklim tropis, daratan Indonesia adalah surga biodiversitas flora, ketiga setelah Brasil dan Kolombia dengan keanekaragaman jenis yang tinggi. Sebagian besar keanekaragaman jenis yang tinggi ini disumbangkan oleh biodiversitas yang terdapat pada ekosistem hutan yang meliputi hutan bakau, hutan rawa, hutan gambut, hutan pantai, hutan musim, dan hutan hujan tropis. Bahkan

dalam jumlah spesies tumbuhan endemik terbanyak sejagat, Indonesia dan Brasil berbagi predikat juara. Untuk tanaman berbunga (Spermatofita), Indonesia memiliki 19 ribu spesies tanaman berbunga, yang menyumbang 8% dari total spesies tanaman berbunga di dunia. Untuk tanaman berspora, Indonesia menyumbang 9% dari total spesies paku-pakuan (Pteridofita) dunia. Indonesia juga dikaruniai ratusan lumut (Briofita) dari kelas Hepaticae dan 21 spesies dari kelas Musci, yang mencakup 40% dari jumlah jenis global (Gambar 2.3-2.6).



Gambar 2.3 Perbandingan jumlah jenis flora Indonesia dengan dunia (data diambil dari Widjaja et al. 2014).

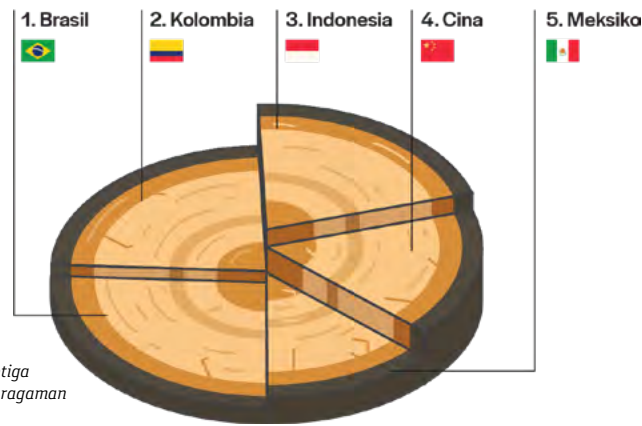


Gambar 2.4 Perbandingan jumlah jenis fauna Indonesia dengan dunia (data diambil dari Widjaja 2014).

Dengan wilayah yang membentang dari Sabang sampai Merauke, dari Miangas hingga Pulau Rote, berbagai kelompok flora tersebut tersebar di berbagai pulau. Paku-pakuan, misalnya, paling banyak dijumpai di Sumatra, lalu diikuti Kalimantan, Papua, Sulawesi, Jawa,

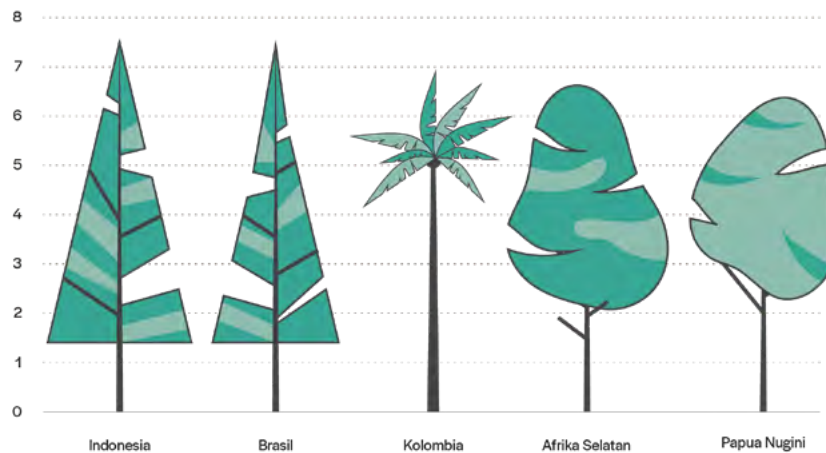
Maluku, dan Sunda Kecil. Sebaran terbesar untuk tanaman berbiji terbuka ada di Sulawesi, Sumatra, dan Papua. Sementara itu, tanaman berbiji tertutup banyak terdapat di Kalimantan, diikuti gabungan kawasan Papua dan Maluku, Sumatra, dan Jawa.

**Total Keanekaragaman Tumbuhan Tinggi Negara Megabiodiversitas**



Gambar 2.5 Indonesia menempati posisi ketiga setelah Brasil dan Kolombia dalam keanekaragaman tumbuhan tinggi (Mittermeier et al. 1998).

**Endemisitas Tumbuhan Tingkat Tinggi di Tingkat Global**



Gambar 2.6 Indonesia dan Brasil berbagi predikat juara dalam tingkat endemisitas tumbuhan tingkat tinggi. Sekitar 75% tumbuhan endemik ditemukan di dua negara ini (Mittermeier et al. 1998).

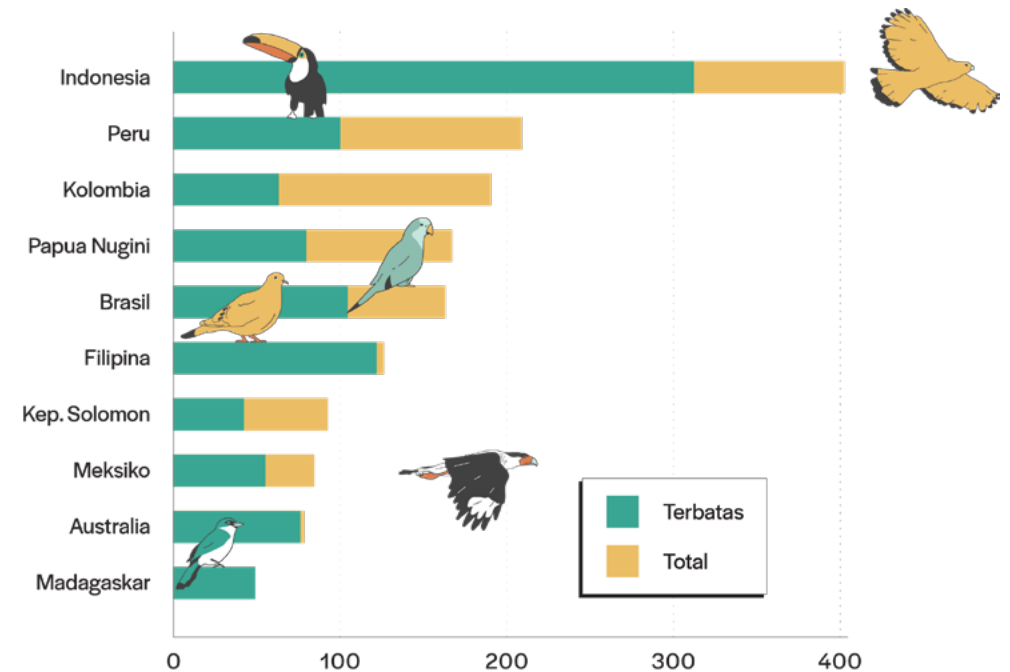
**Endemisitas Fauna Terrestrial**

Dibandingkan dengan tempat-tempat lain, biodiversitas terrestrial Indonesia terbilang unik dengan tingginya jumlah fauna darat endemik. Negeri ini memiliki sekitar tiga ribu spesies vertebrata, yang mencakup 10% dari total jenis hewan bertulang belakang di dunia. Dari jumlah itu, separuhnya merupakan spesies endemik. Untuk spesies burung dengan daerah jelajah terbatas, yang jangkauan terbangnya tak sampai 50 ribu km<sup>2</sup>, misalnya, Indonesia memiliki spesies endemik

terbanyak sejagat. Jumlahnya bahkan lebih dari dua kali lipat ketimbang negara mana pun di dunia (Gambar 2.7).

Beberapa contoh fauna endemik Indonesia antara lain komodo, orang utan, owa Jawa, monyet Sulawesi, ikan pelangi dari famili Telmatherinidae, dan lima spesies lebah madu dari genus *Apis*. Sayangnya, sebagian besar fauna daratan tersebut terancam punah. Sebagai contoh, dari 117 spesies burung yang nyaris lenyap dari muka bumi, 66 jenis di antaranya adalah burung dengan jelajah terbatas.

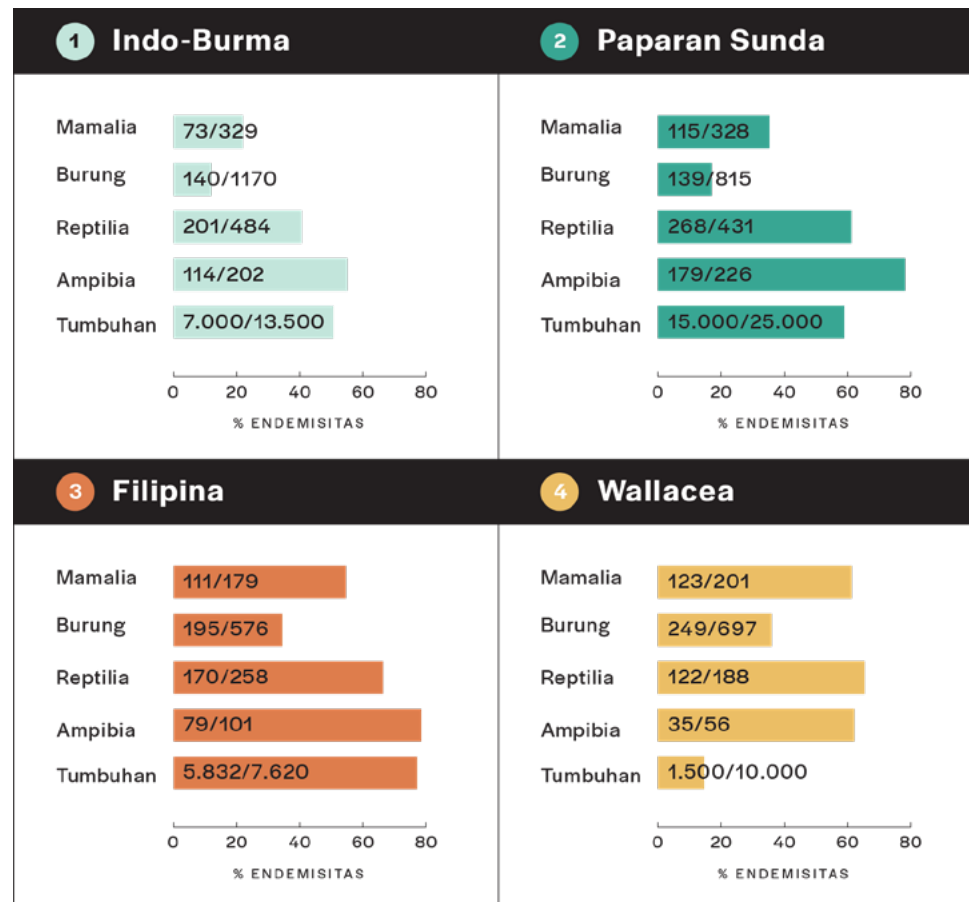
**Negara-negara dengan Spesies Burung Jelajah Terbatas Tertinggi di Dunia**



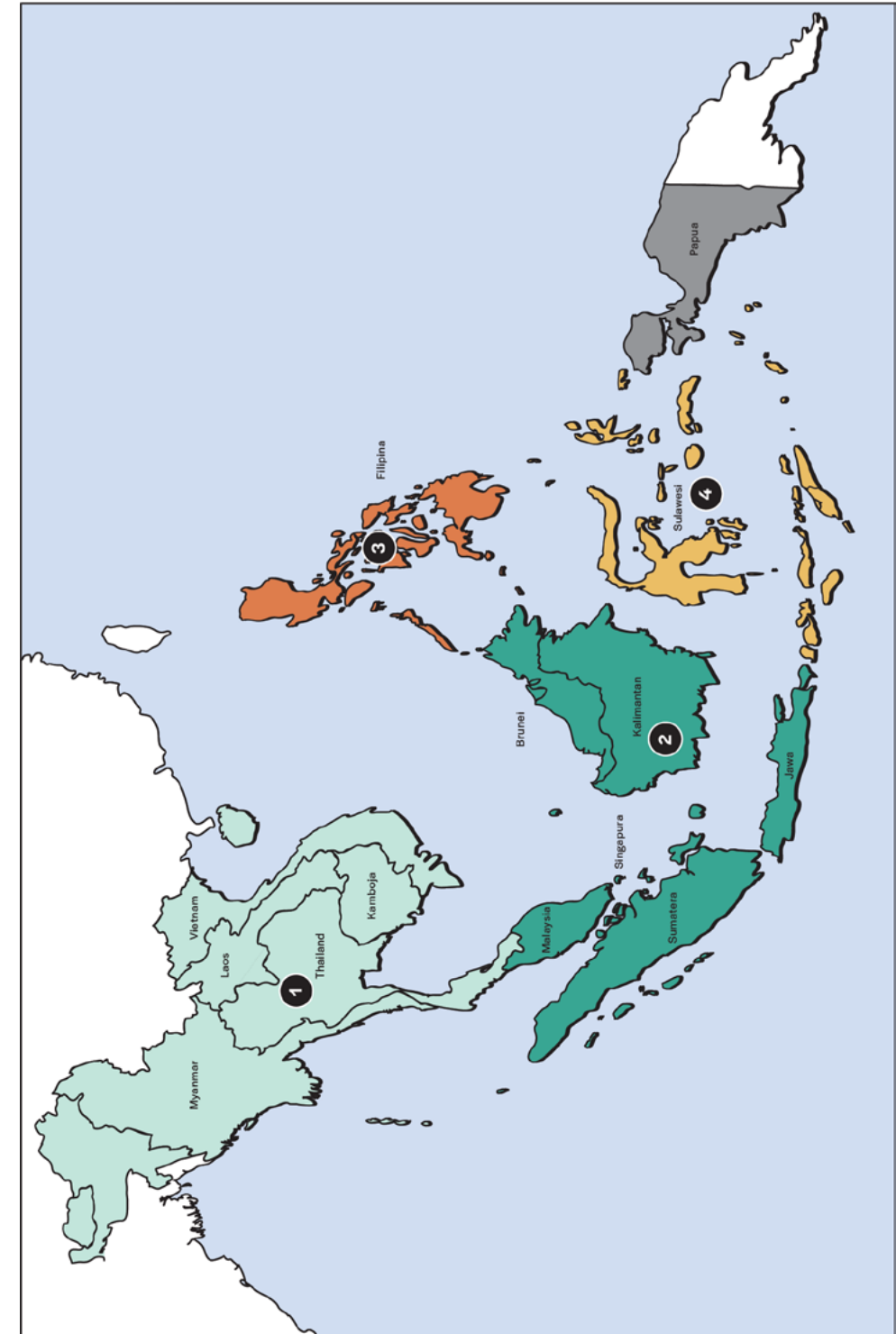
Gambar 2.7 Indonesia tak tertandingi sebagai rumah bagi burung-burung dengan jelajah terbatas, menengarai endemisitasnya. (Stattersfield et al. 1998).

Pola sebaran kekayaan spesies dan endemisitas pada sejumlah wilayah biogeografi Indonesia pun sangat berbeda (Gambar 2.8). Untuk burung, misalnya, Paparan Sunda memiliki biodiversitas tinggi

namun endemisitas rendah. Di Kawasan Wallacea, jumlah jenis burung rendah namun tingkat endemiknya tinggi. Adapun Paparan Sahul memiliki burung yang sangat beragam dengan endemisitas sedang.



Gambar 2.8 Angka endemisitas dan kekayaan spesies di Asia Tenggara. Sumbu X menunjukkan persentase endemisitas, sedangkan sumbu Y menunjukkan kelompok hewan/tumbuhan. Misalnya jumlah mamalia 73/329 di Indo-Burma, berarti 73 dari 329 mamalia merupakan endemik area tersebut, yang berarti 22,18% endemisitas sebagaimana ditunjukkan melalui panjang batang (dimodifikasi dari Sodhi et al. 2004).



## Biodiversitas Laut dan Ekosistem Perairan Umum Daratan

Dikeluhkan banyak peneliti karena kekayaan biodiversitas perairan Indonesia yang ditengarai sekaya biodiversitas daratnya ini tak terdokumentasi dengan baik: sesungguhnya seberapa kaya biodiversitas perairan Indonesia? Jika memang sungguh kaya, seberapa besar kontribusi berbagai macam ekosistem di laut, pesisir, dan perairan umum terhadap kekayaan biodiversitas perairan? Apakah endemisitas di perairan Indonesia juga seunik makhluk-makhluk daratnya—atau bahkan lebih ganjil? Bagaimana pola persebaran makhluk-makhluk yang sepertinya lebih sedikit menghadapi batasan geografis ini? Apakah ada proses isolasi untuk spesies laut dan lantas bagaimana menentukan wilayah biogeografis di luasnya samudra?

### Indonesia sebagai Pusat Biodiversitas Kelautan Dunia

Perairan serta pesisir Indonesia dan sekitarnya (Indo-Pacific Coral Triangle) diakui merupakan pusat biodiversitas dunia. Kawasan

Coral Triangle atau segitiga karang memiliki 2.700 spesies ikan dan 600 spesies karang yang habitatnya mencakup Filipina, Indonesia bagian timur, Papua, hingga Kepulauan Solomon (Asaad 2018). Beragam dan kayanya biodiversitas laut di perairan Indonesia dan sekitarnya menjadikan wilayah ini sebagai “segitiga karang dunia”, bersama-sama dengan Laut Karibia berbagi reputasi sebagai *biodiversity hotspot*. Tingginya tingkat biodiversitas di perairan Indonesia tidak hanya menggambarkan jumlah marga dan jenis berbagai biota laut. Namun juga sejarah alam yang kompleks dan mencengangkan.

Lantas, apakah terbentuknya endemisitas spesies laut berbeda dengan spesies darat? Bagaimana suatu biodiversitas bisa berpusat hanya pada satu titik tertentu? Mengapa, misalnya, dari sekitar 300 juta km<sup>2</sup> luas lautan dunia, ikan lebih memilih berdiam di terumbu karang perairan Indonesia? Dengan luas terumbu karang yang hanya mencakup 0,1% dasar laut, populasi

ikan kawasan segitiga karang ini mencakup sepertiga dari seluruh spesies ikan dunia.

*Biodiversity hotspot* tidak hanya merupakan tempat terbentuknya spesies-spesies, namun juga tempat terakumulasinya biodiversitas dari habitat-habitat sekitarnya, yang makin terancam aktivitas manusia.

Isolasi fisik bukan merupakan satu-satunya penyebab terbentuknya spesiasi mengingat banyak spesies berubah mengikuti batas-batas ekologis. Meskipun spesiasi di ekosistem darat dan laut mengikuti proses yang mirip, namun tetap saja berbeda. Peluang terjadinya isolasi geografis di lautan lebih kecil ketimbang di darat, sehingga spesiasi lebih besar peluangnya terjadi karena batas-batas ekologis.

Kepulauan Indo-Melayu sebagian besar terdiri dari daratan yang luas seperti Sumatra, Semenanjung Thai-Melayu, Kalimantan, dan Sunda Besar. Selama masa glasial maksimum terakhir (LGM), pulau-pulau ini bersatu membentuk massa daratan besar yang dikenal sebagai beting Sunda. Terlepas dari asal-usul geologisnya yang serupa, struktur

populasi flora dan fauna di pulau-pulau ini tidak homogen. Banyak studi yang telah mengungkapkan adanya terobosan genetik yang tajam melintasi Laut Jawa, yang membagi populasi menjadi utara (Pasifik) dan selatan (Hindia).

Aliran gen dapat didorong oleh berbagai faktor, seperti arus dan sejarah geologi suatu lokasi. Sejarah geografis seperti kemunculan Paparan Sunda selama periode Pleistosen, kemungkinan merupakan faktor utama yang bertanggung jawab atas aliran gen yang terbatas secara historis antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik, yang kemudian, mungkin telah memicu penyimpangan garis keturunan di kedua samudra. Di Indonesia timur, Halmahera Eddy (pusaran arus Halmahera) dan Arus Lintas Indonesia (*Indonesian Throughflow*) kemungkinan merupakan kandidat yang membentuk hambatan biogeografis antara Indonesia timur dan barat. Contoh lain, sirkulasi air dan pusaran arus di ujung selatan Sumatra berperan dalam mempertahankan struktur genetik spesies bakau *Rhizophora mucronata Lam.* di Semenanjung Melayu dan Sumatra.

Kawasan segitiga karang memiliki sejarah panjang akumulasi spesies yang dapat dirunut hingga masa Miosen (20-12 juta tahun lalu), yang terus berlanjut hingga masa Pleistosen, Holosen, hingga kini.

Terdapat tiga model yang ditawarkan untuk menjelaskan kekayaan biodiversitas segitiga karang: pusat spesiasi, pusat akumulasi, dan pusat tumpang tindih. Atau bahkan model umpan balik, yaitu suatu pusat biodiversitas yang mengalami ketiga model di atas (Bowen *et al.* 2013). Perlu dicatat bahwa terdapat banyak kombinasi batas dan perbedaan ekologis, dari yang tajam, samar, atau yang muncul sesekali (arus laut, massa air, massa daratan masa glasial) yang memengaruhi kekayaan biodiversitas.

Model pusat spesiasi mengusung teori bahwa pusat biodiversitas tropis adalah pengeksplor spesies, yang kemungkinan besar diakibatkan oleh berbagai peristiwa geologis yang kompleks dan heterogenitas habitat, berkelindan dengan persaingan hidup yang sengit. Berbeda dengan pusat spesiasi, teori pusat akumulasi menyatakan bahwa tingginya jumlah spesies di kawasan segitiga

karang merupakan hasil spesiasi dari lokasi-lokasi sekelilingnya dengan persebaran takson baru lanjutan yang berkumpul di kawasan segitiga karang. Pusat tumpang tindih lain lagi. Menurut model ini, kekayaan biodiversitas segitiga karang sebagian karena bertemunya fauna-fauna khas dari Samudra Hindia dan Samudra Pasifik.

Indo-Pacific Barrier yang memisahkan Samudra Hindia dan Samudra Pasifik selama terjadinya penurunan permukaan laut, pada masa isolasi menyebabkan fauna-fauna dari kedua samudra ini tersebar. Meskipun lokasi batas Indo-Pacific Barrier yang tepat diperdebatkan, banyak spesies menunjukkan diferensiasi genetik yang kuat antara populasi Samudra Hindia dan Pasifik, termasuk botani laut, seperti hutan bakau dari genus *Ceriops* dan *Gymnorhiza bruguiera* (Urashi *et al.* 2013; Huang *et al.* 2008). Diferensiasi genetik yang serupa antara populasi kedua samudra tersebut juga telah dibuktikan pada beragamnya hewan laut termasuk ikan karang, gastropoda laut *Nerita albicilla*, dan bintang laut mahkota duri *Acanthaster planci* (Thresher &

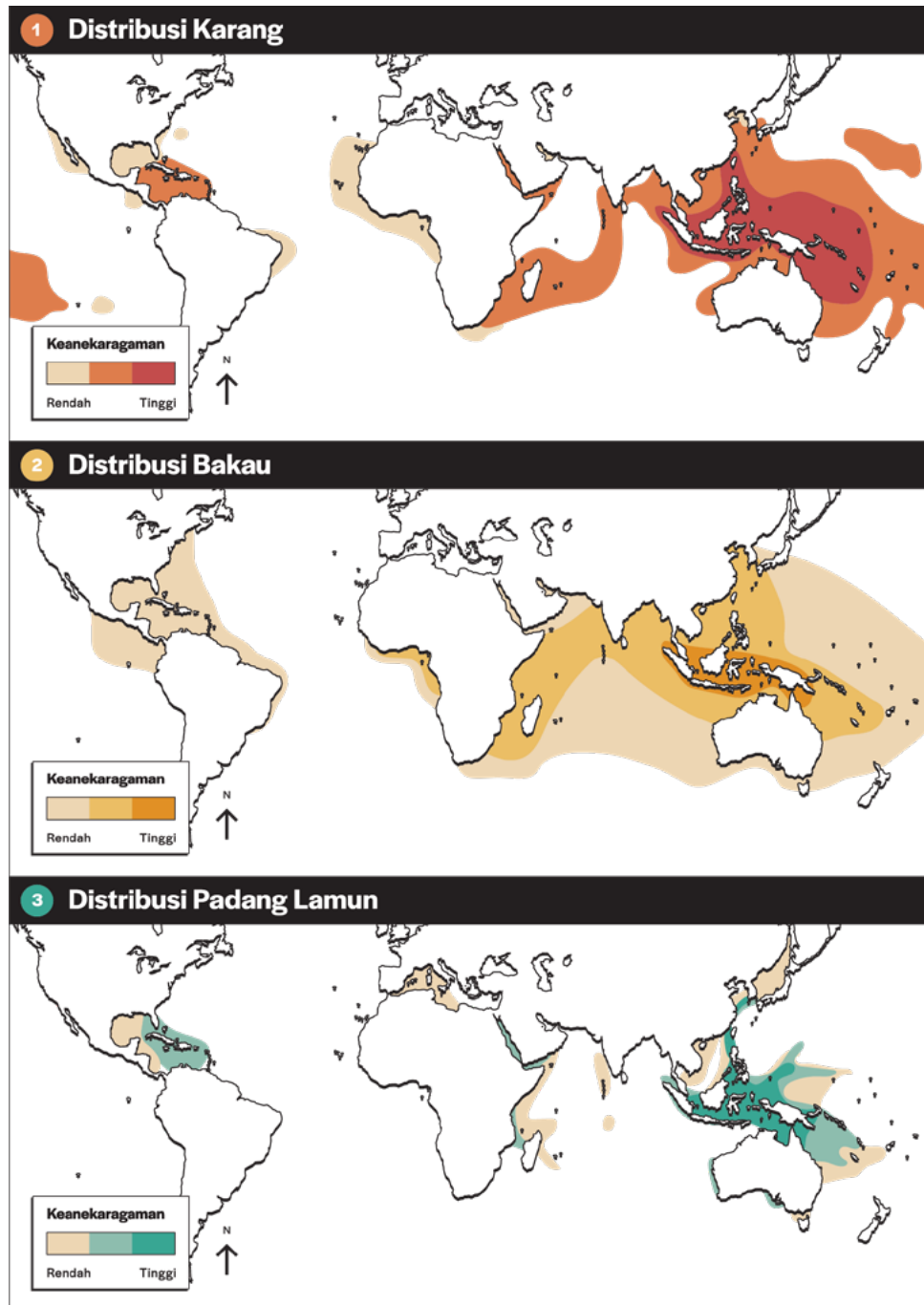
Brothers 1985; Gaither *et al.* 2009; Crandall *et al.* 2008; Vogler *et al.* 2008; Yasuda *et al.* 2009). Meskipun terdapat semakin banyak studi filogeni di Samudra Hindia dan Samudra Pasifik, hanya sedikit yang mencoba mengidentifikasi elemen-elemen spesifik di Kepulauan Indo-Melayu yang bertanggung jawab membangun dan memelihara penghalang ini: Indo-Pacific Barrier.

Tiga model yang diajukan di kawasan ini bisa jadi tidak cukup menjelaskan bagaimana kekayaan biodiversitas perairan segitiga karang. Model pusat akumulasi menjelaskan bahwa tingginya jumlah spesies di kawasan segitiga karang merupakan hasil spesiasi di lokasi pinggiran dengan penyebaran takson baru ke dalam kawasan segitiga karang, karena adanya isolasi di habitat perifer ini, serta pola arus dan angin. Model pusat tumpang-tindih menjelaskan bahwa keanekaragaman spesies yang tinggi di kawasan segitiga karang sebagian karena tumpang-tindih fauna yang berbeda dari Samudra Hindia dan Samudra Pasifik. Hipotesis ini didasarkan pada premis bahwa adanya mekanisme isolasi Indo-Pacific Barrier, yang memisahkan Samudra Hindia dan Samudra Pasifik

selama masa permukaan laut rendah, dengan fauna lautan ini menyimpang selama periode isolasi. Demikian juga model pusat spesiasi atau dikenal pusat asal-usul menjelaskan bahwa pusat keanekaragaman hayati tropis termasuk kawasan segitiga karang adalah kawasan pengeksplor spesies, kemungkinan didorong oleh fraktur populasi hasil kompleksitas geologi dan heterogenitas habitat ditambah dengan persaingan ketat. Meski demikian ketiga model tersebut masih menjadi hipotesis yang tidak berhenti untuk terus dikaji.

Model umpan balik bahkan menyatakan bahwa ketiga model di atas berlaku untuk suatu wilayah *biodiversity hotspot*. Distribusi ikan karang sejalan dengan model ini, mengingat banyaknya biodiversitas di kepulauan-kepulauan sekeliling kawasan segitiga karang berasal dari Indo-Pasifik tengah. Energi kinetik dari suhu permukaan laut yang terus-menerus tertahan kemungkinan juga merupakan faktor yang membentuk pola kekayaan spesies laut (Sanciangco *et al.* 2013).

Kawasan biodiversitas laut memang merupakan muasal spesies-spesies, namun kepulauan-kepulauan



**Gambar 2.9** Distribusi global dan tingkat biodiversitas tiga ekosistem kunci di wilayah pesisir dan laut, yakni ekosistem terumbu karang, hutan bakau, dan padang lamun. Perairan Indonesia memiliki biodiversitas paling tinggi di dunia untuk ketiga ekosistem tersebut (UNEP-WCMC (2001). United Nations Environment World Conservation Monitoring Center. Annual report).

terpencil, laut-laut marjinal, dan wilayah pesisir yang tandus, juga berkontribusi secara keseluruhan dalam kekayaan biodiversitas. Luasnya wilayah perairan dangkal dan panjang garis pantai di Indo-Pasifik merupakan manifestasi dari sejarah geologis yang panjang, yang terjadi bersamaan dengan tumbukan-tumbukan tektonik di wilayah ini—kompleksitas geografis ini tentunya mengarah pada diversifikasi spesies.

Sejumlah peristiwa tektonik tersebut tidak hanya membentuk habitat perairan dangkal yang luas dalam periode yang berbeda-beda, namun juga mempertahankannya. Biota-biota lain pembentuk habitat seperti padang lamun dan hutan bakau juga sangat tinggi biodiversitasnya di kawasan ini. Bersama terumbu karang dan padang lamun, hutan bakau berperan penting mendukung keberlangsungan hidup banyak spesies dan membentuk ekosistem yang kompleks.

Triad ekosistem. Begitu julukan untuk tiga ekosistem kunci: padang lamun, terumbu karang, dan hutan bakau (lihat Gambar 2.9). Kekayaan biodiversitas kawasan segitiga karang bertumpu pada tiga ekosistem

ini, yang tidak hanya menjadi rumah bagi ikan-ikan dan spesies-spesies terancam punah, namun juga sebagai pelindung pantai dan tempat penting penyimpanan karbon.

Dari ketiga ekosistem ini, yang kajiannya paling sedikit adalah padang lamun. Padahal di kawasan segitiga karang, lamun tumbuh paling banyak dan luas, melewati batas-batas geografis dan mampu hidup bersama spesies-spesies lain. Luas padang lamun Indonesia paling unggul di antara negara-negara Asia Tenggara, yaitu lebih dari 150 ribu hektar, rumah bagi seperempat jenis lamun dunia atau setara 60 spesies. Lamun merupakan satu-satunya tumbuhan berbunga yang mampu hidup terbenam di laut, tetapi juga dapat tumbuh pada berbagai macam jenis substrat di perairan laut dangkal.

Bakau juga tak kalah unik. Bakau menggabungkan ciri tumbuhan darat dan laut, toleran terhadap garam, serta dapat beradaptasi dengan kondisi miskin oksigen. Dengan sistem akar napas, bakau bahkan dapat melakukan metabolisme secara anaerob. Bakau tersebar di seluruh lautan tropis dan subtropis,

serta tumbuh hanya pada pantai yang terlindung dari gelombang. Bila pantai acap tergerus ombak, benih bakau tidak mampu tumbuh sempurna dan menancapkan akarnya.

Hutan bakau di Indonesia tumbuh dan tersebar hampir di sepanjang kawasan pesisir, terkonsentrasi pada kawasan pesisir pulau-pulau besar, yaitu Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, Halmahera, Jawa, dan Papua. Pada pulau-pulau besar terdapat aliran sungai yang besar dan pada umumnya terbentuk delta pada muara sungai yang berkontribusi pada pertumbuhan dan perkembangan hutan bakau. Hal tersebut tidak terjadi pada pulau-pulau kecil atau gugusan pulau, seperti Kepulauan Tanimbar, Kepulauan Aru, Kepulauan Kei, Kepulauan Natuna, atau Kepulauan Riau. Hutan bakau di pulau kecil hanya berupa gerumbulan tipis dengan struktur sederhana, bahkan seringkali berupa tegakan tunggal saja (Pramudji 2004).

Indonesia mempunyai tutupan hutan bakau terluas, yaitu 26-29% dari tutupan bakau global, yang banyak tersebar di Kalimantan dan Sumatra.

Tercatat 202 jenis tumbuhan bakau di Indonesia, meliputi 89 jenis pohon, 5 jenis palma, 19 jenis pemanjat, 44 jenis herba tanah, 44 jenis epifit, dan 1 jenis paku. Dari jenis-jenis bakau tersebut, sebanyak 43 spesies merupakan bakau sejati, selebihnya bakau ikutan.

Ekosistem bakau memiliki manfaat sangat besar pada siklus daerah pesisir secara keseluruhan, antara lain sebagai tempat asuh, mencari makan, dan berkembang biak bagi beberapa spesies satwa. Bakau juga ampuh sebagai penghalang erosi pantai dan gempuran ombak, menyuburkan tanah, penghasil kayu dan nonkayu, serta untuk pendidikan dan rekreasi.

### **Biodiversitas di Perairan Tawar**

Dengan 17 ribu pulau, Indonesia memiliki beragam ekosistem perairan tawar, antara lain danau, sungai, dan rawa. Meskipun belum ada data pasti, namun jumlah danau, sungai, maupun rawa di Indonesia diperkirakan mencapai ratusan, bahkan ribuan untuk sungai dan rawa. Luas perairan tawar Indonesia diperkirakan mencapai 13,85 juta hektare.

Untuk ikan air tawar, Indonesia memiliki kepadatan ikan tawar tertinggi di dunia, yaitu 0,6 spesies per 1.000 km<sup>2</sup>, melampaui Brasil (0,37 spesies/1.000 km<sup>2</sup>) dan Republik Demokratik Kongo (0,48 spesies/1.000 km<sup>2</sup>) (Hubert *et al.* 2015). Sebagaimana populasi manusianya, Jawa juga merupakan hunian yang padat bagi spesies ikan tawar, yaitu 1,7 spesies/1.000 km<sup>2</sup>, melebihi Kalimantan yang hanya 1,2 spesies/1.000 km<sup>2</sup>. Di wilayah Paparan Sunda ini terdapat 899 spesies ikan air tawar, yang hampir setengahnya (430) bersifat endemik. Untuk endemisitas, Sulawesi masih merajai dengan 50% (56 spesies) ikan tawar endemik (Dahrudin *et al.* 2016).

Sulawesi, lagi-lagi, tidak hanya ganjil di laut dan darat, namun juga di perairan air tawarnya. Danau-danau purba maupun danau-danau barunya seolah berlomba memamerkan keunikan endemisitasnya. Demikian juga sungai-sungai, baik sungai penghubung danau purba maupun sungai-sungai di pulau-pulau sekitar Pulau Sulawesi.

Spesies ikan di Sistem Danau Malili hanya memiliki sedikit kemiripan dengan ikan-ikan di Danau Poso, yang berjarak 80 km. Sistem Danau Malili lebih banyak memiliki spesies endemik karena kelima dananya saling terhubung walau masing-masing memiliki keunikan, dengan pengalaman radiasi yang berbeda pada tiap danau. Malili memiliki 33 spesies endemik (dari 36 spesies) sedangkan Danau Poso memiliki 9 spesies endemik dari 10 spesies. Terisolasinya perairan Danau Malili dari perairan tawar lainnya juga mendorong tingginya endemisitas ikan di sana.

Kalimantan adalah kisah yang berbeda. Tidak memiliki danau purba, tapi Kalimantan memiliki beberapa danau laut, suatu tubuh air di daratan yang tetap mempertahankan karakter lautnya melalui jalur sempit bawah laut. Umur danau laut-danau laut ini masih muda, yakni 7.000-12.000 tahun, dan jumlahnya hanya sekitar 200 danau di dunia, tersebar terutama di Vietnam, Palau, dan Indonesia.

Danau Kakaban dan Danau Maratua di Kalimantan Timur adalah contoh yang terkenal dengan keunikan

spesiesnya. Kakaban merupakan danau laut terbesar dengan luas 5 km<sup>2</sup>, dengan dinding karang setinggi 50 meter yang memerangkap air laut sehingga menjadi danau, dan menjadikannya sebagai danau paling terisolasi di Indonesia. Keragaman genetisnya sangat tinggi dan tidak ditemukan di tempat mana pun di dunia. Bahkan keunikan spesies di Kakaban tidak ditemukan di danau-danau sekitarnya yang hanya berjarak 6 km, membuktikan bahwa Danau Kakaban terisolasi tidak hanya secara fisik, namun juga biologis (Becking *et al.* 2013).

Danau-danau laut Indonesia memiliki flora dan fauna dengan keragaman tinggi, dengan tingkat endemisitas yang juga tinggi. Danau-danau ini memberikan konteks spatio-temporal yang sangat jelas untuk penelitian ekologi dan evolusi laut.





# EKONOMI BIODIVERSITAS INDONESIA



*Tidak ada rencana cadangan karena  
kita tidak punya Planet Cadangan – Ban Ki-Moon*

Biodiversitas Indonesia memiliki potensi besar bagi pembangunan ekonomi. Aneka spesies memiliki nilai ekonomi yang tinggi seperti untuk bahan pangan, bahan obat dan kosmetik, bioenergi hingga ekowisata.

Besarnya hubungan antara biodiversitas dan perekonomian dapat dilihat dari contoh berikut. Perkebunan kopi skala kecil di sekitar Taman Nasional Lore Lindu, Sulawesi Tengah, memberikan gambaran tentang nilai ekonomis jasa polinasi atau penyerbukan. Hubungan antara lebah dan pertanian kopi yang terjalin melalui polinasi dimungkinkan oleh

## Pada Sumber Hayati, Ekonomi Bertumpu

Sesungguhnya potensi ekonomi berbasis hayati sangat bertumpu pada keseimbangan ekosistem.

Kualitas dan kuantitas suatu hasil bumi, kopi misalnya, sangat ditentukan oleh kondisi lingkungan sekitarnya. Diperlukan keseimbangan sistem alam untuk menghasilkan kopi dalam jumlah dan

ekosistem hutan di area ini. Yang menjadi fokus pengamatan adalah relasi antara jarak hutan serta keanekaragaman lebah polinator dan hasil buah kopi arabika. Diperkirakan bahwa hutan memberikan jasa polinasi 46 euro per hektare, dan setiap tahun nilainya mencapai 470 euro per hektare. Konversi hutan yang terus berlangsung meningkatkan risiko hilangnya jasa polinasi ini dan memberi dampak kerugian finansial yang nyata bagi petani kecil. Jasa polinasi memang terus turun, yang mengakibatkan turunya hasil kopi sampai sebesar 18% dan pendapatan bersih petani kopi juga merosot sampai 14% per hektare.

kualitas yang dapat menguntungkan secara ekonomi.

Penyerbukan atau polinasi sangat penting bagi sejumlah besar tanaman dan terbukti meningkatkan hasil dan mutu produksi tanaman pangan (lihat Klein *et al.* 2007). Polinasi dilakukan melalui

## Perubahan Iklim dan Jasa Ekosistem dalam Secangkir Kopi



Di masa silam, Indonesia memang penghasil kopi yang penting di dunia. Bermula dari abad ke-17, tepatnya pada 1696, benih kopi arabika pertama yang dibawa Belanda mulai ditanam di Jawa. Majalah *Tempo* (Mei 2018) pernah mengangkat bahwa 15 tahun setelah penanaman itu, Bupati Cianjur Aria Wira Tanu mengirimkan sekitar empat kuintal kopi ke Amsterdam. Kopi itu segera menjadi primadona. Sejak itu kopi asal Jawa populer dengan sebutan *Java coffee*. Bibit kopi unggulan ini pun melanglang buana ke Prancis, Karibia, Suriname, bahkan ke tanah jajahan negara-negara Eropa di Amerika Tengah. Sayangnya kedigdayaan kopi Jawa tak bisa bertahan.

Pamor kopi surut setelah pada 1880 muncul serangan penyakit karat daun akibat cendawan mematikan *Hemileia vastatrix*. Jawa jadi kehilangan potensi ekspor hingga ratusan ribu ton kopi. Pasar dunia sempat goyah.

Kini kopi dari berbagai daerah di Indonesia telah mendapatkan kembali penggemar, bahkan hingga ke mancanegara. Kopi gayo, kopi toraja, kopi malabar, dan sangat boleh jadi akan bertambah daftarnya. Tapi sejarah pahit kopi di masa lalu itu bisa saja terulang.

Rentannya perkebunan kopi terhadap kuasa alam adalah kenyataan yang tak bisa dienyahkan. Artikel di majalah *Time* (Juni 2018), bertajuk "*Your Morning Cup of Coffee is in Danger. Can the Industry Adapt in Time?*", mengingatkan bagaimana perubahan iklim memengaruhi berbagai sendi kelangsungan perkebunan kopi. Kenaikan suhu rata-rata bumi meningkatkan kemunculan berbagai penyakit pada tanaman kopi dan mengancam keberadaan serangga penyerbuk. Belum lagi konversi hutan kian menambah ancaman tersebut. Jasa ekosistem lewat polinasi berisiko hilang dan mengintai penghidupan para petani kopi, terutama petani kecil.

perantara binatang seperti burung, kelelawar, atau serangga, tetapi lebah adalah polinator dominan. Tingkat dan kualitas polinasi tanaman pertanian, yang pada gilirannya menentukan hasil serta mutu produksi pertanian, dimungkinkan oleh seberapa beragamnya polinator—keanekaragaman yang merupakan jasa pengaturan ekosistem hutan (Richards 2001). Semakin jauh jarak antara hutan atau habitat alam dan lahan pertanian, semakin berkurang jumlah dan keragaman spesies lebah polinator yang singgah di bunga tanaman (Steffan-Dewenter dan Tschamntke 1999; Ricketts *et al.* 2008).

Nilai ekonomi ekosistem dan keanekaragaman hayati melalui manfaat penyerbukan (jasa ekosistem) yang muncul dari ekosistem hutan (struktur, proses, dan fungsi ekosistem), bergantung pada keberadaan beragam lebah (keanekaragaman spesies), yang berdampak terhadap ekonomi petani kopi. Polinasi adalah satu contoh saja dari jasa ekosistem yang merupakan hasil interaksinya dengan biodiversitas dalam ekosistem.





Menakar nilai biodiversitas dan ekosistem memang tak sesederhana

menghitung nilai ekonomi sebuah lahan perkebunan atau pertanian. Untuk memahaminya, mula-mula diperlukan pemahaman mengenai konsep ekosistem beserta aspek-aspek di dalamnya.

Ekosistem adalah suatu komunitas organisme hidup bersama dengan komponen tak hidup di lingkungannya—udara, air, mineral tanah—yang berinteraksi, berhubungan timbal-balik, sebagai satu sistem. Semua organisme dalam satu ekosistem itulah, secara keseluruhan, yang disebut sebagai suatu keanekaragaman hayati, dengan makna luas meliputi jumlah, kelimpahan, komposisi genotif, populasi, kelompok fungsional, dan kekayaan pola “keruangan” sebagaimana ditunjukkan oleh mozaik habitat dan lanskap (Diaz *et al.* 2006).

Seluruh aspek dalam ekosistem memegang peran penting dan berinteraksi sehingga menampilkan beragam fungsi, baik yang bersifat fisik seperti infiltrasi air; kimiawi seperti proses oksidasi; maupun biologis seperti fotosintesis. Berbagai fungsi ini menghasilkan jasa ekosistem—lihat kasus kopi di atas—yakni sumbangan ekosistem secara

**Jenis Jasa Ekosistem dan Contoh Jasa Ekosistem**

<p><b>Jasa provisi</b></p> 	<p>Pangan; ketersediaan air; bahan baku, bahan bakar dan energi; pupuk, materi genetik; obat-obatan dan farmasi; model dan organisme untuk uji coba (<i>test organism</i>); bahan mode, dekoratif, kerajinan tangan.</p>
<p><b>Jasa regulasi</b></p> 	<p>Pengaturan gas dan udara; iklim (termasuk sequestrasi karbon); perlindungan badai dan banjir; pencegahan kekeringan dan penyediaan irigasi alami; air bersih; pencegahan erosi; pemeliharaan tanah produktif; polinasi; pengendalian biologis; pengendalian penyakit dan wabah.</p>
<p><b>Jasa habitat/pendukung habitat</b></p> 	<p>Persemaian; pemeliharaan keanekaragaman hayati.</p>
<p><b>Jasa kultural</b></p> 	<p>Pemandangan alam; rekreasi dan pariwisata; inspirasi seni; warisan budaya; penggunaan untuk tujuan religius dan spiritual; sains dan pendidikan.</p>

Gambar 3.1 Tipologi jasa ekosistem dan contoh berbagai jasa terkait provisi, regulasi, pendukung, dan kultural (disarikan dari Constanza *et al.* 1997 dan De Groot *et al.* 2012).

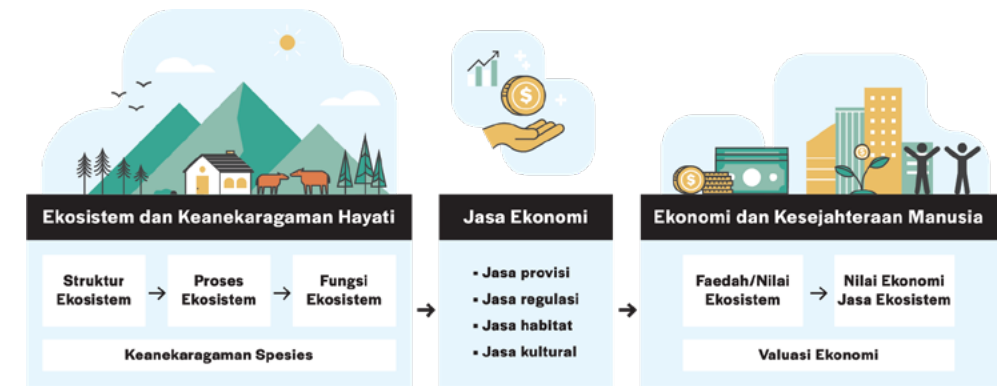
langsung maupun tidak langsung bagi kesejahteraan manusia (TEEB 2010). Sebagian peneliti memaknai jasa ekosistem sebagai “kontribusi alam bagi manusia” (Pascual *et al.* 2017). Biodiversitas, dalam kaitan ini, berperan memengaruhi kapasitas untuk menghasilkan jasa ekosistem. Jasa-jasa ekosistem dapat dikelompokkan dalam tipologi berikut, yaitu jasa penyediaan, jasa pengaturan, jasa pendukung, dan jasa kultural (lihat Gambar 3.1).

Kondisi suatu ekosistem sangat bergantung pada keanekaragaman hayati. Karakter setiap spesies beserta distribusi dan kelimpahannya akan memengaruhi ekosistem. Semakin beragam spesies yang menghuni suatu ekosistem, semakin produktif pula ekosistem itu karena spesies di dalamnya saling melengkapi. Sebagai contoh, produksi tanaman bergantung pada keragaman spesies yang hidup di dalam tanah. Peningkatan produksi tanaman dipengaruhi oleh bertambahnya lepasan zat hara hasil dekomposisi oleh mikroorganisme (Van der Heijden *et al.* 2006). Sebaliknya, keanekaragaman tanaman dapat meningkatkan kesuburan tanah dan kekayaan jenis mikrob (Balvanera *et al.* 2006).

Keanekaragaman tanaman juga akan menekan jumlah, daya hidup, kesuburan, serta keragaman spesies invasif. Pada gilirannya, hal ini akan menurunkan risiko kerusakan tanaman akibat wabah.

Ekosistem laut pun menunjukkan kecenderungan serupa. Semakin beragam spesies di dalamnya, semakin produktif ekosistem itu. Keanekaragaman hayati berperan signifikan di balik berfungsinya ekosistem laut dalam. Peran ini di antaranya berupa kemampuan menggunakan produksi utama dari zona fotik, yaitu zona perairan laut yang dapat ditembus cahaya matahari; memanfaatkan serta mendaur ulang senyawa organik yang tersimpan di dasar laut; serta mengarahkan limbah laut ke organisme di tingkat trofik yang lebih tinggi dalam rantai makanan (Danovaro *et al.* 2008).

Pemahaman terhadap aspek-aspek yang berkaitan dengan ekosistem dan keragaman hayati, serta jasa ekosistem yang dihasilkannya, memungkinkan penautannya dengan aspek ekonomi dan dampaknya bagi kesejahteraan manusia. Hal ini bisa dilihat dalam Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Keanekaragaman hayati dalam integrasi ekosistem dan ekonomi (sumber: Adaptasi dari Heines-Young dan Potschin (2010) dan TEEB (2011) dengan modifikasi dan tambahan).

Pendekatan pemikiran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 tersebut menekankan bahwa keanekaragaman hayati itu sendiri bukanlah jasa ekosistem, melainkan bergantung pada struktur dan proses ekosistem yang dihasilkan makhluk hidup dan interaksinya dengan materi abiotik atau benda-benda tak hidup (Heines-Young dan Potschin 2010). Perlu digarisbawahi bahwa upaya membangun tautan antara ekosistem dan ekonomi serta keanekaragaman hayati di dalam penautan itu mengandung sejumlah keterbatasan.

Pertama, keanekaragaman hayati merupakan konsep multidimensi sehingga wujud penggambaran

dan pengukurannya dapat saja mengambil berbagai bentuk. Kedua, pengukuran kuantitatif atas keanekaragaman hayati dirancang untuk tujuan yang berbeda dan spesifik, misalnya pembeda skala keanekaragaman hayati (global atau lokal); tujuan berbeda membuahkan ukuran dan hasil yang juga berlainan. Ketiga, meskipun jasa ekosistem kerap meningkat seiring dengan meningkatnya keanekaragaman hayati, kekuatan dan bentuk relasi antara jasa ekosistem dan keanekaragaman hayati, serta ukuran penjelas paling baik (*best predictor*) dari jumlah dan mutu jasa ekosistem, dapat saja bervariasi, bergantung pada jasa ekosistem yang sedang dikaji.



**1**  
Biodiversitas ikan di Selat Sikakap, Mentawai, Sumatera Barat

**NILAI EKONOMI:**  
**USD 4,7 juta**

mencakup 14 jenis ikan pelagis dan demersal, seperti baracuda (*Sphyrna jello*), teri (*Stolephorus commersoni*), kakap merah (*Lutjanus campechanus*).

**METODE VALUASI EKONOMI:**  
Pendekatan transfer manfaat dan metode valuasi kontingenasi menggunakan data sekunder (Rizal dan Dewanti 2017).



**2**  
Biodiversitas di Kawasan Karst, Maros, Sulawesi Selatan

**NILAI EKONOMI:**  
**Rp 639 miliar**

berdasarkan pengeluaran untuk wisata (Rp 133,9 miliar) dan nilai guna tidak langsung dari hutan yang ada, pasokan air, pengendalian banjir, mempertahankan keberadaan karst (Rp 639,5 miliar).

**METODE VALUASI EKONOMI:**  
Metode "kesediaan membayar" menggunakan survei rumah tangga, pelaku usaha, dan pengunjung (Wuluyo et al., 2002).



**3**  
Nilai kekeringan air di Ruteng, Manggarai, Nusa Tenggara Timur

**NILAI EKONOMI UNTUK PENCEGAHAN:**  
**Rp 230 juta/tahun**

mencakup 9 kecamatan di zona penyangga, sebagian besar rumah tangga & petani yang bergantung pada sumber daya air di kawasan hiran di Daerah Aliran Sungai Ruteng.

**METODE VALUASI EKONOMI:**  
Metode "kesediaan membayar" dengan valuasi kontingenasi (Pattanayak dan Kumar 2001).



**4**  
Nilai anoa bersama biodiversitas dan jasa ekosistem di Taman Nasional Lore Lindu, Sulawesi Tengah

Nilai peningkatan jumlah anoa, akan tetapi pengurangan jarak lokasi rotan, penurunan lama waktu masa kekuran air, dan penurunan tingkat *cocoa shading*:

**Rp 1,6 miliar/tahun.**

**METODE VALUASI EKONOMI:**  
Metode *stated preferences* menggunakan *choice modelling* (Barkmann 2007).



**5**  
Wisata hiu paus di Teluk Cendrawasih, Papua

**NILAI EKONOMI:**  
**Rp 35,5 triliun**

mencakup wilayah daratan di atas pulau dan area perairan laut. Nilai ekonomi mencakup jasa ekowisata, nilai taman nasional, perikanan tangkap skala kecil, rantai sumber daya laut, dan pengelolaan jasa tur.

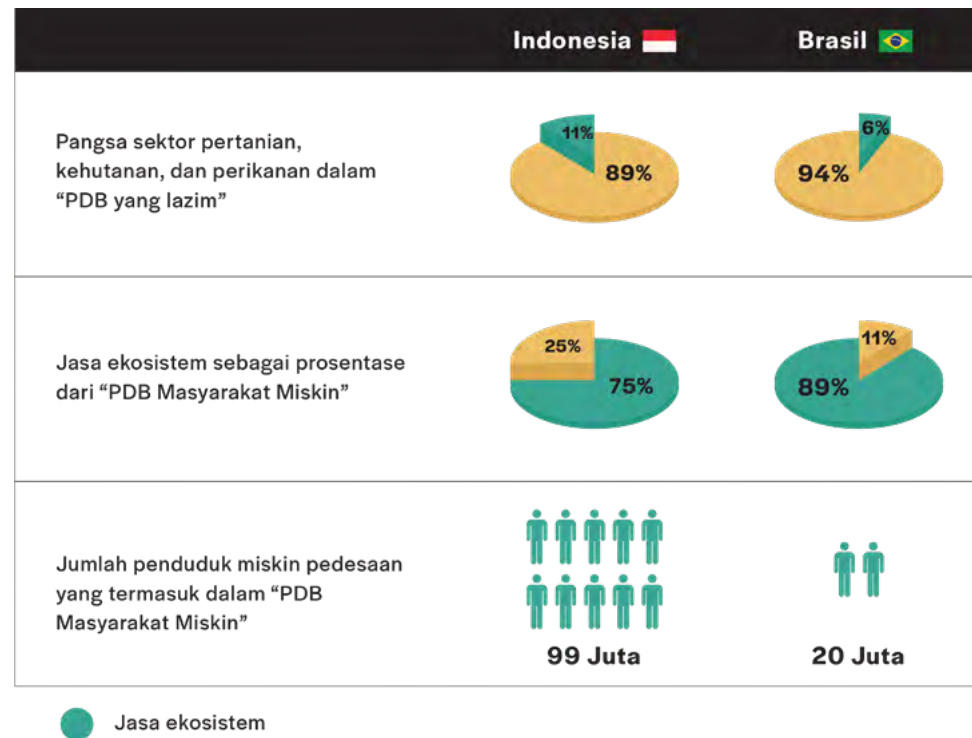
**METODE VALUASI EKONOMI:**  
Gabungan metode biaya perjalanan, metode valuasi kontingenasi, pendekatan produktivitas/nilai pasar, dan analisis harga pasar (Anna dan Saputra 2017).



Gambar 3.3 Contoh nilai ekonomi di beberapa wilayah di Indonesia.

Secara umum, ekonomi biodiversitas mungkin belum terlalu dirasakan manfaatnya oleh masyarakat Indonesia, padahal nilai ekonominya sangat tinggi (lihat Gambar 3.3). Sektor pertanian, kehutanan, dan perikanan baru menyumbang 11% produk domestik bruto (PDB) Indonesia. Namun, jika ditilik lebih mendalam, ketiga sektor perekonomian itu merupakan tumpuan mayoritas masyarakat miskin di Indonesia, yang jumlahnya

mencapai 99 juta jiwa (Gambar 3.4). Kajian-kajian yang dilakukan di Kalimantan dan Sumatra tentang hubungan antara ekonomi masyarakat dan ekosistem dalam bentuk pendapatan tunai dan nontunai juga menunjukkan tingkat ketergantungan yang cukup tinggi dari perekonomian rumah tangga pada jasa yang disediakan ekosistem (Angelsen *et al.* 2014; Fitriani dan Mumbunan 2018).



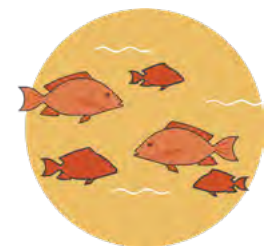
Gambar 3.4 Ketergantungan perekonomian pada jasa ekosistem di Indonesia dan Brasil: Sumbangan sektoral bagi ekonomi, pangsa ekonomi masyarakat miskin, dan jumlah penduduk miskin yang bergantung pada jasa ekosistem (Gambar dimodifikasi dari TEEB 2010).












Dalam Tabel 3.1 berikut diperlihatkan distribusi dari berbagai jasa ekosistem di Taman Nasional Gunung Leuser menurut skenario-skenario terpilih berupa deforestasi, konservasi, dan penggunaan sumber daya hutan secara terbatas dan terpilih. Nilainya dinyatakan dalam juta dolar Amerika (periode 2000-2030). Menurut skenario-skenario itu dapat dilihat bahwa skenario konservasi di Taman Nasional Gunung Leuser membuahkan nilai ekonomi paling tinggi dalam wujud jasa-jasa ekosistem ketimbang nilai ekonomi dari penggunaan terpilih sumber daya hutan dan, apalagi, deforestasi.

Dari segi jasa ekosistem, nilai ekonomi tertinggi dalam skenario konservasi berasal dari pasokan air—nilainya sekitar seperempat dari seluruh jasa ekosistem yang dikaji. Kemudian diikuti oleh pertanian, pencegahan banjir, serta listrik tenaga air dan pariwisata. Dapat dipahami bahwa dalam skenario konservasi, nilai ekonomi dari pertanian bakal lebih kecil dibandingkan dengan nilai ekonomi dari skenario deforestasi (36% dari seluruh nilai ekonomi). Nilai ekonomi dari produk kehutanan

nonkayu (*non-timber forest products/NTFP*) dalam skenario konservasi juga lebih kecil dibanding yang dimanifestasikan dari skenario penggunaan sumber daya hutan secara terbatas dan terpilih. Bagaimanapun, skenario konservasi tetap unggul secara ekonomi.

Tampak dari angka-angka itu betapa pentingnya biodiversitas dalam mendukung perekonomian, tetapi, pada saat yang sama, perubahan yang dialaminya pun nyata. Perubahan kondisi biodiversitas ini sebagian besar disebabkan oleh aktivitas manusia, dan terkait erat dengan proses ekosistem serta cara manusia memanfaatkan sumber daya alam.



	Deforestasi		Konservasi		Penggunaan terpilih	
	Nilai	Proporsi (%)	Nilai	Proporsi (%)	Nilai	Proporsi (%)
 Pasokan air	699	10	2419	25	2005	25
 Perikanan	557	8	659	7	674	7
 Pencegahan banjir	1223	18	1591	17	1396	17
 Pertanian	2499	36	1642	17	1016	17
 Pembangkit listrik tenaga air	252	4	898	9	696	9
 Pariwisata	171	2	828	9	407	9
 Biodiversitas	56	1	200	2	125	2
 Penyerapan karbon	53	1	200	2	125	2
 Pencegahan kebakaran	30	0	715	7	643	7
 NTFP	235	3	94	1	1222	1
 Kayu	1184	17	0	0	825	0
<b>Total</b>	<b>6958</b>	<b>100</b>	<b>9538</b>	<b>100</b>	<b>9100</b>	<b>100</b>

Tabel 3.1 Perbandingan nilai pengaruh deforestasi, konservasi, dan penggunaan terpilih (dalam juta dolar AS) pada ekosistem Taman Nasional Gunung Leuser periode 2000-2030 menggunakan berbagai teknik valuasi ekonomi. (Van Beukering et al. 2003).

## Ekonomi Sirkuler

Diperlukan upaya mencari cara yang lebih bijak dalam memanfaatkan sumber daya alam, termasuk keanekaragaman hayatinya, secara berkelanjutan. Pembangunan, bagaimanapun, harus sesuai dengan daya dukung bumi. Situasi yang ada merupakan panggilan yang sudah mendesak untuk mengubah pendekatan ekonomi linear, yang bertumpu pada eksploitasi alam demi kepentingan jangka pendek yang kerap merugikan ekosistem, menjadi ekonomi sirkuler, yang lebih menyeimbangkan kepentingan ekonomi dengan ekologi.

Ekonomi sirkuler adalah suatu sistem ekonomi di mana produk dan jasa diperdagangkan melalui siklus yang tertutup, ditandai dengan desain yang bersifat regeneratif, dengan tujuan utama mempertahankan sebanyak mungkin nilai suatu produk, bagiannya ataupun materialnya. Ini berarti tujuannya adalah menciptakan suatu sistem yang memungkinkan produk atau material yang bertahan lama dan optimal dalam pemakaian ulang,

pengisian/penambahan, reproduksi, ataupun ketika didaur ulang.

Salah satu bentuk ekonomi sirkuler adalah pengembangan konsep "green building" atau konsep bangunan ramah lingkungan, yang juga dikenal sebagai Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). Bangunan berkelanjutan atau bangunan hijau ini merupakan hasil dari falsafah desain yang berfokus pada peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya, termasuk energi, air, dan material, sembari mengurangi dampak pembangunan terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Dalam konsep ini semua bahan bangunan menggunakan materi yang bukan sekali pakai atau dapat digunakan kembali, diperbarui, dan dapat didaur ulang (Buys & Hurbissoon 2011).

Filosofi dan pendekatan sirkuler seperti ini memungkinkan terwujudnya keseimbangan antara kepentingan ekonomi dan ekologi.

## Potensi Biodiversitas untuk Pembangunan Ekonomi

Keterkaitan antara keanekaragaman hayati dan kebutuhan pokok manusia sulit disangkal. Hal tersebut berlaku di mana pun, terlebih di Indonesia. Sebagai negara tropis, yang di tanahnya tumbuh berbagai jenis tanaman, Indonesia dapat mempelajari lebih mendalam peran dan kegunaan tanaman-tanaman itu bagi kehidupan manusia dalam beraneka macam bidang. Sumber daya alam yang boleh dikatakan tak terbatas ini merupakan peluang besar bagi masyarakat untuk membuka usaha, hampir apa pun jenisnya. Contohnya adalah industri pariwisata (ekowisata), industri pangan, industri obat, dan energi.

### Ekowisata

Komodo dan orang utan, siapa tak kenal. Sebagai ikon pariwisata alam Indonesia, ketenaran dua satwa ini tak diragukan lagi. Namun, Indonesia memiliki banyak duta wisata lain yang dapat mendongkrak minat wisatawan untuk berkunjung menikmati keindahan alam Indonesia. Ada banyak hewan eksotis

di Indonesia, seperti anoa, burung maleo, dan burung cenderawasih. Inilah kandidat kuat duta wisata-duta wisata Indonesia, bersama flora-flora endemik lainnya.

Ekowisata menggabungkan pariwisata dengan komitmen terhadap alam dan tanggung jawab sosial. Sebagai wujud dari pembangunan berkelanjutan, ekowisata memberi perhatian yang proporsional kepada aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi. Belakangan pelancongan ini terhitung populer di seluruh dunia. Pariwisata alam dapat berupa perjalanan menyaksikan kehidupan liar, petualangan, atau sekadar menikmati alam. Berbeda dari pariwisata alam, kehidupan liar, dan petualangan, yang menitikberatkan kegiatan rekreasinya, ekowisata lebih bertumpu pada keuntungan konservasi dan masyarakat di wilayah yang dikunjungi (Brandon 1996).

Angka tentu lebih bisa bicara. Wisatawan di berbagai taman

nasional di Amerika Serikat mencapai lebih dari 2,5 miliar orang dan di Cina lebih dari 1 miliar orang. Bila dijumlahkan, wisatawan yang mengunjungi kawasan konservasi di seluruh dunia mencapai lebih dari 8 miliar orang. Nilai bisnis dari kegiatan ekowisata ini mencapai 600 miliar dolar AS per tahun. Pariwisata kategori ini memang telah menjadi industri raksasa, dan 10% ekonomi dunia merupakan hasil dari industri ini (Supriatna 2014).

Ekowisata dapat berkontribusi besar bagi konservasi keanekaragaman hayati. Mula-mula, berkat penghasilan langsung dari wisatawan berupa pembayaran uang masuk kawasan, pajak, dan lainnya, kegiatan ini dapat menjadi sumber dana konservasi. Bagi masyarakat di sekitar kawasan konservasi, ia juga bisa menjadi penghasilan alternatif. Penggiat lingkungan dan pemerintah pun memiliki alasan tepat untuk upayanya, yakni melestarikan keanekaragaman hayati dan pengembangan kawasan secara lestari. Selain itu, pebisnis yang terlibat dalam konservasi dapat melakukan kegiatan berbasis ekonomi di kawasan konservasi (Honey 1999).

Pada skala global, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia, ekowisata dapat dijadikan solusi mengatasi masalah dalam upaya konservasi. Penggunaan pariwisata sebagai alat mencapai tujuan manajemen konservasi semakin diterima di berbagai negara. Hal ini terlihat dari kian meningkatnya minat mengunjungi kawasan wisata alam (Hulme dan Murphee 2001). Di Rwanda, misalnya, menyaksikan gorila merupakan salah satu kegiatan ekowisata, yang menjadi sumber devisa. Tarif per hari untuk melihat gorila gunung bervariasi, antara 120-150 dolar AS per wisatawan. Bila pengeluaran-pengeluaran untuk hotel, transportasi, pemandu, makan, dan cendera mata dijumlahkan, setiap wisatawan dapat menghabiskan ribuan dolar (Vedder & Weber 1990).

Di Indonesia yang memiliki 54 taman nasional, wisata kehidupan satwa liar masih sangat terbatas, misalnya hanya di Taman Nasional Tanjung Puting, Taman Nasional Komodo, dan Taman Nasional Bali Barat. Itu pun belum jelas berapa tarif per hari untuk melihat orang utan Kalimantan, komodo, dan jalak Bali.

Panduan mengenai berbagai ongkos masuk ke kawasan konservasi dan turunannya baru diterbitkan pada 2014 melalui Peraturan Pemerintah No. 12 Tahun 2014 tentang Jenis dan Tarif Penerimaan Negara Bukan Pajak yang Berlaku pada Kementerian Kehutanan. Peraturan ini dilengkapi pula dengan Peraturan Pemerintah No. 46 Tahun 2017 tentang Instrumen Ekonomi dari Lingkungan Hidup, yang dapat dijadikan rujukan bagi pengembangan harga ekowisata.

Sebagai negara dengan 50 ekosistem, termasuk hutan dan pantai tempat penyu bertelur, serta jalur migrasi satwa liar, Indonesia merupakan wilayah yang sangat cocok untuk ekowisata satwa liar. Daya tarik utama pariwisata ini adalah kemampuannya menjadi pengganti keuntungan yang hilang dari kegiatan perburuan dan, pada saat yang sama, kontribusinya bagi upaya konservasi satwa liar. Manfaat lainnya adalah munculnya pembangunan di kawasan wisata, pendidikan dan kesadaran terhadap lingkungan, pemeliharaan terhadap identitas budaya, dan kesempatan potensial untuk meningkatkan taraf hidup penduduk setempat, serta melindungi satwa liar dan habitat alamnya.

Di beberapa daerah yang menjadi tempat pendaratan penyu, di antaranya Taman Nasional Meru Betiri, Kepulauan Derawan, Tanjung Benoa, dan Sukabumi selatan, telah dikembangkan pariwisata berbasis satwa liar. Sayangnya belum ada satu daerah pun yang berhasil secara memuaskan memadukan kegiatan tersebut dengan ekologi. Padahal, bila dikelola dengan baik, pelancongan berbasis satwa liar dapat menjadi sumber pemasukan bagi daerah dan negara. Di Kosta Rika, umpamanya, hampir 10% dari pemasukan negara berasal dari penghasilan wisata alam liar (Fennel 2007).

Proyek Tamar-Ibama di Brasil adalah contoh lain dari konservasi satwa liar laut yang sukses. Di sini pariwisata alam berbasis satwa liar digunakan sebagai pengganti perburuan satwa liar laut. Proyek ini berhasil berkat partisipasi masyarakat lokal dalam kegiatan edukasi, pelatihan pemandu wisata, dan festival. Selain itu, para pemburu telur satwa liar pun lantas dipekerjakan menjadi anggota tim patroli dan petugas yang melindungi sarang satwa liar. Cara-cara yang ditempuh ini bukan saja menjadikan pariwisata alam berbasis satwa liar

## Great Barrier Reef: Nilai Suatu Harta Karang



Australia sungguh beruntung dianugerahi gugusan terumbu karang Great Barrier Reef. Selain bernilai ekologi penting, nilai ekonominya pun sangat besar. Lembaga Konsultan Keuangan, Deloitte Access Economics, pada tahun 2017 menghitung nilai ekonomi Great Barrier Reef sebesar 56 miliar dolar Australia atau sekitar 564 triliun rupiah dan berperan sangat besar dalam mendukung kegiatan ekonomi negara tetangga itu. Perhitungan tersebut didasarkan pada “nilai ekonomi, sosial, dan ikon” dari gugus terumbu karang yang masyhur tersebut. Menurut Deloitte, Great Barrier Reef menyumbang pula 6,4 miliar dolar Australia atau 64 triliun rupiah untuk perekonomian Australia dan menyediakan 64.000 lapangan kerja. Penilaian tersebut didasarkan pada penelitian dan penggunaan berbagai sumber ekonomi selama enam bulan yang dilengkapi dengan survei terhadap 1.500 orang dari 11 negara.

Laporan Deloitte menggunakan pemodelan ekonomi dan mengeluarkan estimasi bahwa gugus batu karang itu bernilai 29 miliar dolar Australia untuk pariwisata dan 3,2 miliar dolar Australia untuk tujuan rekreasi seperti rekreasi

penyelaman. Terdapat pula nilai “tidak langsung” sebesar 23,8 miliar dolar Australia atau disebut “nilai merek”. “Nilai merek” ini memiliki makna bahwa meskipun banyak warga Australia tidak sempat mengunjungi gugusan karang ini, namun mereka meyakini nilai tinggi kawasan ini. Laporan Deloitte juga menyatakan bahwa nilai total Great Barrier Reef 12 kali lebih besar dibandingkan Sydney Opera House, gedung pementasan seni kebanggaan Australia.

Namun, laporan Deloitte menyatakan pula bahwa di balik tingginya nilai ekonomi itu, diperlukan upaya konservasi yang lebih besar terhadap gugusan batu karang tersebut. Beberapa tahun terakhir, kawasan tersebut mengalami ancaman pemutihan terkait peningkatan suhu air dan akibat berkurangnya alga di kawasan itu. Sebagai salah satu ekosistem alam yang paling kaya dan kompleks di dunia, Great Barrier Reef memang tak terhingga nilainya dan tak tergantikan. Pemerintah dan masyarakat Australia pun sangat intensif memasang citra ‘tak terhingga nilainya dan tak tergantikan’ bagi Great Barrier Reef.

Indonesia sebagai jantung segitiga karang dunia juga memiliki gugusan terumbu karang yang tak kalah nilainya dari Great Barrier Reef. Sebutlah Raja Ampat, Bunaken, Wakatobi, Takabonerate, dan masih banyak lagi. Bahkan jenis ikan karang di Indonesia jauh melebihi jenis

ikan karang di Australia dan Karibia. Potensi ekowisata berupa harta karang ini perlu digarap secara serius dengan dukungan sains dan teknologi untuk pengelolaan dan pemanfaatan yang lestari.

sebagai kegiatan yang bermanfaat mendatangkan pemasukan menggantikan perburuan, tetapi juga menyediakan komunitas di bidang konservasi satwa liar laut untuk menjaga kelestariannya.

Indonesia jelas memiliki potensi industri ekowisata yang sangat besar, khususnya yang terkait dengan pemandangan alam dan kehidupan liar. Sebuah survei terhadap wisatawan mancanegara yang mengunjungi Indonesia mendapatkan hasil, di antaranya, hampir 60% menyatakan tertarik pada keindahan alam Indonesia (Supriatna 2014). Tantangannya, belum ada perhatian yang berfokus pada pengembangan wisata kehidupan liar dari pemerintah, pengembang, lembaga swadaya masyarakat, dan pakar pariwisata. Padahal, ekowisata memiliki kemampuan membangun pariwisata rakyat yang ramah lingkungan dan

berkelanjutan. Pelibatan masyarakat sangat penting karena, pada dasarnya, masyarakat setempat kerap memiliki pengetahuan tentang alam, budaya, serta daya tarik pariwisata daerahnya. Pelibatan masyarakat dapat dilakukan mulai dari tingkat perencanaan hingga ke tingkat pengelolaan, seperti misalnya yang dilakukan di Taman Nasional Gunung Halimun-Salak, Jawa Barat.

### Bioekonomi Pangan

Laju pertumbuhan penduduk yang semakin bertambah bermuara ke satu konsekuensi yang tak terelakkan: besarnya permintaan sumber pangan, sandang, dan papan. Indonesia merupakan negara yang pesat pertumbuhan penduduknya sekaligus beruntung memiliki keanekaragaman hayati yang tiada duanya. Keanekaragaman sumber pangan, yang terkandung di situ, bisa terlihat dari tingginya

keanekaragaman makanan pokok penduduk Indonesia. Terdapat sekitar 370 tanaman penghasil sayur, 400 tanaman penghasil buah, dan 55 penghasil rempah tersebar di seluruh kepulauan.

Vitalnya keanekaragaman hayati dalam ketahanan pangan dan gizi ditegaskan oleh badan PBB, Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO). Keanekaragaman itu, yang terwujud berkat berjuta hubungan antarspesies, merupakan faktor tak tergantikan dalam ekosistem, tempat produksi makanan seluruh dunia bergantung. Penurunan biodiversitas bakal merepotkan manusia; kemampuannya untuk beradaptasi dalam ekosistem dan menghadapi tantangan baru, seperti meningkatnya populasi dan perubahan iklim, dapat merosot. Keanekaragaman sumber pangan dan ketahanan pangan merupakan satu tahap yang pada dirinya terkandung tujuan mempertahankan keragaman hayati.

Sering kali pertanian dan keanekaragaman hayati dianggap sebagai ranah terpisah. Keanekaragaman hayati memang mendasari sebagian besar pertanian

modern, tapi pengembangan sistem produksi kontemporer menimbulkan konversi lahan besar-besaran yang juga berakibat hilangnya keanekaragaman hayati. Demi memenuhi persediaan pangan yang terus bertambah, perlu suatu cara inovatif dan dapat diterima, yang dapat memadukan konservasi keanekaragaman hayati dan produksi pangan.

Dalam industri, hanya komoditas tertentu yang dikembangkan dalam skala besar. Namun, di sisi lain, mempertahankan ragam varian pangan lokal juga esensial untuk membangun ketahanan dan kedaulatan pangan. Keanekaragaman dapat menjaga dan meningkatkan kesuburan tanah, juga mengurangi dampak serangan hama dan penyakit. Keanekaragaman makanan, yang didasarkan atas beranekanya sistem pertanian, menyediakan gizi dan peluang kesehatan yang lebih baik, dengan manfaat tambahan berupa membaiknya produktivitas dan kehidupan manusia. Tak kalah strategis, keanekaragaman hayati dapat berperan dalam upaya mengatasi dampak perubahan iklim—sehingga menguatkan daya tahan ekosistem. Tentu saja, berbagai

manfaat keanekaragaman hayati pertanian—dimanifestasikan pada skala ekologis dan kelompok manusia yang berbeda, juga lintas pandangan dan kelompok politik—memerlukan pendekatan lintas sektor. Ini diperlukan dalam upaya menilai kembali peran keanekaragaman hayati pertanian dalam produksi pangan yang berkelanjutan dan aman (Frison *et al.* 2011).

### Pencarian Obat

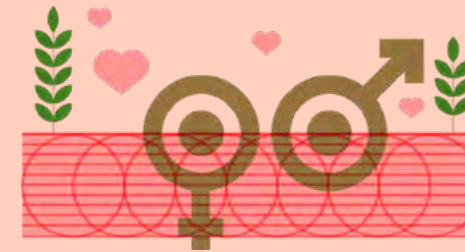
Tanaman, hewan, dan mikroorganisme merupakan perpustakaan raksasa senyawa kimia yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan obat. Sebanyak 50% sumber obat di Amerika Serikat berasal dari tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme, juga 80 persen dari populasi dunia bergantung pada obat-obatan yang berasal dari alam (Chivian 2008). Peluang Indonesia untuk memanfaatkan biodiversitasnya dan menjadi unggul di bidang obat sangat besar. Upaya ini dapat dimulai dengan memanfaatkan pengetahuan masyarakat tentang tanaman obat (etnobotani) yang telah digunakan dari generasi ke generasi.

Pengobatan menggunakan jamu dapat menjadi contoh. Warisan budaya ini bisa dijumpai di berbagai daerah, tetapi sulit ditepis bahwa tradisi jamu identik dengan budaya Jawa. Kesan ini tak berlebihan. Masyarakat Jawa memang telah menggunakan jamu sejak masa Mataram Kuno, kurang lebih 12 abad silam. Bahan utama jamu berupa herbal diwariskan turun-temurun, terutama melalui tradisi lisan.

Dokumentasi awal jamu dibuat oleh Jacobus Bontius (1592-1631), seorang dokter Belanda, yang pada awal abad ke-17 bekerja di Batavia. Tak lama kemudian Georg Eberhard Rumphius mendokumentasikan secara lebih komprehensif pengobatan tradisional berbasis herbal di Ambon pada abad ke-17.

Beberapa pengetahuan lain tentang tanaman obat di Nusantara berlaku seperti rahasia umum saja. Misalnya, tanaman-tanaman yang sejak dulu dipercaya memiliki efek afrodisiak atau meningkatkan hasrat dan kemampuan seksual, misalnya pasak bumi maupun purwaceng di Jawa, dan kayu sanrego di Sulawesi Selatan. Sebagian dari tanaman ini telah diolah menjadi jamu atau suplemen dan memiliki potensi pasar yang besar.

## Rayuan Afrodisiak Nusantara: untuk Ekonomi yang Lebih Perkasa



Apa yang lebih menghantui kaum pria selain loyo di ranjang? Dari panglima perang yang beringas, penguasa kabilah luas, hingga seorang jelata di balik kamar berkelambu lusuh berwajah melas, gairah seksual adalah kebanggaan selain salah satu kunci hubungan yang langgeng dan waras.

Jauh sebelum kita mengenal 'viagra' atau pil biru, raja-raja Jawa adalah pengguna setia obat-obatan herbal penjaga gairah seksual untuk dapat menunaikan kewajiban serta memuaskan istri dan selir yang jumlahnya tak cukup dihitung dengan jari tangan. Alam Nusantara yang subur dikaruniai berbagai jenis tumbuhan (dan hewan) yang dipercaya mampu mendongkrak hasrat seksual atau yang dikenal sebagai afrodisiak.

Tumbuhan seperti purwaceng (*Pimpinella pruatjan*) di Jawa, pasak bumi atau

tongkat ali (*Eurycoma longifolia*) di Sumatra dan Kalimantan, maupun sanrego (*Lunasia amara*) di Sulawesi Selatan, adalah contoh tanaman yang masyhur sejak dulu dipercaya sebagai afrodisiak. Asia memang telah lama dikenal sebagai benua yang kaya bahan afrodisiak.

Beberapa naskah kuno maupun tradisi lisan di berbagai suku di bumi Indonesia merekam aneka tanaman maupun bagian dari hewan yang diolah untuk menambah gairah seksual. *Serat Centhini* dari tanah Jawa, *Lontara Pabbura* dan *Lontara Assikalabineang* dari Bugis merupakan beberapa contoh. Jika dulu tanaman herbal diolah dengan cara tradisional yang merepotkan, kini kemasan dan tampilannya kian menarik dan praktis, berupa jamu herbal atau pil. Keuntungan ekonomi dari industri jamu, termasuk jamu penambah gairah seksual, sangat signifikan. Menurut Kementerian Perindustrian, Indonesia menempati urutan ke-4 sebagai produsen jamu atau herbal di dunia setelah Cina, India, dan Korea Selatan.

Keuntungan ekonomi afrodisiak tidak main-main. Pangsa pasarnya besar, dan selama seks masih dilakukan manusia, permintaannya akan senantiasa abadi sepanjang masa.

Viagra, misalnya, selama 20 tahun sejak dipasarkan, permintaannya tak pernah loyo. Sepanjang 2010-2012, Pfizer,

produsen Viagra—yang sebenarnya obat jantung, dengan kandungan sildenafil sitrat—melaporkan pendapatan yang diperoleh melalui obat kuat ini rata-rata 2 milyar dolar Amerika Serikat. Pesaing beratnya, Cialis (tadalafil), bahkan lebih hebat lagi dengan pendapatan 2,3 milyar dolar Amerika Serikat pada 2015.

Tidakkah Indonesia yang alamnya dikaruniai tanaman bahan baku obat penambah gairah seksual ngiler dengan angka-angka fantastis tersebut? Belum lagi banyaknya tenaga kerja yang terserap, serta penelitian terkait seksologi yang kian mendapat tempat. Dengan sains dan teknologi garda depan, jamu-jamu penambah gairah seksual itu dapat

ditingkatkan menjadi jamu tersaintifikasi maupun fitofarmaka.

Penggunaan sains dan teknologi mutakhir memungkinkan pula penemuan zat aktif berdampak afrodisiak dari purwaceng, pasak bumi, maupun sanrego.

Jika mending Hugh Hefner yang ketika berusia 84 bahkan menjuluki Viagra sebagai “pembantu kecil Tuhan”—yang ia konsumsi rutin sebelum bercinta—kenapa tidak kita ciptakan sendiri si “pembantu kecil Tuhan” khas Nusantara? Bukan hanya gairah seksual terus membara, ekonomi Indonesia pun akan berdiri lebih perkasa.

Orang Indonesia pertama yang serius menaruh perhatian pada tanaman obat adalah RM Santoso Soerjokoesumo. Di awal kemerdekaan ia mulai merintis Kebun Koleksi Tanaman Obat di Tawangmangu, Jawa Tengah, yang bertujuan melestarikan, membudidayakan, dan mengembangkan tanaman obat tradisional Indonesia. Pada 1948 ia menyerahkan koleksi tanaman obatnya kepada negara. Koleksi ini lalu dikelola oleh Lembaga Eijkman dan diberi nama Hortus Medicus Tawangmangu. Kementerian

Kesehatan mengambil alih pengelolaannya sejak 1963 dan kini namanya menjadi Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Tanaman Obat dan Obat Tradisional.

Sejak 2010 pemerintah mendorong modernisasi obat-obatan tradisional, misalnya melalui program saintifikasi jamu. Kini terdapat lebih dari 32 ribu ramuan herbal dari 2.848 spesies tanaman obat (Laporan Ristoja, Kementerian Kesehatan 2017). Tujuh ramuan dilaporkan telah melewati fase uji acak terkendali dan telah digunakan di klinik

milik Kementerian Kesehatan. Ini merupakan langkah awal dan contoh keberhasilan modernisasi obat tradisional yang terintegrasi dengan layanan kesehatan, suatu upaya terpadu dari hulu ke hilir. Hal semacam ini tentu membutuhkan investasi sains dan teknologi modern, sehingga dapat menghasilkan produk dengan kaidah-kaidah pengobatan modern. Misalnya, jaminan kualitas, keamanan, takaran terstandarisasi, dan seterusnya. Produk yang dihasilkan pun diharapkan berpotensi komersial dan dapat bersaing di pasar global.

Modernisasi sebetulnya bukan satu-satunya ikhtiar. Terdapat juga peluang untuk mengidentifikasi senyawa aktif yang terkandung dalam ramuan herbal tradisional dan mengembangkannya menjadi fitomarmaka dan obat modern. Harus dipahami bahwa sebagian besar obat tradisional bekerja berdasarkan interaksi dan sinergi beberapa senyawa. Ini berbeda dengan obat modern yang bekerja berdasarkan senyawa aktif. Di sinilah tantangan menjadikan obat tradisional menjadi obat modern. Pengembangan obat herbal tradisional harus memilih antara mengisolasi senyawa

aktifnya untuk obat modern, tetap menjadikannya obat tradisional tapi dengan kaidah pengobatan modern, atau mengarahkannya menjadi suplemen kesehatan. Indikasi dini secepatnya diperlukan untuk memutuskan arah pengembangan obat tradisional.

Potensi pasar obat tradisional terhitung besar dan kebutuhannya di tingkat global terus meningkat. Mayoritas penduduk di berbagai negara di Asia dan Afrika masih bergantung pada cara pengobatan tradisional. Laporan WHO 2013 menyatakan bahwa potensi pasar di Cina diperkirakan mencapai 83,1 triliun dolar AS pada 2012. Di Korea, pengeluaran untuk obat tradisional sekitar 4,4 triliun dolar AS pada 2004 dan naik menjadi 7,4 triliun dolar AS pada 2009. Laporan yang sama juga mengungkapkan bahwa di Amerika Serikat pengeluaran pribadi untuk pengobatan tradisional pada 2008 mencapai 14,8 triliun dolar AS. Berapa perdagangan obat tradisional di negeri jamu dan rempah ini? Hanya 3 triliun rupiah. Namun ini sebetulnya merupakan peluang sekaligus tantangan untuk mendorong pengembangan obat tradisional menjadi industri suplemen

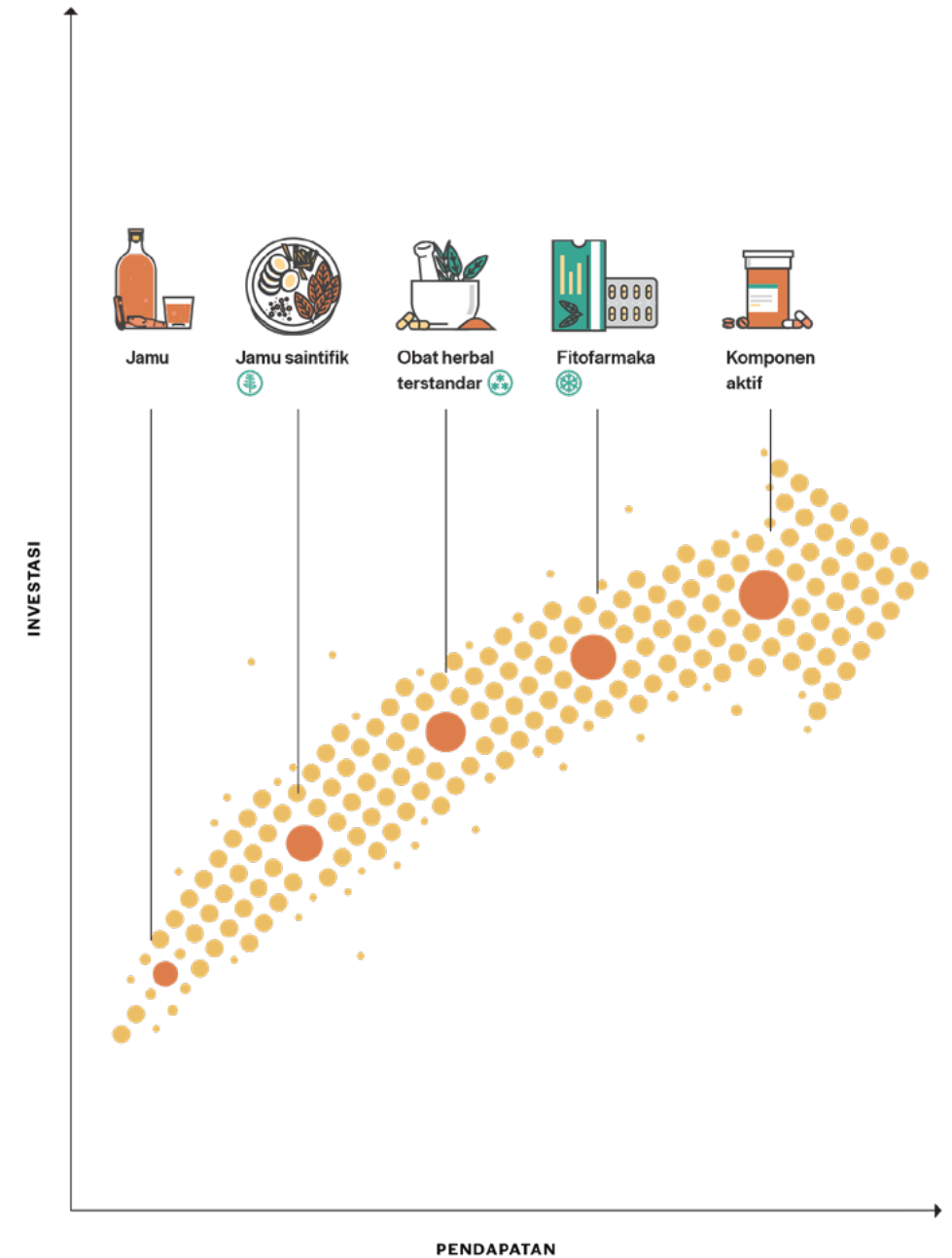
kesehatan atau bahkan obat modern. Untuk mewujudkan tujuan tersebut, Indonesia tak bisa bekerja sendiri. Berlimpahnya pengetahuan obat-obatan dan sistem pengobatan tradisional saja belum cukup. Bagaimanapun industri obat modern berbiaya mahal lebih banyak berada di negara maju. Karena itulah diperlukan kerja sama antara negara berkembang dan negara maju untuk mengeksplorasi dan mengoptimalkan manfaat obat-obatan tradisional. Pengembangan obat tradisional dapat dilakukan di beberapa tingkatan, yakni jamu, jamu saintifik, obat herbal terstandar, fitofarmaka, hingga isolasi komponen aktif. Setiap kenaikan tingkat membutuhkan investasi yang semakin besar, namun imbal hasilnya juga tak kecil (Gambar 3.3).

Tantangan lain yang harus diingat bahwa pengembangan obat tradisional menjadi obat modern memerlukan teknologi penapisan massal tingkat tinggi untuk menemukan senyawa yang bermanfaat. Rasio keberhasilan menemukan molekul yang bisa

dikembangkan menjadi obat hanya 1:10.000, tak ubahnya mencari jarum di tumpukan jerami.

Selain itu, kualitas lingkungan hidup juga harus terus dijaga untuk mendapatkan bahan obat yang berkualitas. Pencemaran lingkungan dan perubahan iklim merupakan tantangan besar yang berakibat turunnya keanekaragaman hayati. Seiring waktu, penutur tradisi lisan obat tradisional di berbagai suku di Indonesia pun berkurang.

Cina adalah salah satu negara yang masyhur dengan obat tradisionalnya. Pada 2017, pemasukan Cina dari penjualan obat tradisional mencapai 34 triliun dolar AS dengan jumlah industri sebanyak 1.368 unit. Pesatnya industri obat tradisional Cina tak lepas dari investasi dan kebijakan pemerintah dalam sektor pelayanan kesehatan, tingginya insiden penyakit kronik, aplikasi lain dari obat tradisional, serta perubahan persepsi masyarakat tentang obat tradisional Cina (GF Securities 2016).



Gambar 3.5 Perbandingan kebutuhan investasi dan pendapatan pemanfaatan biodiversitas untuk obat

## Ramuan Nobel Tu Youyou



Pada 2015, Komite Nobel menganugerahkan Hadiah Nobel Kedokteran kepada Profesor Tu Youyou. Ilmuwan asal Negeri Tirai Bambu itu dianggap berjasa atas penemuan artemisinin, zat antimalaria yang berasal dari tanaman apsintus manis (*Artemisia annua*). Di Cina, artemisin dikenal dengan sebutan lokal *qinghao*.

“Pengobatan tradisional (Cina) merupakan sumber daya yang kaya, namun ia membutuhkan pemikiran mendalam untuk eksplorasi dan improvisasi,” ujar Tu Youyou dalam pidato penganugerahan Nobelnnya. Pidato pada 2015 itu bukan saja membuka prestasi Tu ke khalayak internasional, tapi juga cerita mengenai sebuah pencarian panjang, tak

kenal lelah, demi kesehatan umat manusia—pencarian yang dilakukan di “perpustakaan” raksasa pengobatan tradisional Cina.

Penemuan Tu tidak lepas dari peristiwa perang yang menggoyak Vietnam pada 1960-an. Saat itu tentara Vietnam tengah menghadapi gempuran pasukan Amerika Serikat. Namun, muncul serangan lain yang tak kalah ganas, yaitu malaria. Penyakit yang menular lewat gigitan nyamuk tersebut menjelma menjadi penyebab kematian terbesar tentara Vietnam, melebihi serangan tentara Amerika Serikat.

Pada 1964, pemerintah Vietnam Utara yang berhaluan komunis mendekati pemimpin Cina, Mao Zedong, dan

meminta bantuan Cina untuk memerangi malaria. Mao saat itu menjawab, “Menyelesaikan masalah Anda sama dengan memecahkan masalah kami sendiri.”

Pada 1969, pemerintah Cina lantas meluncurkan Proyek 523, operasi rahasia yang dipimpin oleh Tu Youyou, peneliti medis perempuan yang kala itu usianya belum genap 40 tahun. Tu Youyou tidak perlu berkeliling jauh dari negeri asalnya untuk mendapatkan bahan yang diperlukan. Ia mengumpulkan dan mencari bahan mujarab dari ribuan resep ramuan herbal Cina yang berusia lebih dari 1.700 tahun. Tu Youyou harus menemukan obat baru, karena parasit malaria yang menjangkiti tentara Vietnam saat itu telah kebal terhadap chloroquine. Pencarian Tu Youyou membuahkan hasil saat ia mengekstraksi artemisinin dari apsintus manis, ramuan yang digunakan dalam perawatan demam di Cina selama lebih dari 2.000 tahun.

Sejak ditemukan pada 1972, artemisinin dan obat yang dibuat dari zat tersebut, dihydroartemisinin, telah menyelamatkan

dan meningkatkan taraf hidup jutaan orang. “Kelompok Profesor Tu memulai dengan mencari resep-resep yang telah digunakan untuk mengobati demam. Mereka mencari lebih dari 2.000 resep dan mengumpulkan 640 resep untuk evaluasi lebih lanjut dalam waktu tiga bulan. Mereka kemudian melihat nama masing-masing tanaman yang frekuensinya tinggi dalam resep-resep.” (Su & Miller 2015).

Penemuan artemisinin merupakan contoh pemanfaatan pengetahuan tradisional tentang sifat-sifat obat pada sumber alami sebagai titik awal penting dalam penemuan obat baru. Karena itu penting untuk menggali naskah kuno serta pengetahuan dan kearifan lokal sebagai pemandu. Selain itu, dokumentasi secara masif tradisi pengobatan di berbagai suku di Indonesia perlu dilakukan sebelum punah. Bukan tidak mungkin obat penyakit infeksi, penyakit yang berkaitan dengan gaya hidup dan penyakit degeneratif, dapat ditemukan setelah gigih menggali lontar-lontar kuno Nusantara.

### Energi Alternatif

Selain berperan penting dalam memenuhi kebutuhan air bersih, pangan, dan obat-obatan,

keanekaragaman hayati juga memainkan peran dalam pasokan sumber energi terbarukan. Ini merupakan keniscayaan mengingat persediaan sumber energi fosil dunia

kian menipis, termasuk di Indonesia sebagai salah satu produsen minyak bumi. Penggunaan energi minyak bumi, batu bara, dan gas juga tidak ramah lingkungan karena merupakan sumber emisi gas rumah kaca dan tidak mendukung mitigasi perubahan iklim. Sumber-sumber energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan perlu segera ditemukan. Investasi riset strategis mendasar untuk menyiapkan energi terbarukan untuk memperkuat ketahanan energi perlu segera dilakukan. Selain energi matahari, panas bumi, dan energi angin, bioenergi adalah salah satu jawaban.

Dengan kekayaan alam melimpah, Indonesia berpotensi tidak hanya mencukupi kebutuhannya sendiri, namun menjadi lumbung bioenergi dunia. Berbagai upaya untuk menghasilkan bahan bakar berbasis hayati telah mulai dilakukan. Sebagai negara penghasil minyak nabati terbesar di dunia, Indonesia memiliki bahan baku biodiesel beraneka ragam: asam lemak dari kelapa sawit, jarak pagar, kelapa, sirsak, srikaya, kapuk, dan alga. Namun tak semua upaya berjalan sukses, salah satunya

karena isu pengalihan dan kompetisi lahan dengan pertanian serta perkebunan untuk pangan.

Jika isunya adalah lahan yang terbatas, alga dapat menjadi alternatif sumber energi terbarukan karena dapat menghasilkan biodiesel secara lebih efisien. Alga juga tak membutuhkan lahan pertanian sehingga tak bersaing dengan produksi pangan. Selain alga, Indonesia memiliki beragam mikroba yang berpotensi dikembangkan menjadi penghasil bahan bakar terbarukan. Contohnya adalah sianobakteri, suatu filum bakteri yang mampu mengubah energi matahari menjadi bahan bakar bio atau bahan energi listrik melalui fotosintesis. Tantangannya adalah bagaimana menciptakan fotosintesis yang efektif, ekonomis, dan pasokannya berkesinambungan, misalnya melalui fotosintesis buatan. Kekayaan keanekaragaman spesies dengan struktur sistem fotosintesis yang unik karena tumbuh di lingkungan berbeda atau ekstrem, dapat menginspirasi teknologi sel surya yang mampu menangkap serta menyimpan energi cahaya secara lebih efisien dan efektif.

Residu makhluk hidup dan sampah yang biasanya habis dibakar bisa jadi pertimbangan lain sebagai sumber energi alternatif yang bersifat lokal. Keduanya merupakan bahan hayati biomassa. Berbagai sampah organik dan limbah agroindustri merupakan bahan baku potensial pembuatan biomassa dan biogas melalui pemanfaatan teknologi anaerobik, yakni proses dekomposisi biomassa secara mikrobiologis tanpa oksigen. Hasilnya berupa gas metana dan pupuk organik. Gas metana, yang ramah lingkungan karena dapat terbakar sempurna, bernilai ekonomi tinggi dan dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan dapur rumah tangga hingga penggerak turbin pembangkit listrik.

Lebih menarik lagi, biomassa dapat diolah menjadi bioarang, bahan bakar dengan nilai kalori tinggi dan dapat digunakan untuk kebutuhan sehari-hari. Arang serupa, dalam bentuk briket, juga dapat diproduksi dari batok kelapa sawit guna memenuhi kebutuhan industri. Untuk kebutuhan energi rumah tangga, beberapa daerah dan kelompok masyarakat sudah menggalakkan program konversi sampah menjadi

biomassa—juga sekaligus penerapan ekonomi sirkuler. Namun energi yang semestinya kita kembangkan adalah yang tak mengeluarkan emisi karbon sehingga tidak memperparah pemanasan global. Salah satunya adalah merekayasa mikroorganisme seperti mikroalga untuk menjadi sumber energi *positive climate*, yang sekaligus mengurangi emisi karbon di dalam atmosfer.



# IV

## ANCAMAN, TANTANGAN, DAN UPAYA KONSERVASI

*Jika kita mencemari udara, air, dan tanah yang membantu kita bertahan hidup dengan baik, serta merusak keanekaragaman hayati yang menopang berbagai sistem alam untuk berfungsi, tak ada uang dalam jumlah berapa pun yang dapat menyelamatkan kita. – David Suzuki*



Agar dukungan keanekaragaman hayati bagi kehidupan manusia awet, keanekaragaman hayati harus senantiasa dipelihara, dijaga, dan dilestarikan. Sains diperlukan untuk menghadapi tantangan dan ancaman terhadap keanekaragaman hayati yang justru kian besar. Kerusakan dan kepunahan biodiversitas, di darat maupun di laut, menjadi ancaman yang semakin nyata. Ancaman ini timbul akibat kerusakan habitat sebagai konsekuensi ulah destruktif manusia, seperti deforestasi, pengambilan berlebihan, polusi, invasi spesies asing, maupun perubahan iklim. Berbagai kegiatan ekonomi yang bertujuan memenuhi kebutuhan hidup manusia dan industri lebih berfokus secara berlebihan untuk kepentingan jangka pendek.

Kepunahan bukan hanya akan terjadi pada binatang besar, seperti gajah atau harimau, tapi juga bisa menimpa mikroorganisme, serangga, dan tumbuh-tumbuhan yang secara mendasar berperan dalam jasa ekosistem. Tanpanya, kelangsungan hidup manusia terancam. Dengan laju kerusakan dan modifikasi atau alih fungsi lingkungan sebagaimana yang berlangsung saat

ini, terutama di hutan-hutan tropis yang menjadi rumah bagi setengah keanekaragaman hayati dunia, yang pasti terjadi adalah kemiskinan biologis-ekologis dan terancamnya kelangsungan hidup. Kesehatan dan ketersediaan sumber makanan dan air adalah hal yang paling terkena dampak akibat kerusakan biodiversitas. Karena itu diperlukan upaya konservasi yang bersifat menyeluruh dan pengelolaan lintas sektoral.

Lebih dari itu, dibutuhkan pula adanya penguatan sains garda depan untuk secara mendasar memahami fenomena-fenomena yang ada. Misalnya, sains ekologi restorasi dan biologi konservasi; sains tata kelola lingkungan; sains bioremediasi, sains untuk menemukan material alternatif dari plastik untuk mengatasi polusi plastik; sains untuk meningkatkan kapasitas budi daya demi mengatasi eksploitasi berlebihan; sains untuk memahami secara mendasar dampak invasi spesies asing terhadap suatu ekosistem; dan sains untuk mengatasi zoonosis. Pengetahuan-pengetahuan ini merupakan prasyarat untuk mencegah kerusakan lebih jauh, yang juga mutlak diperlukan guna memitigasi dampak

## Menilik Kondisi Biodiversitas dalam Laporan IPBES

Laporan *Global Assessment on Biodiversity and Ecosystem Services* yang diterbitkan Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) menjadi buah bibir. Berdasarkan laporan yang draftnya terbit tahun 2019 ini, sekitar 1 dari 4 spesies dalam kelompok satwa dan tumbuhan terancam, yang berarti sekitar 1 juta spesies akan mengalami kepunahan. Jumlah tersebut tak sedikit dalam hitungan dekade, kecuali tindakan diambil untuk mengurangi intensitas dari pendorong hilangnya biodiversitas. Terutama berlangsung dalam 50 tahun terakhir, dampak manusia terhadap lingkungan telah menyebabkan biodiversitas di planet bumi merosot secara drastis. Hal ini tak pernah terjadi sebelumnya dalam sejarah umat manusia.

Menurut laporan komprehensif ini, secara umum, pendorong langsung perubahan alam dengan dampak paling besar secara global adalah, secara berurutan, perubahan guna lahan dan laut; eksploitasi langsung terhadap organisme; perubahan iklim; polusi; dan invasi spesies asing. Secara khusus, berdasarkan konteks, untuk ekosistem terestrial dan perairan umum daratan, perubahan guna lahan berdampak paling negatif, sementara untuk ekosistem laut, eksploitasi terhadap organisme khususnya perikanan berdampak paling negatif di antara pendorong langsung tersebut. Pendorong langsung ini dipicu oleh sekelompok pendorong tidak langsung yang termasuk pola produksi dan konsumsi; dinamika dan kecenderungan populasi manusia;

perdagangan; inovasi teknologi; dan tata kelola global. Risiko dari keadaan ini terbilang besar. Sebagai ilustrasi, menurut laporan ini, degradasi lahan menurunkan produktivitas area terestrial global sebesar 23%, dan risiko terhadap hasil tanaman pangan global senilai antara 235 miliar sampai 577 miliar dolar AS akibat hilangnya polinator. Sementara hilangnya habitat pantai dan terumbu karang meningkatkan risiko hilangnya perlindungan jiwa dan hak milik akibat banjir dan badai. Terdapat 100 sampai 300 juta orang yang tinggal di zona pesisir ini.

IPBES adalah organisasi antarpemerintah yang didirikan untuk menjembatani sains dan kebijakan terkait isu biodiversitas dan jasa ekosistem. Kerap kali IPBES disepadankan dengan IPCC, panel serupa untuk isu perubahan iklim. Kelahiran IPBES berdasarkan resolusi Sidang Umum PBB tahun 2010 yang meminta UNEP (United Nations Environment Programme) untuk mendirikan IPBES. Laporan Penilaian Global terhadap Biodiversitas dan Jasa Ekosistem yang diterbitkan IPBES disetujui oleh Pleno IPBES tahun 2019 di Paris, Perancis. Laporan ini terdiri dari enam bab dan satu ringkasan untuk pembuat kebijakan, serta diharapkan menjadi landasan ilmiah bagi keputusan-keputusan politik dan sosial yang tercerahkan terkait kebijakan biodiversitas. Laporan ditulis secara kolaboratif oleh para penulis berbagai bidang ilmu dan lintas-ilmu dari 50 negara, serta lebih dari 300 kontributor selama tiga tahun, dengan menimbang lebih dari 15 ribu publikasi ilmiah dan laporan.

yang ditimbulkan. Selain itu, apa pun kebijakan yang akan dipilih seharusnya berdasarkan bukti yang

sahih, yang menempatkan kesehatan manusia, kesehatan lingkungan, dan daya dukung bumi sebagai pusat.

## Tantangan terhadap Biodiversitas

Kehidupan di dunia ini saling terhubung. Siapa saja, apa pun juga, terkait secara langsung dan tidak langsung dengan dukungan lingkungan yang sehat. Dalam kenyataannya kerusakan alam terus-menerus terjadi.

Dapat dibayangkan ketika penduduk bumi saat ini berjumlah 8 miliar, semua membutuhkan makan, pakaian, dan tempat bernaung yang layak. Semua, tentu saja, bergantung pada apa yang disediakan oleh alam. Ironisnya, upaya untuk memenuhi kebutuhan-kebutuhan tersebut justru menimbulkan kerusakan lingkungan, mengancam kesehatan manusia, dan untuk jangka panjang dan menengah akan merugikan secara ekonomi. Karena itulah diperlukan pendekatan baru berdasarkan sains dan teknologi, yang didukung kemauan politik yang kuat, untuk menyelaraskan pemenuhan

pembangunan dan kebutuhan manusia, dengan tetap menjaga kelestarian alam (ekonomi sirkuler).

### Deforestasi Tanpa Kendali

Alih fungsi hutan primer menjadi lahan perkebunan dan pertanian, pemukiman, dan pertambangan merupakan tantangan serius bagi biodiversitas Indonesia. Alih fungsi mestinya ditakar dengan baik, dengan perhitungan berdasarkan sains, sehingga hutan tetap dapat dimanfaatkan secara lestari. Jasa ekosistem memang merupakan suatu hal yang tak tampak langsung, tapi tak terganti dan bernilai ekonomi tinggi.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan pada 2016 menyatakan bahwa laju pembabatan hutan mencapai 600-700 ribu hektare per tahun. Forest Watch Indonesia (2016)

memiliki data yang berbeda, yaitu 1,13 juta hektare per tahun; hampir dua kali lipat angka pemerintah. Dengan data mana pun, musnahnya hutan di berbagai daerah adalah fakta yang mencemaskan. Menurut Jaringan Kerja Penyelamatan Hutan Riau, hutan alam di sana hanya tersisa 1,7 juta hektare atau 19% dari total daratannya. Laju deforestasinya mencapai 188 ribu hektare per tahun. Wajar bila diyakini daerah-daerah lain mengalami hal yang kurang-lebih sama. Dalam jangka menengah dan panjang, kecenderungan ini bakal merugikan semua pihak.

Punahnya berbagai spesies yang menjadi bagian dari keanekaragaman hayati di Indonesia merupakan akibat yang tak terelakkan dari hilangnya habitat-habitat terkait deforestasi besar-besaran itu. Salah satu pendorong utama deforestasi Indonesia berasal dari perkebunan kelapa sawit (Austin *et al.* 2019). Dampak ekonomi dan sosial dari sawit merupakan kontributor terbesar dalam pembangunan ekonomi, antara lain, pertumbuhan ekonomi, peningkatan pendapatan, pengentasan masyarakat miskin, dan penciptaan lapangan kerja. Yang diperlukan adalah jalan tengah dari

perkebunan sawit berkelanjutan, misalnya perkebunan sawit di lahan terdegradasi—30 juta hektare (Austin *et al.* 2017), mengurangi ekstensifikasi, serta meningkatkan intensifikasi. Edukasi petani sawit diperlukan untuk meningkatkan kualitas hasil perkebunan sawit serta mencegah ekstensifikasi sawit.

Data yang dirilis International Union for Conservation of Nature pada Desember 2013 menyebutkan Indonesia berada di peringkat keempat negara-negara dengan jumlah spesies terbanyak yang terancam punah. Menurut data ini, 1.206 spesies terancam hilang.

Kondisi ini perlu ditanggapi secara serius. Bagaimanapun, keanekaragaman hayati adalah inti dari ekosistem dan keseimbangan alam; juga penyedia kebutuhan manusia—pangan, sandang, papan, obat-obatan, dan lain sebagainya. Ancaman terhadap keanekaragaman hayati semestinya menjadi pemikiran bersama. Program-program berkelanjutan yang berkaitan dengan pelestariannya harus senantiasa dikembangkan dan mencakup program jangka panjang. Salah satu cara mengurangi dampak

buruk deforestasi adalah dengan menyambung hutan (*reconnecting forest*) (Van Oosten 2013). Untuk itu diperlukan pemahaman mendasar tentang konektivitas hutan dan luas minimum tutupan hutan. Kesehatan hutan serta berbagai ekosistem di dalamnya atau yang bergantung padanya merupakan prasyarat dalam menciptakan lingkungan yang produktif untuk pertanian dan perkebunan. Jasa ekosistem hutan yang tak tergantikan dan bernilai tinggi inilah yang perlu dipahami untuk pembangunan ekonomi jangka panjang.

### Eksplorasi yang Kelewatan

Bila sumber daya terbarukan digunakan hingga ke titik tanpa imbal balik, saat itulah berlaku apa yang disebut eksploitasi berlebihan. Istilah tersebut menggambarkan bagaimana suatu populasi dimanfaatkan dengan laju yang tak berkesinambungan akibat besarnya perbedaan antara kapasitas reproduksi dan laju pemanfaatan atau kematiannya.

Memang benar semua organisme membutuhkan sumber daya untuk hidup. Manusia tak terkecuali. Dulu

populasi manusia masih relatif kecil, penggunaan sumber daya untuk bertahan hidup pun rendah. Setelah populasi manusia bertambah berlipat-lipat, permintaan akan sumber daya, termasuk pemanfaatan organisme, jadi melampaui batas keberlangsungannya. Pasar yang membesar skalanya dan akses yang kian mudah, juga berkembangnya teknik pemanfaatan sumber daya, ikut memperburuk keadaan. Ancaman terhadap biodiversitas, risiko punahnya suatu populasi dan bahkan spesies, bakal tak terhindarkan bila eksploitasi berlebihan berlangsung terus-menerus.

Eksplorasi berlebihan terjadi di darat maupun di laut. Di darat, misalnya, pengambilan secara berlebihan kayu ulin atau yang sering disebut sebagai bulian atau kayu besi. Kayu khas Kalimantan ini sangat kuat sehingga banyak dimanfaatkan untuk bahan bangunan, seperti rumah, jembatan, dan perahu. Masalahnya, pertumbuhan ulin sangat lambat. Rata-rata pertumbuhan diameter kayu ulin hanya 0,058 cm per tahun. Bandingkan dengan pertumbuhan rata-rata diameter pohon meranti, misalnya, yang mencapai sekitar 1

cm per tahun, bahkan 2 cm dengan perlakuan khusus. Selain kayu ulin, kayu gaharu di Papua yang digunakan sebagai salah satu bahan pembuatan parfum, kosmetik, dan obat-obatan juga mengalami nasib serupa. Masih banyak spesies lain yang mengalami eksploitasi berlebihan sebagaimana ulin dan gaharu.

Di laut, eksploitasi berlebihan dapat berupa penangkapan berlebihan tanpa memperhatikan keseimbangan ekologi laut. Penangkapan ikan dengan cara yang tidak ramah lingkungan juga merusak ekosistem. Misalnya, penggunaan racun dan bahan peledak yang dapat merusak terumbu karang, serta penggunaan pukat harimau atau sejenis jaring berongga kecil yang menyebabkan ikan-ikan kecil yang masih dalam tahap pertumbuhan ikut mati.

Diperlukan sains untuk memahami lebih mendalam biologi konservasi dari spesies-spesies di darat dan di laut dalam upaya mengatasi eksploitasi berlebihan ini. Tak kalah penting, diperlukan penguatan riset terkait eksploitasi berlebihan dan sosialisasi hasilnya secara luas ke pemangku kepentingan, pengambil kebijakan, dan masyarakat umum.

### Lingkungan yang Kian Tercemar

Kenaikan jumlah penduduk dan perubahan fungsi lahan yang berkaitan dengan kegiatan manusia, seperti pemukiman, pertanian, dan industri merupakan faktor yang lazim menjadi pemicu polusi lingkungan di Indonesia. Perubahan lahan dan peningkatan beban pencemar, di antaranya limbah organik dan sedimen di sungai, menimbulkan pencemaran perairan darat dan laut.

Secara umum, terdapat lima jenis pencemar yang banyak dijumpai akibat kegiatan manusia, yaitu sedimen, logam berat, organik (eutrofikasi), plastik, maupun penggunaan berlebihan pupuk dan pestisida. Pencemaran berat terjadi di 75% sungai kita (Witono 2017). Berdasarkan status kualitas air sungai selama periode 2007-2014, sungai-sungai di 17 provinsi telah tercemar berat, yang meliputi sebagian besar sungai di Jawa (BPS 2017). Polusi di Laut Jawa, misalnya, sebagian besar berasal dari limbah kegiatan rumah tangga, pertanian, dan industri. Sedimentasi dan limbah padat tergolong sumber

utama polutan yang melanda pesisir. Sumber yang berbasis di daratan juga memainkan peran penting di situ.

DKI Jakarta bisa dikemukakan sebagai contoh yang ekstrem. Mulai membangun secara intensif pada 1970-an, provinsi ini segera mengalami pertumbuhan urbanisasi yang amat pesat. Populasinya meningkat 93% selama periode 1971-2005, menjadi 8,86 juta orang (BPS 2017). Penambahan jumlah penduduk yang berlangsung terus-menerus itu berdampak pada perubahan fungsi lahan. Gambar satelit dari masa 1971 dan 2004 menunjukkan betapa penggunaan lahan di ibu kota negara ini telah berubah sekitar 80%, dari daerah vegetasi menjadi kawasan perkotaan. Derajat pencemaran yang ditimbulkan terlihat, misalnya, dari peningkatan konsentrasi nitrat di Teluk Jakarta, menjadi lima kali lipat (Arifin 2005). Sedimentasi di lokasi yang sama bertambah tanpa henti, dari 1970-an dan 1980-an, akibat pengerukan pelabuhan, eksplorasi pasir, dan konversi hutan bakau untuk reklamasi lahan, menjadi area pemukiman (UNESCO 2006). Beban sedimen yang menggelontor dari sungai-sungai pun mengubah lingkungan di muara dan pesisir,

bahkan mempengaruhi ekosistem terumbu karang di Kepulauan Seribu. Di kepulauan ini, luas tutupan karang yang pada 1970-an mencapai 70-80% menyusut drastis pada 1995 tinggal 15-30% (UNESCO 2006).

Sumber polusi dari kegiatan industri ikut memperparah masalah lingkungan di Teluk Jakarta itu. Hal ini bisa terlihat dari konsentrasi logam kromium dan seng yang meningkat 2-3 kali sejak 1965, padahal sebelum 1960 terhitung stabil (Schoemar & Wahyono 2007). Ditemukan pola intensifikasi konsentrasi klorofil-a, serupa dengan yang terdapat di daerah pantai. Klorofil-a adalah pigmen fotosintesis yang keberadaannya menggambarkan biomassa fitoplankton, yang berperan mengubah zat anorganik menjadi zat organik, dalam suatu ekosistem perairan. Konsentrasi klorofil-a merupakan petunjuk betapa Teluk Jakarta adalah tempat pembuangan limbah cair, termasuk limbah rumah tangga, limbah industri, limbah pertanian, dan limpasan perkotaan. Pencemaran lingkungan akibat penggunaan berlebihan pupuk dan pestisida dalam pertanian kita juga

## Lautan Plastik

Sampah plastik menghadapkan manusia dengan persoalan pelik. Tapi kesadaran mengenai betapa seriusnya hal ini barangkali hanya bisa dimunculkan dengan kenyataan bagaimana sampah plastik bermuara di tempat pembuangan paling akhirnya: laut. Inilah isu besar dalam ekosistem laut.

Pada 2010, diperkirakan 275 juta ton limbah plastik dihasilkan di 192 negara pantai. Sebanyak 4,8 hingga 12,7 juta ton dari jumlah ini memasuki laut. Indonesia berada di peringkat kedua setelah Cina sebagai negara penghasil sampah plastik terbesar di dunia. Serpihan plastik laut yang dihasilkannya setiap tahun mencapai 0,48-1,29 juta ton. Dalam lautan plastik ini tersimpan bahaya besar, yakni mikroplastik dalam rantai makanan yang pasti kembali ke manusia, serta kemampuan plastik menyerap bahan polutan akan berdampak bagi keamanan pangan.

Dalam kondisi seperti ini menjadi penting untuk memiliki semacam alarm, sebagai pemberi peringatan mengenai buruknya pencemaran laut akibat perubahan kualitas air dan perubahan lahan. Untuk

inilah Indeks Kualitas Lingkungan Hidup (IKLH) berfungsi. Indeks ini merupakan gabungan dari tiga indeks lain, yakni kualitas udara, kualitas air, dan luas tutupan hutan. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan telah melaporkan bahwa IKLH Indonesia pada 2017 angkanya sudah meningkat menjadi 66,46 atau kategori cukup baik. Namun, indeks DKI Jakarta berada di angka 35,78, terburuk nasional atau dalam kelompok waspada. Selain itu, DI Yogyakarta nilainya 49,80, kondisinya sangat kurang baik. Enam provinsi lain masuk dalam kategori kurang baik, yaitu Jawa Barat (50,26), Banten (51,58), Nusa Tenggara Barat (56,99), Jawa Timur (57,46), Jawa Tengah (58,15), dan Lampung (59,72) (KLHK 2018).

Indonesia perlu mengambil langkah strategis untuk mengatasi polusi. Yang mesti dilakukan adalah menguatkan sains di bidang biomaterial, untuk menciptakan materi pengganti plastik, dan bioremediasi, untuk mengurangi dampak pencemaran berbasis sumber daya biologi. Namun, lebih penting lagi adalah mengubah perilaku manusia.



perlu mendapatkan perhatian serius. Diperkirakan sekitar 69% tanah di Indonesia dikategorikan dalam kondisi rusak lantaran penggunaan pupuk dan pestisida berlebihan (FAO 2016). Banyak petani di Indonesia memberikan pupuk dalam takaran besar karena mengira semakin banyak pupuk, semakin tinggi produksi yang dihasilkan. Padahal yang terjadi adalah sebaliknya, tanah menjadi rusak dan kesehatan manusia terancam.

Sejumlah studi memperlihatkan bahwa penggunaan pupuk dan pestisida berlebihan merupakan salah satu faktor pemicu menurunnya serangga—spesies dengan fungsi ekologi sangat penting—di banyak negara (Sanchez-Bayo & Wyckhuys 2019). Pupuk dan pestisida berlebihan juga menjadikan biaya produksi beras di Indonesia cukup tinggi. Berdasarkan data FAO (2017), rata-rata biaya produksi beras di Indonesia sebesar Rp5.900 per kg, jauh di atas Vietnam yang hanya Rp2.300 per kg, Australia Rp1.800 per kg, dan Amerika Serikat hanya Rp900 per kg.

Pemanfaatan sains dan teknologi untuk mendukung program

perbaikan tanah (Soil Amendment Program) dengan memperbaiki sifat biologi tanah menjadi sangat mendesak. Tentu diperlukan juga upaya serius untuk mencerahkan dan memberdayakan petani kita sehingga dapat menggunakan pupuk dan pestisida secara lebih tepat dan bijaksana.

### **Sains Bioremediasi, Penangkal Polusi**

Mikrob adalah organisme mikroskopis, tak bisa dilihat dengan mata biasa, yang berperan penting dalam penyerapan karbon. Selain itu, ia juga berperan besar di balik proses metabolisme kolektif yang bersifat pokok—termasuk fiksasi atau pengikatan nitrogen, metabolisme metana, dan metabolisme sulfur—serta untuk mengendalikan siklus biogeokimia global.

Berbagai jenis mikrob memiliki kemampuan mendaur ulang zat polutan, misalnya bakteri, arkea, dan cendawan. Dalam daur ulang itu zat polutan dipecah menjadi senyawa tak berbahaya. Proses alami ini dikenal sebagai bioremediasi. Keunggulan mikrob adalah pertumbuhannya yang sangat cepat dan dapat dimanipulasi

## *Nyok Kite Bebersih Kali Sentiong Pake Mikrob!*



Pemerintah mulai bergerak untuk merehabilitasi sungai-sungai yang tercemar. Contohnya adalah inisiatif Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) yang menerapkan teknologi bioremediasi antara lain dengan melakukan penebaran mikroorganisme di Kali Sentiong atau Kali Item, Jakarta. Penggunaan mikroorganisme dalam bioremediasi bertujuan mengurangi polutan dalam air dan bekerja perlahan mematikan bau tidak sedap Kali Sentiong.

Aliran Kali Sentiong yang antara lain mengalir di Jakarta Pusat memang menghasilkan bau tidak sedap karena adanya limbah domestik yang mengandung senyawa organik. Teknologi bioremediasi merupakan pengembangan dari bidang bioteknologi lingkungan dengan memanfaatkan proses biologi dalam mengendalikan pencemaran tersebut. Mikroorganisme yang disebar memiliki tiga bentuk, yakni padat, serbuk, dan cair yang penebarannya dilakukan di sejumlah lokasi berbeda, pada 8-9 Agustus 2018.

*(Diceritakan kembali dari <https://bisnis.tempo.co/read/1116316/pupr-terapkan-teknologi-bioremediasi-untuk-kali-item/full&view=ok>)*

Penebaran dilakukan secara bertahap. Penebaran pertama adalah penebaran mikroorganisme bentuk padat dengan berat 2,5 kg sebanyak 500-600 bioblock di hulu Kali Sentiong. Kelebihan dari penebaran dengan cara tersebut adalah bakteri lama terurai sehingga masa tinggal bakteri bisa lebih panjang hingga tiga bulan. Namun bakteri memerlukan masa adaptasi untuk bereaksi aktif hingga delapan jam.

Sementara penebaran kedua dalam bentuk serbuk sebanyak puluhan karung dan juga dalam bentuk cair sebanyak 10.290 liter. Mikroorganisme ini akan bekerja aktif sekitar satu jam setelah penebaran. Penggunaan bioremediasi merupakan salah satu pilihan teknologi ramah lingkungan yang bersih, alami, dan mudah diaplikasikan untuk perbaikan kualitas air. Bioremediasi juga bisa menjadi bagian dari operasi pemeliharaan badan-badan air, termasuk sungai, embung, waduk, dan danau.

sehingga sifat-sifat unggulnya saja yang muncul. Bakteri, misalnya, sudah mulai dikerahkan untuk menyuburkan tanah di lahan gambut sehingga petani tak perlu membakar lahan. Kebakaran pun terhindarkan. Masih banyak potensi yang dapat dimanfaatkan dari mikrob. Misalnya, pemanfaatan mikrob sebagai pupuk hayati dan bioinsektisida untuk mencegah cemaran bahan kimia yang berpotensi terbawa ke perairan atau lingkungan lain dan merusak keseimbangan ekosistem. Yang diperlukan mula-mula adalah pemahaman terhadap sifat-sifat dasarnya.

### Perubahan Iklim Global

Perubahan iklim menjadi ancaman bagi biodiversitas. Penyebab perubahan iklim modern adalah pemanasan global sebagai konsekuensi dari laju konsentrasi gas rumah kaca oleh aktivitas manusia (IPCC 2013). Dalam konsentrasi tertentu, gas rumah kaca seperti CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dan metana, telah menopang evolusi kehidupan di bumi. Tanpa gas rumah kaca, suhu rata-rata bumi akan turun drastis dari rata-rata 15° Celsius menjadi -18° Celcius, turun sekitar 33° Celcius, yang tidak

kondusif bagi banyak makhluk hidup. Gas rumah kaca layaknya sebuah selimut yang bersifat transparan bagi energi matahari yang masuk namun menahan energi panas keluar. Laju CO<sub>2</sub> di atmosfer yang dipompa sejak era industrialisasi meningkat lebih cepat dibanding kemampuan alam untuk menyerapnya kembali dalam siklus alami karbon, sehingga menyebabkan tingkat pemanasan yang tidak lagi kondusif bagi berbagai spesies di bumi. Suhu rata-rata permukaan laut global telah meningkat sebesar 0,11°C per dekade antara 1971 dan 2010 (IPCC 2013). Mencairnya es di kutub dan naiknya permukaan laut sebesar 2,8-3,6 mm/tahun (IPCC 2013) mengubah struktur dan sebaran ekosistem pesisir, seperti bakau, lamun, dan terumbu karang.

Selimut gas rumah kaca yang mulanya membuat nyaman kehidupan di bumi kini terlalu tebal dan menjadi bumerang bagi biodiversitas. Kenaikan suhu bumi memiliki konsekuensi yang besar, khususnya dalam ranah mikro terhadap biota di darat maupun laut, yang kisaran toleransinya terhadap suhu sangat pendek. Ini dapat ditemukan di wilayah

tropis yang kisaran suhunya relatif stabil sepanjang tahun. Kenaikan suhu permukaan laut juga dapat menyebabkan stratifikasi vertikal lapisan perairan laut, sehingga melemahkan sirkulasi *upwelling* yang berjasa dalam membawa massa air dari lapisan yang kaya zat hara. Perairan Indonesia paling tidak memiliki tiga lokasi *upwelling* musiman (musim timur), yaitu perairan selatan Jawa sampai Kepulauan Sunda Kecil, Makassar, dan Laut Banda. Pelemahan *upwelling* dapat mengurangi suplai nutrisi dari lapisan dalam ke permukaan yang menopang sektor perikanan.

Perubahan iklim memiliki dampak yang multidimensi. Salah satunya yaitu perubahan pola angin, misalnya, dapat memicu perubahan pola migrasi hewan seperti burung serta sebaran biomaterial, debu, dan nutrisi lainnya. Akibatnya, terjadi perubahan pola sebaran biota maupun vegetasi di darat dan laut. Perubahan pola angin pada lingkungan laut dapat menyebabkan perubahan migrasi ikan pelagis serta biogeografi laut dalam berbagai skala spasial.

Di laut, perubahan iklim menyebabkan laut menjadi panas, asam, dan kehilangan napasnya. Kurang lebih 30% dari emisi CO<sub>2</sub> antropogenik di atmosfer diserap oleh laut dan menyebabkan turunnya pH laut atau dikenal dengan fenomena pengasaman laut. Potensi dampak pengasaman laut di Indonesia sangat luas dengan posisinya sebagai pusat karang dunia di mana proses pembentukan karang dan biota laut berkapur lainnya termasuk bioindustri seperti kerang mutiara diprediksi menurun. Di sisi lain, kenaikan suhu laut juga meningkatkan solubilitas oksigen atau laut mengalami deoksigenasi. Kenaikan suhu juga dapat menekan konsentrasi klorofil-a di laut yang berdampak bagi stok ikan di laut. Klorofil-a adalah indikator produktivitas utama, yang akan memengaruhi rantai makanan jika jumlahnya berkurang.

Reorganisasi iklim mendorong makin sering terjadinya cuaca ekstrem dan makin intensnya badai tropis. Gelombang panas (*heatwave*) baik di darat maupun laut juga semakin sering terjadi dengan intensitas yang meningkat. Dalam dekade terakhir, gelombang panas telah menyentuh

semua samudra di dunia. Di Indonesia, *marine heatwave* melanda sisi selatan perairan Indonesia pada 2016 yang menyebabkan kematian karang secara massal. Pergeseran musim hujan juga dapat menyebabkan kepunahan spesies yang telah menyesuaikan masa kawinnya dengan ritme iklim. Dalam jangka panjang, cuaca dan iklim ekstrem dapat memengaruhi pola adaptasi atau bahkan berakibat pada kepunahan. Kerugian ekologi, materi, bahkan korban jiwa, menegaskan betapa perubahan iklim adalah ancaman nyata, bukan saja bagi biodiversitas, tapi juga kelangsungan hidup manusia.

Semua hal itu, pada akhirnya, menunjukkan bahwa siapa pun harus menanggung risiko kerusakan lingkungan hidup. Untuk memiliki kemampuan memprediksi dan mengatasi dampak perubahan iklim terhadap biodiversitas, diperlukan penguatan sains. Selain untuk tujuan itu, sains dibutuhkan untuk membantu memahami mekanisme adaptasi makhluk hidup dalam menghadapi perubahan iklim, baik secara temporal, spasial, maupun fisiologis, di tingkat individu, populasi, spesies, komunitas,

ekosistem, maupun bioma (Bellard 2012). Sains dan teknologi dapat membantu manusia menetapkan kebijakan secara objektif.

### Spesies Asing Invasif

Spesies asing invasif—dalam perundangan disebut jenis asing invasif—merupakan ancaman bagi biodiversitas dengan dampak ekologi dan ekonomi yang serius. Kerugian yang ditimbulkannya bisa sangat besar.

Spesies asing invasif (SAI) adalah hewan, tanaman, atau organisme lain yang diintroduksi manusia di daerah-daerah di luar penyebaran alaminya. Kehadiran SAI bisa mengubah ekosistem, menyebabkan degradasi dan bahkan hilangnya habitat. SAI dapat menggantikan spesies asli, mengubah struktur komunitas dan rantai makanan, serta mengubah proses-proses mendasar, seperti siklus nutrisi dan sedimentasi (Molnar 2008). Bagi Indonesia, yang terdiri atas beberapa ekosistem yang khas, SAI bisa berasal dari luar batas wilayahnya, bisa pula dari satu ekosistem ke ekosistem lain di dalam wilayah sendiri—yang terbagi menjadi Indonesia barat (Sumatra,

Kalimantan, Jawa, Bali), Kawasan Wallacea, dan Papua. Dalam praktiknya, introduksi SAI dapat terjadi secara alami maupun sebaliknya. Sebagian introduksi bisa terjadi melalui kegiatan perdagangan, transportasi domestik maupun internasional, juga budi daya. Sebetulnya, sejak awal peradaban manusia, ada bermacam-macam jenis flora dan fauna yang masuk ke Indonesia, digunakan sebagai komoditas hortikultura, perhiasan, dan peliharaan. Ada juga spesies yang masuk secara tak sengaja karena terbawa komoditas atau terbawa pengunjung ke Indonesia.

Berapa banyak sesungguhnya jumlah spesies invasif di Indonesia? Dalam suatu lokakarya LIPI pada 2014 dilaporkan ada 2.085 spesies asing dan/atau invasif. Dari jumlah itu, 1.731 di antaranya merupakan jenis asing, 350 adalah spesies asing invasif, dan empat sisanya belum diketahui statusnya (Arida *et al.* 2014). Global Invasive Species Database mencatat ada 179 spesies invasif di Indonesia, 72 di antaranya merupakan spesies pendatang. Berdasarkan daftar SAI dari Kementerian Lingkungan

Hidup dan Kehutanan (2013), SAI di Indonesia mencakup 53 spesies di sektor pertanian, 99 spesies di sektor kehutanan, dan 112 spesies di sektor maritim dan perikanan.

Jumlah spesies asing itu kemungkinan akan terus bertambah karena banyak yang baru dilaporkan belakangan. Masih berdasarkan laporan lokakarya LIPI pada 2014, beberapa contoh spesies asing invasif yang ada di Indonesia di antaranya adalah pengorok daun kentang, kutil dadap, kutu putih pepaya, dan kumbang jepang. Semuanya telah menyebar ke beberapa wilayah pertanian, di dataran tinggi maupun rendah. Mereka mampu merusak bermacam-macam tanaman sayuran.

Sejumlah introduksi ikan asing juga telah mengancam kelestarian ikan endemik atau lokal (Wargasasmita 2005). Contohnya ikan mujair di Waduk Selorejo, Jawa Timur; ikan nila di Danau Laut Tawar, Aceh; ikan louhan di Waduk Cirata, Jawa Barat, dan Waduk Kedungombo, Jawa Tengah, serta di danau-danau purba seperti Danau Matano dan Danau Towuti di Sulawesi Selatan. Contoh lain: introduksi ikan oskar di Waduk Jatiluhur, lobster air tawar

di Danau Maninjau, Sumatra Barat, dan ikan mas di Danau Ayamaru, Papua. Introduksi ikan baru terbukti menggerus populasi ikan asli, seperti ikan depik di Danau Laut Tawar dan ikan pelangi di Danau Ayamaru.

Cara SAI mengganggu, bahkan merusak biodiversitas adalah dengan mendesak spesies asli, memangsa, atau menularkan penyakit, sehingga fungsi dan keseimbangan ekosistemnya terganggu. Secara langsung, SAI memengaruhi keanekaragaman hayati lokal dan menjadi bagian dari ancaman-ancaman terbesar bagi habitat dan ekosistem (CBD 2002). Spesies asli atau lokal sering kalah bersaing, bahkan punah. Dampak sistemik bagi ekosistem tak bakal terelakkan manakala ada spesies yang punah.

Masalahnya adalah pemahaman terhadap fenomena SAI di berbagai ekosistem, juga interaksi berbagai spesies dalam suatu ekosistem, masih sangat sedikit. Karena itulahantisipasi terhadap dampak merugikan yang ditimbulkannya jadi nihil.

Salah satu SAI yang sangat besar efek buruknya bagi biodiversitas

fauna alami adalah kucing. Bahkan kucing termasuk ke dalam 100 SAI terburuk di dunia (ISSG 2000). Ini karena kucing merupakan predator yang sangat generalis (dapat memangsa berbagai jenis fauna).

Sedikitnya tercatat 248 spesies yang mencakup mamalia, burung, amfibia, reptilia, ikan, dan avertebrata, dapat menjadi makanan kucing (Bonnaud *et al.* 2011). Pemangsaan oleh kucing tersebut dapat berdampak signifikan terhadap spesies asli dibandingkan terhadap spesies pendatang di wilayah tertentu (Loss *et al.* 2013). Keberadaan kucing juga sangat menentukan penurunan populasi fauna endemik terutama mamalia, dan bertanggung jawab terhadap sedikitnya 14% kepunahan burung, mamalia, dan reptilia secara global, serta mengancam sedikitnya 8% spesies yang berstatus *critically endangered* (Medina *et al.* 2011).

Penelitian mengenai mikrob invasif, misalnya, masih sangat terbatas dibanding perihal flora dan fauna invasif. Mikrob invasif, seperti cendawan mikroskopis, bakteri, dan virus, yang juga ada di banyak kawasan di dunia dan umumnya bersifat patogen terhadap

organisme lain, lebih sulit dideteksi ketimbang organisme tingkat tinggi. Mikrob invasif berperan mengubah keseimbangan mikrobiom (*microbial zoo*) di akar tanaman, juga di dalam tanah. Dampak negatifnya langsung pada tanaman, bahkan pada wilayah pertanian tertentu (Coats & Rumpho 2014; Jacoby 2017). Bakteri yang bersifat baik, yang mampu meningkatkan daya tahan tanaman tertentu terhadap kekeringan, suhu panas, dan aneka penyakit, ikut pula terganggu. Hal serupa dapat terjadi di laut, dengan dampak buruk bagi terumbu karang serta habitat ikan.

Pencegahan terhadap masuknya SAI mesti dilakukan secara strategis dan bertumpu pada pengetahuan mendasar tentang proses atau rute masuknya SAI serta dampak ekologis dan ekonomis yang mungkin timbul. Sains dan teknologi terdepan perlu dikembangkan untuk upaya pencegahan dan mitigasi dampak SAI. Misalnya dengan penggunaan sensor akustik dan visual untuk mendeteksi dan memonitor SAI, khususnya di wilayah terpencil (Juanes 2018). Deteksi dini, bagaimanapun, merupakan pendekatan yang jauh lebih efisien.

## Ancaman terhadap Kesehatan dan Kehidupan Manusia

Gamblang terlihat betapa kerusakan lingkungan hidup dan biodiversitas akibat penambahan penduduk yang tak terkendali, eksploitasi berlebihan oleh manusia, dan perubahan iklim global merugikan kesehatan dan kehidupan manusia. Perubahan iklim, juga kian meningkatnya peluang terjadinya banjir, tanah longsor, dan kekeringan yang merusak sumber air bersih dan pangan, adalah dampak nyata kerusakan lingkungan yang

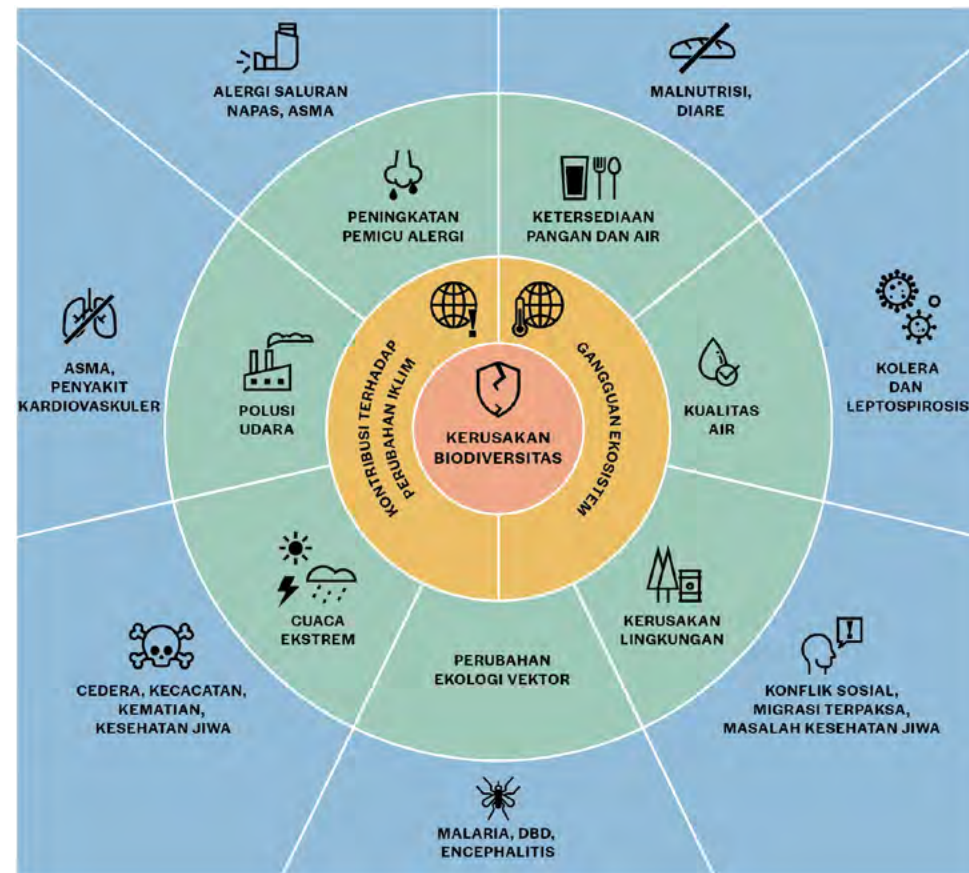
berpotensi mengancam kesehatan (Gambar 4.1).

Dalam kondisi rentan, kemungkinan-kemungkinan yang tak terhindarkan adalah terjadinya konflik sosial, pengungsian paksa, perubahan ekologi vektor, penyebaran kuman penyakit infeksi, alergi, dan gangguan mental (yang terkait bencana alam, konflik, status pengungsi). Semua dapat

menimbulkan penyakit, produktivitas menurun, kualitas hidup merosot, bahkan kematian. Banyak penyakit akibat kerusakan lingkungan hidup dan biodiversitas yang tergolong kronis, yang biaya pengobatan dan perawatannya sangat mahal.

Selain mengakibatkan berkurangnya atau bahkan punahnya sumber-sumber makanan, air, rusaknya biodiversitas di daratan maupun

di lautan juga melepaskan potensi pengembangan obat bagi kesehatan manusia. Banyak penelitian yang menyatakan bahwa biodiversitas di daratan maupun di lautan Indonesia sangat potensial menjadi bahan penemuan obat, biomaterial, dan kosmetik baru (Chasanah 2013; Sukara 2014; Tapilatu 2015). Rusak dan punahnya biodiversitas bakal menghalangi upaya penemuan obat, biomaterial, dan kosmetik.



Gambar 4.1 Dampak langsung dan tidak langsung akibat kerusakan biodiversitas.

Masalah lain yang merupakan dampak terbesar kerusakan lingkungan bagi kesehatan adalah terbukanya peluang penyebaran kuman dari hewan ke manusia. Fenomena ini dikenal sebagai zoonosis, yakni aneka penyakit infeksi kuman (bakteri, cendawan mikroskopis, parasit, virus) yang secara langsung maupun tak langsung atau melalui vektor menular dari hewan, khususnya yang bertulang belakang, ke manusia (Donohoe 2013; Myers 2013). Zoonosis dapat memicu munculnya penyakit-penyakit baru dan kembalinya penyakit-penyakit lama.

Kerusakan hutan mengganggu habitat banyak hewan liar dan memaksa mereka mendekati bahkan memasuki wilayah pemukiman manusia. Keadaan ini memperbesar peluang kontak antara hewan liar dengan manusia dan meningkatkan kemungkinan berpindahkannya kuman di dalam tubuh hewan liar ke dalam tubuh manusia, demikian pula sebaliknya. Salah satu fungsi hutan sebagai penyangga antara hewan liar dengan manusia menjadi hilang akibat deforestasi dan kondisi ini meningkatkan peluang terjadinya penyakit-penyakit zoonosis.

Harus disebut juga potensi hewan peliharaan sebagai sumber penularan penyakit zoonosis. Sebagian besar virus penyebab penyakit infeksi baru berasal dari binatang. Tingginya laju mutasi virus memudahkan virus berubah sehingga dapat menginfeksi manusia dan sulit diberantas. Peningkatan virulensinya, yakni kemampuan suatu patogen untuk menyebabkan penyakit, mempercepat pula penularan dari manusia ke manusia. Seperti yang terjadi di negara-negara lain, di Indonesia penyakit-penyakit zoonosis lama seperti leptospirosis, brucellosis, tuberkulosis, taeniasis, antraks, rabies, toksoplasmosis, hingga yang lebih baru seperti HIV, SARS (sindroma pernapasan akut berat), flu burung, MERS (sindroma pernapasan Timur Tengah), dan sebagainya telah mengakibatkan sakit, cacat, dan menurunnya produktivitas ekonomi serta kualitas hidup manusia, bahkan kematian (Myers 2013; Narrod 2012).

Penyebaran kuman dari hewan ke manusia dan dari manusia ke manusia berpeluang semakin cepat dan meluas. Hal ini tak terhindarkan bukan saja akibat makin buruknya kerusakan lingkungan hidup, bertambah parahnya perubahan iklim

global, dan menguatnya globalisasi, tapi juga mobilitas manusia yang kian tinggi. Tak mengherankan bila beberapa penyakit zoonosis seperti flu burung, SARS, MERS, dan HIV sempat atau masih menjadi wabah yang mendunia, melintasi batas-batas negara atau menjadi pandemi.

Penyakit-penyakit zoonosis hanya sebagian dari beraneka penyakit akibat kerusakan lingkungan hidup. Sebagian lain yang sangat boleh jadi muncul akibat banjir, kekeringan, tanah longsor, dan berbagai bencana lain adalah terganggunya kesehatan mental, seperti kecemasan dan depresi. Selain penyakit, yang juga tak terhindarkan dari bencana terkait degradasi ekologi dan pemanasan global adalah penurunan kualitas hidup, cacat, trauma, bahkan kematian (Case 2007; Measey 2010). Dari banjir dan kekeringan, muncul dampak ikutan berupa rusaknya ketersediaan atau menurunnya akses terhadap air bersih. Konsekuensinya adalah meningkatnya penyakit-penyakit infeksi kuman yang ditularkan melalui air, seperti diare, disentri, kolera, demam tifoid, dan leptospirosis.

Ketersediaan dan ketahanan pangan pun ikut terganggu. Banjir dan kekeringan bisa menimbulkan kerusakan lahan pertanian dan perikanan, selain menjadikan nelayan dan petani sakit, bahkan meninggal. Turunnya produktivitas dan timbulnya kerawanan pangan bisa memicu atau memperburuk kekurangan gizi dan penyakit infeksi.

Bencana lain yang tak kalah mencemaskan, yang berakibat sama buruknya, adalah kebakaran hutan dan lahan gambut. Penyebabnya bisa kekeringan, bisa pula kelalaian manusia. Selain semakin merusak lingkungan hidup, kebakaran hutan dan lahan gambut menyebarkan asap—bahkan sampai lintas negara—yang berpotensi menimbulkan bermacam-macam penyakit pernapasan dan alergi. Bukan hanya anak-anak dan orang lanjut usia yang akan terpapar risiko ini, orang dewasa tak terkecuali.

Di luar semua itu, ada dampak tak langsung dari perubahan iklim akibat kerusakan lingkungan hidup, yakni semakin menyebarnya penyakit-penyakit infeksi yang menular lewat vektor. Misalnya, malaria dan

demam berdarah dengue. Penyakit-penyakit ini, juga yang telah disebut lebih dulu, kian memperburuk situasi hidup orang-orang yang memang rentan karena kemiskinan

dan menghadapi keterbatasan akses terhadap kebutuhan-kebutuhan dasar seperti air bersih, pangan, layanan kesehatan, dan pendidikan yang layak.

## Konservasi Biodiversitas

Ekosistem yang sehat menopang pemenuhan kebutuhan dasar manusia dan berlangsungnya peradaban. Ekosistem dan keanekaragaman hayati yang sehat mencukupi persediaan udara dan air bersih, produksi makanan yang juga sehat, dan keindahan alam. Konservasi bukan hanya perlu untuk hewan atau tumbuhan yang kasatmata, melainkan juga bagi mikrob yang hanya bisa dilihat dengan bantuan alat di laboratorium.

Agar kehidupan manusia dan semua makhluk hidup di bumi berlanjut, kelestarian alam harus terus dijaga. Kebutuhan hidup yang menjadi alasan adanya kegiatan ekonomi memang berimplikasi adanya pemanfaatan sumber daya alam. Tapi hal ini memerlukan kebijaksanaan, perhitungan yang matang, dengan

menimbang dampak ekologis dan kerugian ekonomi jangka panjang. Pengetahuan menyeluruh dan lengkap tentang kawasan-kawasan ekologi yang penting, menurut pertimbangan ekonomi maupun fungsi identitas kawasan atau bahkan bangsa, di darat dan di laut, merupakan keniscayaan.

Penemuan spesies orang utan baru di Batang Toru, Sumatra Utara, bisa diambil sebagai contoh. Spesies yang mengundang perhatian dunia itu ditemukan dalam kondisi terancam punah (Reese 2017). Pada saat yang sama, di Sungai Batang Toru di lokasi penemuan itu, hendak dibangun bendungan yang bakal menjadi bagian dari pengoperasian pembangkit listrik bertenaga air. Masalahnya sangat jelas: bendungan di hutan primer akan mengisolasi

orang utan yang tersisa itu. Tak akan ada yang bisa menggantikan jasa ekosistem yang diperankan hutan beserta keanekaragaman hayatinya. Pertanyaan-pertanyaan yang mesti dijawab adalah bagaimana dapat menyeimbangkan kebutuhan ekonomi dengan daya dukung alam dan bagaimana sains dapat membantu mencari jalan keluar. Apakah pembangunan bendungan dapat dirancang sedemikian rupa sehingga keterkaitan antara hutan dan mobilitas orang utan bisa dipertahankan?

Sudah semestinya bila upaya konservasi biodiversitas tak boleh dilakukan sembarangan. Prinsip-prinsip dasar ini harus menjadi penunjangnya: (i) representatif/komprehensif, yaitu perlindungan keanekaragaman hayati yang tak terpusat hanya pada hal-hal menarik, tapi mewakili seluruh biodiversitas dan melibatkan semua pemangku kepentingan, seperti pemerintah, industri, masyarakat; (ii) bersifat efisien, biaya terjangkau; (iii) bersifat fleksibel, dapat dimodifikasi sesuai kondisi tempat, waktu, serta perkembangan sains dan teknologi terkini (Margules dan Sarkar 2007).

Di Indonesia, kebijakan dan upaya konservasi telah dijalankan. Pelaksanaannya menitikberatkan pada pelestarian biodiversitas hutan, di dalam kawasan hutan negara maupun di luarnya (Undang-Undang Nomor 5/1990); pengaturan konservasi alam di kawasan hutan negara (hutan lindung dan hutan konservasi), konservasi keanekaragaman hayati, dan perlindungan fungsi-fungsi penunjang kehidupan yang disediakan kawasan hutan (Undang-Undang Nomor 41/1999); serta Kawasan Suaka Alam serta Kawasan Pelestarian Alam (Peraturan Pemerintah RI Nomor 68/1998).

Kebijakan terkait konservasi di laut juga telah diadakan seperti Undang-Undang Nomor 5/1990 (Undang-Undang Konservasi), Undang-Undang Nomor 31/2004 jo 45/2009 (Undang-Undang Perikanan), dan Undang-Undang Nomor 27/2007 serta Undang-Undang Nomor 1/2014 (Undang-Undang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-pulau Kecil). Namun keterpaduan kebijakan dan implementasi dari kebijakan-kebijakan tersebut memang masih perlu diperkuat.

## Kearifan Lokal dalam Pemeliharaan Biodiversitas

Untuk dapat bertahan hidup, masyarakat adat di berbagai belahan dunia umumnya memiliki ketergantungan pada alam. Kedekatan dan ketergantungan ini menghasilkan perilaku, kebiasaan, dan budaya yang menghargai alam dengan segala isinya. Penghargaan ini mewujud dalam pengetahuan, perilaku, ritual, tradisi, dan aturan-aturan adat sebagai produk budaya.

Sebutan lazim untuk wujud-wujud penghargaan terhadap alam itu adalah kearifan lokal. Kearifan ini bisa bersifat fisik, nonfisik, harfiah, atau simbolis. Kearifan lokal dalam menjaga keanekaragaman hayati dan penyedia makanan dijalankan oleh masyarakat adat yang menggantungkan hidup dari sumber daya alam yang terdapat di darat maupun di laut (Kelbessa 2013).

Di beberapa daerah di Bali, misalnya, bentuk fisik kearifan lokal dalam memelihara alam dan sumber makanan terlihat antara lain dari tradisi persawahan terasering dan tersedianya hutan penyangga.

Kearifan lokal nonfisiknya berupa pengaturan jenis tanaman, air, dan siklus tanam, hingga organisasi adat yang mengelola lanskap alam, seperti yang terangkum dalam organisasi masyarakat bernama subak. Bentuk simbolis penghormatan pada alam dan penyedia makanan muncul dalam wujud pemberian kain berwarna pada pohon besar yang dikeramatkan. Simbol adat ini untuk mengingatkan orang bahwa pohon-pohon tersebut tidak dapat ditebang sembarangan. Selain itu terdapat peraturan tertulis (*awig-awig*) yang memuat kaidah-kaidah pedoman bertingkah laku dalam masyarakat, termasuk dalam berinteraksi dengan alam, misalnya hutan, dan mengandung sanksi-sanksi spesifik yang diterapkan secara tegas (Karidewi *et al.* 2012).

Pengetahuan lokal dalam memelihara sumber-sumber makanan di hutan juga bisa disaksikan di banyak komunitas adat lain. Masyarakat adat Baduy Dalam di Desa Kanekes Leuwidamar, Lebak, Banten, misalnya, sangat

menjaga keseimbangan alam. Mereka memiliki aturan ketat dalam menentukan batasan hutan, mana yang bisa digunakan untuk pertanian, mana yang dilindungi, dan mana yang sama sekali terlarang digunakan, bahkan sekadar untuk dilewati (Iswandono *et al.* 2016). Masyarakat adat Ammatoa di Desa Tana Toa, Kecamatan Kajang, Kabupaten Bulukumba, Sulawesi Selatan, punya aturan *pasang ri kajang*, pandangan dan cara hidup yang mengatur, di antaranya, bagaimana masyarakat secara bijak mengambil sumber kehidupan dari hutan secukupnya agar kehidupan manusia dan hutan terjaga (Hijjang 2014).

Suku Dayak Tunjung di Desa Linggang Melapeh, Kecamatan Linggang Bingung, Kabupaten Kutai Barat, Kalimantan Timur, lain lagi. Mereka memiliki kebiasaan ladang berpindah, dalam jangka waktu berbeda-beda, 2-4 tahun, sehingga tanah berpeluang memulihkan diri. Praktik perladangan semacam ini melestarikan tanah dan memungkinkan tanah subur kembali. Lingkungan pun bisa lebih lestari, sesuatu yang mustahil terjadi kalau

yang dilakukan adalah perambahan hutan (Siahaya *et al.* 2016).

Kebiasaan menanam aneka tanaman dan menggilir berbagai jenis tanaman di kebun dan ladang, yang dilakukan banyak masyarakat petani di berbagai daerah, menunjukkan kesesuaian dengan temuan-temuan sains terkini mengenai cara menjaga keseimbangan mikrob dan kekayaan mikrobiom dalam tanah (Jacoby *et al.* 2017).

Tradisi *sasi* di Maluku merupakan contoh yang berlaku dalam masyarakat yang hidupnya bertumpu pada laut. Tradisi ini melarang penangkapan ikan, mengambil kerang-kerangan jenis lola, batulaga, atau japing-japing secara berlebihan. Dengan *sasi*, orang tak boleh mengambil hasil laut sebelum waktu yang ditentukan. Inilah mekanisme budaya untuk memberi waktu kepada alam melestarikan diri sehingga mampu memberi dukungan pangan kepada manusia secara berkelanjutan. Sebagian masyarakat adat di Maluku, terutama di Maluku Tengah, Kota Tual, Maluku Tenggara, dan Maluku Barat, masih menerapkan *sasi* (Mony *et al.* dalam Armitage *et al.* 2017).

Terdapat pula tradisi lokal seperti *bau nyale* di kalangan Suku Sasak di Lombok, yaitu aneka ritual sebelum menangkap cacing laut sekali setahun di beberapa pantai di daerah tersebut. Kegiatan menangkap cacing laut beserta ritual-ritual yang mengiringinya sebagai penghormatan terhadap lingkungan laut beserta segenap isinya, telah menjadi daya tarik bagi banyak wisatawan untuk berkunjung ke Lombok. Tradisi lokal terkait dengan lingkungan laut telah menghasilkan keuntungan ekonomi bagi masyarakat dan pemerintah setempat. Pemanfaatan lain bersumber dari pengetahuan lokal yang telah dilakukan dari generasi ke generasi di berbagai tempat di Indonesia adalah penggunaan pewarna alam untuk wastra Nusantara.

Aneka kearifan budaya yang terkandung dalam tradisi-tradisi tersebut memang bersifat lokal. Tapi semuanya memuat prinsip dasar yang sama, yaitu penghormatan kepada alam dan pelestarian keanekaragaman hayati sebagai penopang kehidupan manusia, termasuk sebagai penyedia makanan (Armitage *et al.* 2017; Kelbessa 2013; Kothari 2008).

Pertambahan jumlah penduduk, peningkatan mobilitas manusia, dan kian menguatnya ekonomi menimbulkan banyak tantangan bagi keberlanjutan kearifan-kearifan lokal. Sains garda depan diperlukan sebagai pasangan kearifan lokal sekaligus untuk meninjau kembali keberadaannya dalam mengoptimalkan upaya menjaga biodiversitas dan lingkungan hidup.

Kearifan lokal merupakan sesuatu yang kompleks yang memiliki persamaan dan perbedaan dengan sains. Salah satu perbedaan yang utama adalah bahwa kearifan lokal bersifat *context-bound* sehingga tidak dengan mudah ditransfer dan digeneralisasi ke dalam konteks-konteks sosio-kultural yang lain. Sifat ini sangat perlu diperhatikan jika kearifan lokal diharapkan menjadi "penjaga" biodiversitas. Selain itu, perlu juga pemahaman bahwa kearifan lokal tidak selalu berkelanjutan atau berkeadilan sosial, supaya kita tidak secara buta mengidealisasikan kearifan lokal tanpa melihat dalam konteks nyata.

# V

## SAINS DAN TEKNOLOGI GARDA DEPAN UNTUK BIODIVERSITAS INDONESIA

*Hadiah Nobel Kedokteran pernah “mampir” di Indonesia pada 1929. Penghargaan bergengsi secepat itu dianugerahkan kepada Christiaan Eijkman, seorang dokter Belanda dan ahli patologi, melalui penemuan penyebab beri-beri akibat defisiensi vitamin B1. Walaupun pada saat itu Eijkman sudah kembali ke negeri Belanda, Hadiah Nobel tersebut diberikan berkat penelitian*

*yang berkesinambungan dalam meletakkan dasar-dasar sains vitamin modern selama lebih dari 25 tahun, di laboratorium yang didirikannya di Batavia (Jakarta). Laboratorium yang kemudian dikenal sebagai Eijkman Instituut tersebut kini menjelma sebagai lembaga penelitian biologi molekuler dan bioteknologi, Lembaga Biologi Molekuler Eijkman.*



Sains dan riset ilmiah dasar memang pernah cukup kuat mengakar di bumi Indonesia. Dan seperti penemuan teori evolusi serta peletakan landasan biogeografi oleh Alfred Russel Wallace satu abad sebelumnya, biodiversitas Indonesia yang kaya juga ikut menginspirasi lahirnya sains vitamin. Sains vitamin ini kemudian mendorong munculnya industri vitamin yang bernilai ekonomi sangat tinggi. Sayangnya, setelah era Eijkman, kondisi sosial politik menyebabkan kita kehilangan fokus terhadap penguatan sains dan teknologi.

Biodiversitas Indonesia yang kaya memang menyuguhkan banyak peluang. Megabiodiversitas di darat dan laut merupakan keunggulan komparatif yang seharusnya dapat menjadi modal dasar untuk memajukan Indonesia. Potensi kekayaan alam hayati ini sangat besar untuk dikembangkan dalam mendukung pembangunan ekonomi.

Alam seharusnya ditempatkan sebagai pusat pembangunan berkelanjutan yang dilakukan secara inklusif melibatkan semua elemen masyarakat. Karena itu diperlukan paradigma baru dan strategi yang tepat dalam mengelola dan memanfaatkan kekayaan megabiodiversitas dan ekosistemnya melalui topangan kuat ilmu pengetahuan, sains, dan teknologi.

Penguasaan sains dan teknologi yang mumpuni mutlak diperlukan untuk memanfaatkan keragaman hayati dengan tepat. Kejelian pemerintah dalam menentukan prioritas memegang peranan penting. Bab ini membahas aspek sains dan teknologi yang diperlukan dalam mengoptimalkan pengelolaan dan pemanfaatan megabiodiversitas Indonesia. Inilah upaya pemanfaatan sumber hayati untuk pembangunan ekonomi melalui sains dan inovasi teknologi sekaligus membangun budaya ilmiah yang kuat sebagai modal sebuah bangsa menjadi maju.

## Prioritas Sains dan Teknologi untuk Biodiversitas Indonesia

Indonesia sebenarnya memiliki sederet pilihan untuk menjadikan biodiversitas sebagai ujung tombak pembangunan. Pilihan tersebut ditentukan oleh tingkat ambisi kita dalam upaya menempatkan Indonesia unggul secara ekonomi sekaligus melestarikan alam dan serta memperkuat sains dan teknologi yang bersandar pada biodiversitas. Tiga bidang berikut menggambarkan contoh pilihan yang masing-masing mengandung konsekuensi yang berbeda dari segi waktu, kebutuhan investasi, pengetahuan yang diciptakan serta daya dongkrak bagi inovasi dan pengembangan teknologi. Dari tingkat ambisi sedang berupa pengembangan ekowisata sampai tingkat ambisi sangat tinggi yakni eksplorasi laut dalam (Gambar 5.1).





Tingkat ambisi	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
Dampak ekonomi	Besar	Sangat besar	Fundamental
Dampak perkembangan sains dan teknologi	Sedang	Sangat besar - dapat membawa kita ke kejayaan sains dan teknologi dunia	Fundamental

Gambar 5.1 Contoh prioritas nasional dan tingkat ambisi serta dampaknya terhadap ekonomi, sains, dan teknologi.

## Sains untuk Ekowisata dan Konservasi

Pemerintah terus menggalakkan upaya pelestarian alam melalui penetapan berbagai kawasan konservasi di darat maupun di laut. Tujuannya tentu untuk melindungi alam dan keanekaragaman hayati di dalamnya yang juga berdampak pada kesehatan dan kesejahteraan manusia. Kawasan konservasi yang efektif membutuhkan rancangan berdasarkan analisis masa depan alternatif dengan memperhatikan masalah perkembangan masa depan kawasan, ekonomi, sosial, dan kelestarian biodiversitas.

Salah satu strategi yang digunakan untuk menyelaraskan upaya pelestarian alam, konservasi, dan pembangunan ekonomi yang berkesinambungan yaitu melalui pendekatan ekowisata. Ekowisata adalah suatu konsep pariwisata yang mencerminkan wawasan lingkungan dan mengikuti sejumlah kaidah keseimbangan dan kelestarian alam. Menurut The International Ecotourism Society, ekowisata adalah perjalanan wisata bertanggung jawab ke alam yang memelihara lingkungan, menopang kehidupan

masyarakat lokal, serta melibatkan interpretasi dan edukasi. Edukasi yang dimaksud melibatkan staf dan wisatawan. Pendekatan ini dapat mencegah kerusakan alam, seperti deforestasi (lihat Brandt dan Buckley 2018). Pengembangan ekowisata yang inklusif dengan menyertakan masyarakat lokal, misalnya, dapat mengurangi pembalakan liar. Penduduk yang semula menebangi pohon secara liar dapat dilatih dan didorong beralih profesi menjadi pemandu wisata atau melakukan kegiatan ekonomi lain yang menunjang pariwisata. Keuntungan dari pariwisata dapat pula dimanfaatkan untuk pendanaan sains yang mendukung konservasi.

Idealnya, sebuah pusat konservasi dan ekowisata membutuhkan asupan data yang berkesinambungan sebagai pijakan untuk pengambilan keputusan. Karena itu, pusat konservasi dan ekowisata juga mutlak didukung dengan sains melalui riset strategis yang berkelanjutan. Kita dapat mengadopsi perkembangan informasi dan teknologi yang pesat saat ini untuk memperkuat upaya konservasi. Caranya dengan teknologi terkini dalam biologi konservasi,

pengumpulan data, analisis, serta pemodelan *big data* yang bersifat dinamis dan aktual.

Lebih jauh lagi, keunikan biodiversitas bumi Indonesia telah menginspirasi peletakan dasar teori-teori besar dunia, yaitu teori evolusi dan teori biogeografi serta botani tropis. Kekayaan alam kita beserta sejarahnya merupakan dua potensi besar untuk digabungkan menjadi tujuan wisata alam bersejarah (*eco-heritage tourism*). Wisata sejarah berbekal jejak AR Wallace dan Rumphius, misalnya, akan memiliki ceruk pasar wisatawan pencinta sejarah dan sains. Begitu pula kemasakan wisata sains ke sungai dan danau purba di Sulawesi Selatan, jejak Wallace di Ternate—dan seluruh titik di Indonesia yang pernah disinggahi Wallace—jejak Rumphius di Ambon, dan sebagainya. Kita membutuhkan inovasi dalam mengemas pariwisata Indonesia sehingga dapat berjalan secara berkesinambungan serta selaras dengan upaya pelestarian alam dan bernilai ekonomi tinggi.

## Sains untuk Penemuan Obat dan Bioprospeksi

“Produk alami adalah sumber penyembuhan yang tidak ternilai harganya. Aspirin misalnya, yang berasal dari kulit pohon willow, dan dasar molekuler dari agen kemoterapi antikanker, Taxol™, berasal dari kulit pohon pacific yew. Karena itu, menjadi masuk akal untuk berpikir bahwa kontribusi teks kuno dan manfaat dari pengobatan tradisional benar-benar dapat memengaruhi kesehatan masyarakat modern”—Brent Bauer, Mayo Clinic.

Alam beserta tanaman, hewan, dan mikroorganisme merupakan pustaka berjuta senyawa kimia yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan obat. Manusia telah memanfaatkan sumber kekayaan alami bahan obat sejak zaman prasejarah. Penemuan endapan serbuk sari pada situs pemakaman manusia Neanderthal di wilayah Kurdistan, Irak, pada 60 ribu tahun lalu menunjukkan bahwa kerabat dekat manusia modern itu bahkan telah menyadari manfaat bahan-bahan alami untuk menyembuhkan berbagai penyakit (Solecki 1975).

Salah satu pendekatan yang dilakukan para ilmuwan dunia saat ini untuk mengatasi penyakit seperti malaria yaitu dengan mengeksplorasi potensi produk alami (Mishra *et al.* 2017). Saat ini diperkirakan 25-50% obat di pasaran bersumber dari bahan alami. Hal ini menunjukkan bahwa bahan alami masih merupakan sumber yang mendominasi proses penemuan obat baru (Kingston 2011; Newman & Crag 2016). Kamus sumber produk alami (DNP; <http://dnp.chemnetbase.com>) memiliki lebih dari 214 ribu daftar sumber produk alami (Ji *et al.* 2009). Lembaga Market Research Consulting (MRC) menyatakan bahwa pasar global suplemen herbal mencapai 49,1 miliar dolar AS pada 2016 dan diperkirakan mencapai 86,7 miliar dolar AS pada 2022. Besarnya peluang ekonomi ini merupakan kesempatan bagi Indonesia untuk bersaing di pasar global. Untuk itu, diperlukan sumber daya manusia, fasilitas, pendanaan, serta kolaborasi nasional dan internasional yang baik. Usaha semacam itu sudah dimulai oleh laboratorium industri di Indonesia seperti Dexa Laboratories of Biomolecular Sciences, Dexa Medica.

Efek pengobatan bersumber bahan alami atau obat organik diperoleh melalui proses seleksi alam, proses koevolusi dengan komunitas biologis yang membentuknya. Tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme yang hidup dalam suatu komunitas biologis saling berinteraksi. Mereka secara alami merangkai berbagai macam bahan aktif yang memengaruhi satu sama lain dalam suatu keseimbangan ekologis. Semakin bervariasi komunitas biologisnya, semakin besar pula jumlah potensi dan ragam zat bioaktif yang dapat digunakan sebagai kandidat bahan obat. Bahan-bahan aktif yang diproduksi oleh satu organisme untuk melawan organisme lain, serta bahan aktif pembawa penyakit dapat secara sinergis memengaruhi proses biologis spesies sekitarnya yang memiliki susunan fisiologis dan biokimia yang serupa. Banyak zat kimia aktif dari tanaman yang telah berevolusi untuk membentengi dirinya terhadap serangan hewan pemakan tumbuhan. Manusia mengolah dan memanfaatkan zat kimia aktif tersebut misalnya sebagai obat pencahar, kardiotonik, dan pelemas otot (Ji *et al.* 2009).

### **Pencarian obat dari alam: pertemuan antara pengetahuan tradisional dan ilmu modern**

Kekayaan hayati kita merupakan potensi sumber daya ekonomi untuk penemuan obat dan bahan kosmetik atau biomaterial, misalnya untuk prostetika. Kekayaan alam Indonesia mencakup lebih dari 10% tanaman dunia, ribuan di antaranya digunakan untuk pengobatan penyakit. Dari jumlah tersebut, sekitar 900 telah diteliti untuk obat (Timmermans 2001).

Di tengah tantangan resistensi sejumlah agen penyakit, serta deraan berbagai penyakit metabolik, upaya gerakan pencarian obat dari bumi Indonesia adalah langkah investasi yang strategis. Kita dapat menimba pengalaman dari Cina dalam upaya penemuan obat baru antimalaria yang diawali dengan menggali naskah kuno yang kemudian berbuah Hadiah Nobel untuk Tu Youyou.

Indonesia juga dapat bersaing dengan Cina dalam khazanah ramuan kuno. Bumi Nusantara telah melahirkan sejumlah naskah kuno dalam lontar-lontar dan kitab-kitab sejak abad ke-II ketika kerajaan-

kerajaan besar kokoh berdiri di Nusantara. Kemudian pada masa VOC, Rumphius menulis *Herbarium Amboniense*. *Herbarium Amboniense* mendokumentasikan khasiat medis hampir 1.200 spesies asli bumi Nusantara yang dipublikasikan pada 1741. Dokumentasi Rumphius tersebut telah menjadi dasar eksplorasi bahan obat para peneliti di Mayo Clinic, Amerika Serikat. Mereka berinisiatif untuk menggali tulisan pengobatan kuno dan sejarah di samping metode verifikasi ilmiah, misalnya dengan mengkonfirmasi sifat antibakteri ekstrak pohon atun, yang dapat mengendalikan bakteri penyebab diare. Rumphius pernah menggambarkan khasiat pohon atun dalam tulisannya. Ditulis lebih dari tiga setengah abad lalu, teks tersebut sedang diperbarui bersamaan dengan tulisan sejarah obat dan naskah kuno lain yang mengarah pada upaya penemuan obat saat ini.

"Hasil temuan kami menunjukkan bahwa obat-obatan potensial dapat diidentifikasi dengan mencari tulisan herbal kuno. Meskipun kita tidak akan pernah tahu penyakit pasti yang diobati dengan kernel tumbuhan atun, kernel ini digambarkan hampir 400 tahun yang

lalu digunakan sebagai pengobatan untuk gejala yang diobati saat ini dengan antibiotik modern. Literatur saat ini tidak mendeskripsikan penggunaan pohon atun untuk mengobati penyakit yang serupa dengan disentri. Dengan mencari teks sejarah tentang obat herbal, kami telah mengidentifikasi obat baru yang potensial dengan sifat antibakteri dan telah mengembalikan pengetahuan yang hilang mengenai pengobatan tradisional." (Buenz *et al.* 2006).

Kini setelah lebih dari tiga setengah abad sejak dokumentasi Rumphius, bangsa kita belum juga menggali dan memanfaatkan petunjuk awal tersebut secara signifikan. Padahal laju kepunahan alam terus berlangsung, entah akibat ulah manusia maupun faktor alam. Negara perlu berinvestasi secara strategis dan lebih agresif untuk menggali potensi ini demi kesejahteraan bangsa dan umat manusia.

Jacobus Bontius, seorang dokter pelopor kedokteran tropis di Batavia, juga terkesan dengan pengobatan tradisional di Hindia Belanda. Ia mendokumentasikannya dalam buku empat volume, *De medicina Indorum*

dan *Historiae naturalis et medicae Indiae orientalis*. Demikian pula sejumlah naskah kuno dari beberapa suku di Indonesia, seperti *Lontara Pabbura* (Bugis) dan *Usada Buda Kecapi* (Bali). Terdapat paling sedikit delapan naskah kuno berbahasa Sunda, Jawa, Bali, dan Melayu yang memuat pengobatan dan ramuan tradisional (Nawangningrum 2004). Hal ini dapat menjadi petunjuk awal untuk gerakan mencari obat secara strategis dan sistematis dengan pendekatan sains modern. Semua memerlukan pemahaman mendasar tentang potensi obat dari megabiodiversitas kita serta ekosistem pendukungnya.

### **Bioprospeksi**

Bioprospeksi adalah pencarian dan pengembangan sumber obat baru atau produk lain yang bernilai ekonomis yang berasal dari zat bioaktif tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme. Kegiatan ini melibatkan eksplorasi jenis biodiversitas untuk sumber daya biologis yang bernilai sosial dan ekonomi bagi berbagai industri, terutama industri farmasi (Beattie *et al.* 2005). Ketertarikan terhadap bioprospeksi telah meningkat seiring

melesatnya permintaan obat baru untuk menggantikan obat-obatan yang tersedia di pasaran.

Resistensi bakteri terhadap antibiotik kini merupakan salah satu masalah utama dalam upaya pemberantasan penyakit menular dan perawatan medis di dunia. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) menyebut resistensi antibiotik sebagai salah satu ancaman terbesar terhadap kesehatan global, keamanan pangan, dan pembangunan. Pada 2017, WHO menerbitkan daftar prioritas global berisi 12 bakteri resisten antibiotik. Terdapat semakin banyak penyakit yang telah berevolusi menjadi kebal atau resisten terhadap obat yang sudah ada. Kondisi ini mendorong munculnya kebutuhan untuk memiliki persediaan obat baru. Melalui bioprospeksi, kebutuhan terhadap obat baru tersebut dapat segera dipenuhi.

Apakah kegiatan bioprospeksi didasarkan pada pengetahuan obat-obat tradisional atau tidak, tetap diperlukan indikasi dini untuk mengembangkan obat modern.

Pengembangan obat modern dari bahan alami memerlukan isolasi senyawa atau zat aktif yang bermanfaat di antara jutaan molekul dapat dipercepat dengan pendekatan penapisan massal tingkat tinggi. Dalam satu dekade terakhir, jumlah molekul target untuk penapisan massal berdaya tinggi yang dipublikasikan sudah meningkat pesat. Tantangan terbesar saat ini bukan lagi mencari molekul target, melainkan mengidentifikasi target yang berpotensi paling besar untuk mendapatkan bakal obat (AIPi 2016).

Perkembangan sains dan teknologi telah memungkinkan untuk memproduksi obat dari bahan-bahan kimia sintetis. Obat berbasis sintetis terinspirasi dari agen-agen yang ditemukan di alam dengan cara meniru sifat biokimia dan kimiawinya. Berbagai kandidat obat populer, seperti capsaicin dan curcumin datang dari peningkatan fokus penelitian terhadap agen bersumber alami (Ji *et al.* 2009; Ji & Zhang 2008; Corson & Crews 2007).

### **Genomik, metagenomik, dan mikrobiom**

Bidang genomik berkembang cukup pesat sejak teknologi pengurutan atau sekuens genom—kode genetik—organisme menjadi jauh lebih cepat. Harganya pun semakin terjangkau. Pada dekade 1990-an, memetakan urutan gen manusia membutuhkan dana 3 miliar dolar Amerika Serikat dan waktu lebih dari satu dasawarsa untuk merampungkan proyek tersebut. Saat ini sekuens genom manusia dapat dilakukan seharga 1.000 dolar Amerika Serikat atau sekitar 15 juta rupiah. Bahkan harganya diharapkan dapat ditekan hingga sepersepuluhnya dengan proses pengurutan gen tak sampai satu jam (Check-Hayden 2014).

Perkembangan teknologi telah banyak membantu para ilmuwan untuk meneliti biodiversitas secara lebih detail. Dengan teknologi pengindraan jauh dan komputasi, ilmuwan bisa memperoleh beragam observasi skala *big data*. Terobosan teknologi gabungan ilmu biologi molekuler, genetika, dan informatika yang melandasi bidang genomik telah memungkinkan para ilmuwan untuk melakukan observasi

biodiversitas dalam bentuk konten genetika dari level individu, bahkan level sel tunggal, hingga level populasi.

Perkembangan ini memicu melesatnya bidang bioinformatika yang memanfaatkan kemajuan teknologi komputasi dan pendekatan kuantitatif-matematis-statistik untuk memproses data genom yang terus membanjiri dari berbagai spesies organisme. Data yang muncul lebih beragam, yang memuat berbagai rangkaian dan interaksi molekul dalam organisme. Di sini kita mendapati semakin banyak parameter yang dapat digunakan untuk mengukur keberagaman organisme berdasarkan pengetahuan kita terhadap sifat-sifatnya yang makin menyeluruh.

Dengan pengurutan genom yang lebih murah dan mudah, kemampuan untuk mendapati genom pada level populasi juga mulai berkembang pesat. Metagenomik adalah analisis konten genom organisme langsung dari lingkungan tempat mereka berada dalam skala ekologis populasi. Metagenomik memungkinkan untuk memetakan biodiversitas pada level interaksi dinamis kumpulan

organisme dalam lingkungannya dan bagaimana interaksi ini dapat memengaruhi keseimbangan ekosistemnya. Perkembangan pesat terjadi pada pemetaan genom mikroba dalam berbagai sistem komunitas ekologi mikroba yang hidup dalam tubuh manusia, dalam tanah, tubuh tanaman, hingga mikroba ekologi laut (National Research Council 2007; Thomas *et al.* 2012). Metagenomik juga memungkinkan bioprospeksi gen-gen potensial mikroba dari alam tanpa melalui kultur.

Perkembangan metagenomik dalam memahami biodiversitas organisme dalam tubuh manusia adalah salah satu potensi terobosan aplikatif bidang kesehatan yang sedang banyak dieksplorasi saat ini. Mikroba yang berada dalam tubuh, terutama dalam saluran cerna, ternyata berperan penting dalam menentukan status kesehatan. Kumpulan makhluk renik dalam tubuh—dikenal sebagai mikrobiom—bahkan dianggap sebagai genom kedua manusia. Hasil riset menunjukkan bahwa mikrobiom sama kompleks dan berpengaruhnya dengan genom kita sendiri, yang memiliki andil dalam berbagai sindrom atau penyakit, seperti

obesitas, diabetes, penyakit jantung hingga kelainan mental.

Komunitas mikroba terbanyak dalam tubuh manusia berada dalam usus. Ada lebih dari 1.000 spesies mikroba usus yang hidup di dalamnya (Wang *et al.* 2015). Makanan dan latar belakang genetik serta mikroba yang hidup dalam tubuh ternyata berinteraksi dalam menentukan kesehatan kita. Komunitas mikroba ini memiliki peran penting dalam melindungi tubuh manusia dari serangan mikroba pembawa penyakit, memodulasi sistem kekebalan tubuh, mengatur metabolisme, bahkan berfungsi secara kolektif sebagai organ produksi hormon. Lebih dari 100 juta sel saraf terletak dalam usus yang berinteraksi dengan komunitas mikroba ini, bahkan memengaruhi cara kita berpikir (Hadzhazy 2010).

Berbagai rangkaian hasil penelitian tentang mikroba dalam tubuh kita menunjukkan adanya hubungan erat antara komposisi jenis mikroba dalam usus dengan kesehatan mental. Perubahan komunitas ekologis mikrobiom usus berhubungan dengan berbagai penyakit neuropsikiatri, seperti autisme, schizophrenia, dan

gangguan imunitas pada tubuh (Dickerson *et al.* 2017). Dari sini diharapkan pengetahuan tentang biodiversitas mikroba dapat diterapkan dalam upaya meningkatkan kesehatan serta untuk berbagai inovasi biomedis. Budaya makan dengan diet yang berbeda-beda pada tiap kelompok etnis dan keragaman kuliner Indonesia mungkin dapat memengaruhi populasi mikrobiom. Indonesia merupakan laboratorium manusia yang ideal untuk memahami interaksi pola makan dengan mikrobiom. Misalnya, bagaimana puasa Senin-Kamis atau budaya putih dalam tradisi Jawa mungkin memengaruhi populasi mikrobiom.

### **Tantangan sosial dan ekonomi dalam penemuan obat dan bioprospeksi**

Bioprospeksi memang sangat penting, namun ia harus diatur sehingga menghindarkan kita dari eksploitasi berlebihan terhadap sumber daya alam, serta tetap memberi penghargaan terhadap pengetahuan lokal. Masyarakat lokal tempat sumber bahan alami ditemukan harus merasakan manfaatnya secara ekonomi, serta berpartisipasi aktif agar lingkungannya tetap terjaga. Idealnya, proyek bioprospeksi

yang dikelola dengan baik tidak hanya memberi pendapatan bagi masyarakat adat, tempat sumber daya alam berada, namun juga insentif terhadap upaya untuk melestarikan ekologi alam yang menyimpannya. Dengan demikian, kita dapat memiliki sumber berkelanjutan untuk kepentingan bersama (Timmermans 2001).

### **Sains untuk Eksplorasi Laut Dalam: Kehidupan di Lingkungan yang Ekstrem**

Ekspedisi Snellius (1929-1930) pada era pemerintah Hindia Belanda dan Ekspedisi Snellius II pada 1989 berhasil memetakan topografi dasar laut, khususnya wilayah Indonesia Timur. Berdasarkan ekspedisi tersebut, kita mengetahui bahwa wilayah antara Paparan Sunda dan Paparan Sahul merupakan perairan laut dalam, termasuk di sekitar Pulau Sulawesi, Halmahera, Seram, Buru, Aru, serta deretan Kepulauan Sunda Kecil. Di sana sedikitnya terdapat 26 basin dan palung, yang terdalam adalah Palung Weber dengan kedalaman mencapai 7.440 meter.

Fakta ilmiah yang menarik sekaligus ironis adalah laut dalam sebenarnya

menyimpan misteri besar yang belum banyak terpecahkan. Laut dalam rupanya jauh lebih asing daripada antariksa, yang berjarak ribuan kilometer dari bumi. Para ilmuwan konon memiliki pengetahuan yang jauh lebih baik tentang permukaan Mars atau bulan ketimbang laut dalam. Eksplorasi laut dalam yang masih sangat terbatas membuat manusia baru mengetahui sekitar 1% dari seluruh kekayaan organisme yang tinggal di gelapnya samudra.

Para ilmuwan belum sepenuhnya memahami hewan dan organisme apa saja yang bisa bertahan di lingkungan ekstrem laut dalam. Kadar oksigen super tipis, suhu ekstra rendah, tekanan ekstrem mematikan, kadar garam tinggi, derajat keasaman tinggi, hening, dan tanpa cahaya. Meski kondisi laut dalam gelap abadi, ternyata masih ditemukan berbagai jenis organisme, termasuk ikan. Meski kondisi laut dalam gelap abadi, namun masih ditemukan berbagai jenis organisme, termasuk ikan.

Salah satu penemuan yang cukup menghebohkan adalah penemuan ikan purba yang sudah dianggap punah, yakni *Coelacanth* (*Laminaria*

*chalumnae*) di Laut Sulawesi. Ikan ini bisa hidup sampai kedalaman 700 meter di bawah permukaan laut. Bagaimana organisme ini sanggup beradaptasi di lingkungan yang serba ekstrem? Bisakah jurus adaptasi organisme yang hidup di dasar laut menjadi inspirasi manusia untuk memahami mekanisme adaptasi? Bagaimana pengetahuan mengenai kehidupan laut dalam dapat melahirkan inovasi teknologi dan industri baru yang tidak terpikirkan sebelumnya. Misalnya, pengetahuan mengenai DNA polimerase yang memunculkan teknologi Polymerase Chain Reaction (PCR) yang telah melahirkan industri bioteknologi abad ke-21 yang luar biasa.

Wilayah Indonesia merupakan lokasi pertemuan lempeng Eurasia, Indo-Australia, Pasifik, dan Filipina. Kondisi ini sangat memungkinkan terdapat banyak lokasi celah hidrotermal serta beberapa gunung api bawah laut. Dengan kehidupan organisme laut dalam yang anaerobik dan tanpa cahaya, juga sangat dipengaruhi oleh hidrogen sulfat beracun serta kadar garam tinggi, maka pemahaman terhadap ekosistem di sekitar lubang hidrotermal dapat memberikan

informasi mengenai proses adaptasi kehidupan dalam kondisi ekstrem. Namun, observasi tentang hal ini dan kegunaannya bagi kehidupan manusia masih sangat sedikit.

Keberadaan gunung laut juga sangat menjanjikan karena proses sirkulasi dan turbulensi di sekitarnya. Kondisi ini sangat menunjang kehidupan dan membuatnya kaya spesies makrofauna. Eksplorasi sumber daya hayati di sekitar gunung laut sangat mahal dan memerlukan teknologi tinggi. Namun, kemajuan teknologi ikutan dan hasilnya juga menjanjikan, setara dengan kemajuan ketika manusia

memutuskan untuk menyambangi bulan.

Terdapat potensi lain dari laut dalam seperti minyak dan gas bumi, sumber energi listrik melalui Ocean Thermal Energy Conversion/OTEC, cadangan mineral seperti emas, timah, cadangan air mineral masa depan, serta produksi garam berkualitas tinggi. Semua ini bermanfaat bagi pengembangan ekonomi masa depan bangsa Indonesia. Namun selayaknya kita berhati-hati dalam pengelolaannya. Jangan sampai eksploitasi laut merusak alam seperti yang telah terjadi di darat.

## Pengembangan Sains dan Teknologi untuk Mendukung Biodiversitas Indonesia

Laut dalam Indonesia memiliki potensi sumber daya hayati dan nonhayati yang sangat besar. Namun, minimnya informasi dan pengembangan sains laut membuat pengembangan potensinya sangat kurang. Bagaimana kita dapat mengembangkan kemampuan untuk

mendorong potensi perekonomian dari potensi laut dalam tersebut?

Sejumlah aspek mendasar pengembangan sains dan teknologi garda depan terkait biodiversitas beserta potensinya bagi inovasi ekonomi memerlukan dukungan

secara lebih umum, misalnya bioenergi, potensi mikrob, berguru pada alam melalui biomimikri, *big data*, serta penguatan bank spesimen nasional.

### Sains untuk Bioenergi

Pencemaran lingkungan dan ancaman kesehatan akibat pembakaran bahan bakar fosil, berkurangnya sumber energi fosil disertai dengan tingginya kebutuhan energi mendorong pemenuhan kebutuhan akan sumber energi alternatif terbarukan yang ramah lingkungan dan ekonomis. Peningkatan karbondioksida (CO<sub>2</sub>) sejak Revolusi Industri terutama berasal dari hasil pembakaran bahan bakar fosil (65%) dan alih guna lahan (deforestasi, 11%) (IPCC 2014). Peningkatan CO<sub>2</sub> di atmosfer berkontribusi terhadap pemanasan global dan perubahan iklim yang mengancam kehidupan di bumi. Solusinya adalah penggunaan bahan bakar yang tak menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> dan melakukan reforestasi.

Posisi geografis dan kondisi alam Indonesia kaya akan potensi beragam jenis energi bersih dan terbarukan seperti energi matahari, angin,

panas bumi, dan bioenergi. Bioenergi adalah sumber energi yang berasal dari produk biologis, baik dari limbah maupun dari sumber biologis lain yang berkelanjutan seperti biomassa, biodiesel, bioetanol, dan biogas. Pengembangan bioenergi harus mempertimbangkan penghargaan terhadap habitat alam dan keragaman hayati di dalamnya termasuk kesejahteraan hewan, penggunaan lahan yang tidak bersaing atau mengancam produksi pangan, pemanfaatan lokal dengan transportasi minimal, serta tidak berdampak buruk terhadap kualitas udara.

Idealnya, kita memerlukan sumber bioenergi yang tak menghasilkan emisi CO<sub>2</sub>. Satu-satunya jenis mikrob yang mampu menghasilkan energi bersih dengan produk oksigen dan limbah berupa air adalah sianobakteri atau alga biru-hijau yang menghasilkan energi melalui fotosintesis. Mikroalga merupakan sumber ideal energi terbarukan karena menggunakan air dan cahaya matahari yang melimpah dan menghasilkan oksigen dan hidrogen (H<sub>2</sub>) serta pertumbuhannya cepat. Hidrogen tersebut dapat dimanfaatkan sebagai sumber

energi untuk menghasilkan listrik dengan efisiensi tinggi. Tak kalah penting adalah polusinya minimal karena limbah dihasilkan berupa air (H<sub>2</sub>O). Pemanfaatan mikroalga merupakan tindakan *climate positive* dan menghasilkan bahan bakar bio yang karbon-netral seperti bioH<sub>2</sub>, biogas, bioethanol, biodiesel, and bio-oil yang lebih efisien dan tanpa berkompetisi dengan bahan pangan (Chen *et al.* 2017, Dwi Susilaningsih *et al.* 2014, Hadiyanto *et al.* 2012). Namun demikian, pengembangan mikroalga sebagai sumber energi dalam skala besar masih dihadang oleh beberapa masalah, seperti rendahnya efisiensi konversi biomassa, invasi mikroorganisme dari luar, mahal dan terbatasnya zat hara yang diperlukan untuk kultivasi, serta panen yang berbiaya mahal. Salah satu jalan keluar yang strategis adalah menggabungkan produksi biofuel dengan pengolahan limbah.

Pengembangan teknologi berbasis mikroalga dengan sistem fotosintesis dan bersifat karbon-netral akan berperan signifikan dalam strategi mitigasi CO<sub>2</sub> di masa depan (Chen *et al.* 2017). Dibutuhkan kira-kira 1% permukaan laut global (2,3 kali luas

Tasmania atau 3,1 kali luas daratan Inggris) untuk dapat menggantikan 19% dari konsumsi bahan bakar fosil dunia saat ini (Sakurai *et al.* 2015). Namun dengan teknologi rekayasa, keterbatasan lahan untuk kultivasi dapat diatasi. Mikroalga yang dapat tumbuh di berbagai jenis ekosistem, termasuk yang ekstrem dan berkadar garam tinggi justru merupakan kekuatan.

Pengembangan bioenergi di Indonesia dapat mengurangi ketergantungan impor bahan bakar minyak, mendukung iklim yang lebih baik, serta memanfaatkan limbah, termasuk limbah sawit. Energi biomassa dapat dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan swasembada energi lokal dengan memanfaatkan limbah organik. Namun untuk pemanfaatan dalam skala besar dibutuhkan material organik yang juga besar serta lahan yang luas sehingga dapat menyebabkan deforestasi. Indonesia dengan iklim tropis sesungguhnya memiliki peluang besar untuk mengembangkan bioenergi bersih dari mikroalga.

Desakan kebutuhan energi alternatif terbarukan yang ramah

lingkungan merupakan pekerjaan rumah yang harus segera dimulai secara substansial. Energi merupakan kebutuhan primer dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dapat berujung pada krisis ekonomi dan lingkungan, serta dampak ikutannya seperti gejala politik bahkan perang. Oleh karena itu, kini saatnya Indonesia secara agresif mengambil langkah strategis untuk membangun sumber energi bersih terbarukan. Dalam COP21 (Sesi ke-21 dari Conference of the Parties, Paris, 2015) negara-negara peserta berkomitmen untuk secara signifikan mengurangi emisi CO<sub>2</sub> mereka, seperti Inggris dan Cina (Chen *et al.* 2017). Indonesia dengan penduduk terbesar keempat dunia juga bertekad untuk berkontribusi dalam mengurangi emisi CO<sub>2</sub> secara signifikan.

### **Eksplorasi Potensi Ekonomi Mikrob**

*"Kehidupan takkan mungkin berkelanjutan tanpa kehadiran mikrob" - Louis Pasteur*

Pernyataan Pasteur dengan gamblang menggambarkan betapa vitalnya peran mikrob dalam

menopang kehidupan manusia. Mikrob meliputi bakteri, cendawan mikroskopis, virus, arkea, dan mikroalga. Makhluk hidup bersel jamak alias makroorganisme, seperti manusia, secara teoretis dapat saja hidup tanpa kehadiran mikrob. Namun apakah ia mampu bertahan hidup dalam ruang steril agar bebas mikrob atau gnotobiotik? Bakteri misalnya, diperkirakan berjumlah lima juta triliun triliun di planet bumi (angka lima dengan 30 angka nol di belakangnya!) (Whitman *et al.* 1998). Fantastis! Dengan keanekaragaman seperti itu, mikrob sangat berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem bumi.

Pengaruh mikrob terhadap biosfer sungguh vital. Mereka memiliki peran fundamental dalam proses ekologis, seperti siklus biogeokimia di hampir semua lingkungan planet, termasuk di lingkungan ekstrem. Mikrob juga berperan penting dalam rantai makanan, serta menjaga hubungan vital antara mereka dan dengan organisme unggul (Hunter-Cevera 1998), mengurai sampah dan limbah, menjaga kesuburan tanah, hingga membersihkan limbah tumpahan minyak di lepas pantai

(bioremediasi). Mikrob ditemukan di mana-mana, dari lingkungan beku dan danau asam, lubang hidrotermal di dasar samudra terdalam, di ketinggian atmosfer, kedalaman laut, hingga pada usus kecil manusia.

Inventarisasi mikrob Indonesia dimulai sejak zaman Hindia Belanda oleh seorang ahli botani bernama Melchior Treub (1851-1910), yang juga menjabat sebagai Direktur Land's Plantentuin atau Kebun Raya Bogor selama 30 tahun. Pada zaman itu, ilmuwan-ilmuwan dunia terutama dari Eropa melakukan riset keanekaragaman hayati tropis bumi Hindia, termasuk keanekaragaman mikrob di laboratorium Treub. Lima dasawarsa kemudian pada 1959, kegiatan riset ini dibuka kembali atas dukungan pemerintah. Dukungan Presiden Sukarno terhadap riset dasar cukup signifikan dan memungkinkan diaktifkannya kembali riset mikrob pada 1960. Hingga kini, upaya para peneliti Indonesia, terutama di LIPI, terus berkembang. Salah satu capaian terpentingnya adalah didirikannya Pusat Koleksi Kultur Indonesia bernama Indonesian Culture Collection (InaCC), yang diakui oleh World Federation of

Culture Collection/WFCC (Sukara & Lisdiyanti 2016).

Potensi mikrob termasuk bakteri, jamur, dan virus di bumi Nusantara belum banyak dieksplorasi untuk menunjang ekonomi yang berkelanjutan. Masih sangat banyak jasad renik yang belum diidentifikasi dan belum dipahami fungsinya. Diperkirakan tak lebih dari 10% spesies mikrob yang telah diketahui, tergantung jenis habitat yang diteliti. Kegiatan koleksi mikrob kita pun masih lebih banyak pada tingkat identifikasi dan karakterisasi. Padahal, penemuan berbagai spesies mikrob baru, bahkan genus baru dari taksa mikrob yang penting terus dilaporkan oleh ilmuwan Indonesia. Kita lebih terkesan dengan beberapa mikrob yang bersifat patogen dan berbahaya bagi manusia, sedangkan mayoritas mikrob bersifat komensal dan tidak patogenik, termasuk yang berada di dalam tubuh manusia. Mampukah kita memanfaatkan keragaman mikrob tersebut untuk meningkatkan derajat kesehatan manusia dan lingkungan Indonesia?

Keragaman mikrob dengan potensi pemanfaatannya merupakan

aset yang sering kali terabaikan. Untuk pemanfaatan mikrob secara berkelanjutan diperlukan valuasi sumber daya genetik yang mencakup biaya mendapatkannya dari alam dan pemeliharannya. Biaya untuk mendapatkan satu galur mikroorganisme di Jerman mencapai 10.754 euro atau 5.042 euro di India (Overmann 2015).

Penemuan bakteri pemakan plastik PET (polyethylene terephthalate) *Ideonella sakaiensis* di tumpukan sampah Jepang pada 2016 merupakan suatu capaian bermakna dalam upaya daur ulang plastik PET (Yoshida *et al.* 2016). Selanjutnya, penemuan enzim kunci PETase yang lebih baik dalam mendegradasi plastik dalam hitungan hari, bukan ratusan tahun, untuk proses alamiah pun membawa harapan baru (Joo *et al.* 2018; Liu *et al.* 2018; Austin *et al.* 2018). Demikian pula bioremediasi Kali Sentiong dengan bakteri merupakan contoh penting lain. Sementara potensi mikrob untuk mengubah struktur tanah gambut agar tak lagi mudah terbakar juga memerlukan riset ilmiah mendasar sehingga dapat diaplikasikan, dan kebakaran gambut tak lagi menyebabkan kerugian ekonomi serta ancaman kesehatan.

Penemuan enzim kunci yang dipakai dalam pengurutan rantai DNA *Taq polimerase* dari mikrob tahan panas *Thermophilus aquaticus* di lingkungan ekstrem telah mendorong industri bioteknologi dan kedokteran diagnostik berekonomi tinggi disertai kemajuan di berbagai bidang. Riset-riset mendasar yang berkesinambungan dan terarah untuk mengeksplorasi sifat-sifat bakteri seperti ini dapat membantu menjawab berbagai tantangan dan menghasilkan inovasi serta industri baru yang mungkin tidak terpikirkan sebelumnya.

Seperti pada usus manusia, komunitas mikrobiom tanah juga memberikan layanan vital pada ekosistem kunci yang fundamental dalam kehidupan di bumi termasuk siklus karbon dan unsur hara serta menopang pertumbuhan tanaman (Jansson dan Hormockel 2018). Kemajuan teknologi pengurutan genom telah memetakan genom dari berbagai populasi mikrob tanah serta memprediksi fungsinya (*metagenomics*). Namun, tantangan terbesarnya adalah bagaimana memahami fungsi berbagai gen dari mikrob tersebut dalam kondisi nyata, bukan lagi pada tataran

prediksi, yang dikenal dengan istilah *metaphenomics*. Keberadaan berbagai macam mikrob tanah potensial yang bermanfaat terancam oleh degradasi tanah, buruknya praktik pengolahan dan pemanfaatan tanah, serta perubahan iklim (Jansson dan Hormockel 2018). Penting untuk mengetahui cara mikrob bekerja di alam dan memahami sifat-sifat mendasarnya sehingga dapat memberikan manfaat yang optimal.

Mikrob berperan penting pula dalam pengawetan makanan, baik secara langsung melalui proses fermentasi, maupun produk enzim dari mikrob untuk fermentasi produk pangan. Kebutuhan industri pangan terhadap enzim semakin meningkat sementara ketersediaannya sangat terbatas. Pada 2020, bisnis kebutuhan enzim dunia diperkirakan mencapai 6 miliar dolar Amerika Serikat atau sekitar 91,3 triliun rupiah. Hampir separuhnya berasal dari industri untuk makanan dan minuman (Miguel *et al.* 2013). Peran mikrob sangat besar sebagai penghasil enzim-enzim fermentasi. Keragaman mikrob dalam suatu ekosistem dapat menjadi suatu peluang tersendiri untuk memenuhi kebutuhan industri pangan terhadap enzim-enzim tersebut. Mikroorganisme

dapat dimanfaatkan dalam produk yang sehat. Bakteri dan cendawan, misalnya, dapat memberi manfaat pada produk makanan, seperti probiotik dan serat makanan. Indonesia dengan iklim tropis memiliki kelimpahan mikrob di darat, laut, dan di tempat-tempat esktrim. Pemahaman mendasar tentang sifat dan kemampuan bakteri melalui riset mendasar dapat membantu menemukan solusi berbagai tantangan, dari menangkal polusi tumpahan minyak dan sampah plastik hingga ketahanan pangan.

### **Biomimikri: Alam Takambang Jadi Guru—Inspirasi Alam untuk Inovasi Teknologi**

*Alam bekerja dengan cahaya matahari  
Alam hanya memakai energi sesuai  
kebutuhan*

*Alam menyesuaikan bentuk dengan  
fungsi*

*Alam mendaur ulang segalanya*

*Alam menghargai kerja sama*

*Alam bermodalkan keragaman*

*Alam memanfaatkan keahlian lokal*

*Alam mencegah kemubaziran*

*Alam mengandalkan kekuatan dari  
keterbatasan.*

(Janine M. Benyus, *Biomimicry*, 1998)

Alam sejatinya senantiasa menawarkan solusi atas berbagai tantangan dan keterbatasan yang dihadapi manusia. Tantangan fisik yang kita hadapi—keterbatasan pangan, air, ruang, dan tempat tinggal—merupakan tantangan yang juga dihadapi makhluk lain di bumi. Mikrob, hewan, dan tumbuhan melakukan apa yang diperlukan untuk bertahan hidup, tetapi mereka melakukannya tanpa merusak, tanpa minyak bumi yang mencemari, tanpa menghasilkan polusi, apalagi menggadaikan masa depan generasi berikutnya. Semua inovasi manusia telah tersedia di alam dalam bentuk yang lebih anggun tanpa merusak bumi.

Hasrat manusia untuk dapat terbang seperti burung telah mendorong terciptanya pesawat terbang. Sketsa mesin terbang Leonardo da Vinci (1452-1519) merupakan bukti nyata bagaimana manusia terilhami alam meskipun mesin da Vinci belum berhasil terbang. Empat abad kemudian, Wright bersaudara (1867-1948) secara cermat mengamati sayap burung elang dan membuat kapal terbang yang dapat membawa manusia terbang untuk pertama kali pada 1903. Baru pada abad

selanjutnya, kapal terbang dapat melesat jauh lebih cepat, lebih stabil, dan lebih aerodinamis.

Otto Schmitt adalah orang pertama yang mengenalkan istilah biomimetik pada 1957, sebagai persinggungan biologi dan teknologi. Istilah serupa lainnya, bionik, diperkenalkan oleh Jack E. Steele, seorang ilmuwan NASA, pada 1960. Janine M. Benyus memperkenalkan istilah biomimikri dalam *Biomimicry* (1998), sebagai pendekatan baru pengembangan teknologi dengan ilham dari alam. Benyus kemudian menjadi salah satu pendiri Biomimicry 3.8, media untuk bertukar ide dan konsep biomimikri serta membangun komunikasi dan kerja sama lintas disiplin antarilmuwan, peneliti, perekayasa, pebisnis, dan pemangku kepentingan (Choi *et al.* 2015). Biomimikri merupakan upaya terarah untuk menyingkap tabir misteri kehidupan di alam, bagaimana alam bekerja dan menggunakan inspirasi tersebut untuk inovasi teknologi.

Biomimikri berupaya memahami mekanisme alam secara mendasar pada level makroskopik maupun mikroskopik hingga nano, kemudian mengadaptasinya sebagai sumber

inspirasi untuk pengembangan sains dan teknologi. Berbagai pertanyaan dari fenomena alam menunggu jawaban. Bagaimana capung mengalahkan manuver helikopter terbaik yang diciptakan manusia? Bagaimana burung kolibri menyeberangi Teluk Meksiko dengan bahan bakar kurang dari sepersepuluh ons? Bagaimana semut-semut membawa kargo mereka melintasi hutan di tengah terik matahari?

Revolusi Industri telah membawa manusia pada kemajuan pesat, memperpanjang usia manusia, dan mengatasi berbagai ancaman penyakit. Namun meningkatnya jumlah dan harapan hidup manusia juga memerlukan pemenuhan kebutuhan dasar yang berujung pada eksploitasi alam. Kita telah mengambil dari alam melebihi kapasitas alam untuk menggantikannya. Hal ini masih diperburuk dengan perilaku manusia yang tidak bersahabat.

Pendekatan yang berfokus pada pemenuhan kebutuhan dan kecerdasan manusia semata tanpa mengindahkan alam telah membawa kita pada titik

batas toleransi bumi. Kerusakan lingkungan akibat polusi, deforestasi, eksploitasi berlebihan, hingga peningkatan suhu bumi menganga di depan mata dan mengancam keberlangsungan hidup. Pemakaian dan produksi massal plastik jauh melampaui kemampuan alam untuk mengurainya, menyebabkan polusi yang mengancam kehidupan di darat dan di laut. Mikroplastik pun ditengarai telah memasuki rantai makanan, yang dapat mencapai usus kita dengan konsekuensi kesehatan yang belum kita pahami. Inilah sisi lain yang tidak kita inginkan dari teknologi.

Banyak penemuan lain hasil berguru dari alam telah membawa kemajuan bagi umat manusia. Jarum suntik tanpa rasa nyeri yang diciptakan di Osaka, Jepang, terilhami dari struktur mulut nyamuk penghisap darah dengan iritasi saraf minimal; antisyau terinspirasi dari struktur nano mata ngengat untuk membelokkan cahaya; mata serangga menginspirasi peningkatan kapasitas cakupan lensa kamera; serta daya lekat kerang pada bebatuan di pantai menginspirasi penemuan cara baru menjahit luka operasi. Dari padang savana Afrika, sarang rayap setinggi

enam meter menginspirasi arsitek Mike Pearce membangun Eastgate Centre di Zimbabwe, bangunan dengan sistem pendingin alami pertama di dunia (lihat Hunter 2017).

Revolusi biomimikri menggunakan pendekatan atas apa yang dapat dipelajari dari alam, bukan apa yang dapat diekstraksi dari alam dan bersifat eksploitatif. Pesan utama biomimikri adalah bagaimana menciptakan berbagai produk yang dapat diurai dan lebih mengikuti cara kerja alam, bukan sebaliknya. Ancaman kepunahan berbagai spesies menjadikan pendekatan alami melalui biomimikri semakin mendesak. Padahal kekuatan alam bersandar pada keanekaragaman.

Biomimikri adalah inovasi teknologi masa depan. Di Eropa, Jepang, dan Amerika Serikat, minat terhadap biomimikri meningkat pesat, termasuk dalam investasi dana riset. BIONIK di Jerman merupakan pusat studi biomimetik yang menggabungkan 38 pusat riset. Inggris mendirikan The Biomimetics Network for Industrial Sustainability (BIONIS), semacam jejaring yang menghubungkan dunia bisnis dan perguruan tinggi.

New York mendirikan The New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) yang menggunakan pendekatan biomimikri dalam mencari solusi berbagai masalah energi. Perusahaan-perusahaan teknologi bekerja sama dengan ilmuwan mendirikan dan merancang laboratorium untuk eksplorasi teknologi baru. Bagaimana Indonesia dengan megabiodiversitasnya menggali inspirasi dari alamnya sendiri untuk dunia?

### **Big Data untuk Biodiversitas Indonesia**

Sains biodiversitas, sebagaimana cabang sains lainnya, telah memasuki era informasi. Dalam era ini, kemajuan sebuah cabang sains ditentukan oleh kemampuannya melakukan koleksi, analisis serta pemodelan data dalam jumlah besar atau *big data*. Selain jumlahnya yang besar, jenis data yang dikumpulkan dan dianalisis biasanya juga sangat bervariasi dan bersifat dinamis, melibatkan berbagai interaksi dan bersifat aktual. Dengan demikian, pemodelan data yang dilakukan bukan hanya bersifat deskriptif yang bermanfaat sebagai referensi,

tetapi juga memberikan kemampuan eksplanasi dan prediksi.

Penjelasan yang dihasilkan melalui analisis *big data* akan berujung pada pembangunan teori-teori baru dalam sains biodiversitas. Sementara itu, kemampuan melakukan prediksi akan sangat membantu untuk perumusan kebijakan. Di antaranya adalah kebijakan pelestarian berkesinambungan, pemanfaatan biodiversitas sebagai sumber daya, ataupun teknologi baru pemanfaatan sumber biodiversitas.

Satu pola umum dalam perkembangan sains adalah munculnya revolusi sains yang diawali oleh observasi baru. Kemampuan observasi ini biasanya berjalan beriringan dengan kemajuan teknologi. Berbagai kemajuan teknologi ini berdampak kepada kemampuan ilmuwan untuk dapat melakukan observasi biodiversitas skala besar.

#### **Koleksi Data Skala Besar**

Kegiatan koleksi data dalam sains biodiversitas sejak lama didominasi oleh pekerjaan lapangan, yang mengharuskan ilmuwan hadir

secara fisik di sejumlah habitat yang menjadi objek penelitian. Dengan kemajuan teknologi, seperti kemampuan otomasi pemetaan melalui inovasi alat-alat sensor, kemampuan perekaman dan komputasi olah data, jumlah dan keberagaman jenis data biodiversitas pun meningkat. Dengan begitu, transformasi *big data* dapat meningkatkan kemampuan kita untuk melakukan observasi dalam skala besar melalui otomasi komputasi.

Kemajuan teknologi sensor memungkinkan para ilmuwan melakukan otomasi observasi dan pengumpulan data di depan komputer. Sensor skala besar yang juga dikenal sebagai Sistem Observasi Bumi, memanfaatkan satelit (misalnya, Landsat, Sentinel) atau platform observasi kamera yang tersebar di berbagai lokalitas ekologis (O'Connor *et al.* 2015; Skidmore *et al.* 2015). Variabel-variabel biodiversitas dapat diukur dan dimonitor dengan berbagai teknik pengindraan, seperti pengindraan hiperspektrum yang mampu menangkap berbagai spektrum gelombang elektromagnet. Dengan melihat spektrum tersebut kita dapat mengidentifikasi berbagai

jenis materi, objek, atau bahkan vegetasi. Selain itu, pemindai Lidar memanfaatkan laser untuk mengukur jarak dengan presisi tinggi yang digabungkan dengan Sistem Informasi Geografis sehingga memberikan data spasial yang komprehensif dalam format tiga dimensi.

Kemajuan teknologi informasi dan pengindraan dalam sistem koleksi dan pemantauan data biodiversitas skala besar ini membuka peluang dan tantangan tersendiri. Salah satu tantangannya adalah melakukan analisis data besar yang berhasil dikoleksi, terutama data yang memerlukan interpretasi manusia. Langkanya ilmuwan dan kaum profesional menyulitkan pemantauan dan analisis variabel biodiversitas skala besar dengan resolusi tinggi, selain tingkat data biodiversitas yang skalanya kompleks dan sangat luas.

#### **Pemodelan data: integrasi**

Tantangan besar dalam sains biodiversitas adalah memahami bagaimana berbagai macam spesies dapat hidup bersama, saling berinteraksi dan hidup berkelanjutan, saling memengaruhi dalam suatu

ruang ekosistem yang senantiasa mengalami perubahan evolutif yang dinamis. Tantangan dalam pelestarian dan pemanfaatan biodiversitas, selain mempertahankan keragaman spesies yang sudah ada, juga memahami bagaimana rangkaian interaksi makhluk beragam spesies ini dapat hidup dalam suatu ekosistem secara seimbang, beradaptasi, berevolusi terutama dalam hubungannya dengan aktivitas manusia. Apalagi ruang lingkup kehidupan manusia bertambah padat dengan kebutuhan yang semakin kompleks dan meningkat.

Era *big data* dan kemampuan teknologi komputasi serta ilmu kuantitatif memberikan peluang melakukan intervensi dan penerapan aplikasi yang inovatif, terutama melalui biodiversitas Indonesia. Kemajuan teknologi ini memungkinkan integrasi komponen multidimensi dari observasi ilmiah dengan sejarah kearifan lokal, faktor-faktor dan kondisi sosial budaya, serta kebijakan ekonomi dan pemerintahan. Tujuannya untuk memenuhi kebutuhan peradaban manusia yang terus berkembang dan mengalami perubahan namun tetap harmonis dengan alam.

#### **Kecerdasan buatan dan sains warga**

Tantangan era *big data* memicu perkembangan inovasi kecerdasan buatan, yaitu sebuah teknologi algoritma komputasi yang menggabungkan observasi manusia dengan teknologi otomasi komputasi dalam memproses data skala besar. Algoritma kecerdasan buatan berawal dari penilaian manusia terhadap data yang diproses dalam suatu algoritma kuantitatif statistik untuk menentukan pola yang berarti. Dengan bertambahnya data hasil observasi manusia yang dapat dimasukkan dalam suatu algoritma, diharapkan kecerdasan buatan dapat melakukan observasi data dan penentuan pola data skala besar secara otomatis.

Salah satu efek perkembangan teknologi adalah semakin murah dan mudahnya pengoperasian teknologi, termasuk teknologi sensor serta teknologi informasi. Akibatnya, orang awam memiliki kesempatan untuk terlibat dalam kegiatan ilmiah. Karena itulah muncul apa yang dikenal sebagai sains warga (Pocock *et al.* 2017). Sains warga adalah keterlibatan publik secara luas dalam proses pengambilan dan analisis

data, yang biasanya dilakukan secara kolaboratif para ilmuwan profesional.

Penggunaan istilah sains warga pertama kali tercatat pada 1989. Saat itu sebanyak 225 relawan di seluruh Amerika Serikat mengumpulkan sampel hujan untuk membantu masyarakat Audubon, Amerika Serikat, dalam kampanye peningkatan kesadaran terhadap hujan asam (Kerson 1989). Para sukarelawan mengumpulkan sampel, memeriksa keasamannya, dan melaporkannya kembali ke organisasi tersebut. Informasi itu kemudian digunakan untuk menjelaskan fenomena secara menyeluruh.

Dalam empat dekade terakhir, sains warga telah berkembang pesat. Sains warga dapat dilakukan oleh individu, tim, atau jaringan relawan, termasuk bermitra dengan ilmuwan profesional untuk mencapai tujuan bersama. Jaringan relawan yang besar sering kali memungkinkan para ilmuwan untuk merampungkan proyek yang berbiaya mahal atau memakan waktu lama jika digarap melalui riset tradisional (Silvertown 2009).

Saat ini sains warga telah mencapai bentuk yang modern, terutama dalam

akses dan skala partisipasi publik. Meskipun proyek bervariasi dalam tingkat kolaborasi antara peneliti sains dan relawan, pada kebanyakan proyek, sukarelawan menerima pelatihan terkait prosedur proyek untuk memastikan konsistensi dalam pengumpulan data dan akurasi dalam analisis data. Jika dipersiapkan secara matang, sains warga ini dapat menjadi terobosan dalam pengumpulan data dan pengetahuan biodiversitas Indonesia yang tersebar di berbagai komunitas dalam bentuk kearifan lokal.

Sebagai contoh, Fasilitas Informasi Biodiversitas Global (GBIF) memberikan fasilitas akses informasi data biodiversitas dunia, termasuk Indonesia, secara terbuka (Dooley 2002). Arsip digital ini telah membentuk sistem untuk memperoleh akses data biodiversitas dari berbagai institusi riset, termasuk hasil pengamatan dari kegiatan sains warga. Saat ini ada ratusan juta data yang berguna, antara lain untuk memantau spesies invasif, pemodelan efek perubahan iklim pada biodiversitas, identifikasi daerah-daerah yang perlu dilindungi, hingga evaluasi efektivitas program konservasi. Sejumlah publikasi juga

mendokumentasikan hasil aksi sains warga, serta menawarkan strategi untuk menghubungkan temuan penelitian dengan pengelolaan dan pengambilan kebijakan dalam konteks yang berbeda.

Sains warga dan inovasi kecerdasan buatan adalah dua terobosan era *big data* yang diharapkan dapat dikembangkan untuk membantu pelacakan, pendataan, dan pemetaan biodiversitas secara lebih efisien melalui otomasi observasi skala besar. Sebagai contoh adalah berkembangnya aplikasi piranti lunak, seperti Zooniverse, sebuah portal web sains warga yang memiliki berbagai macam proyek di bidang astronomi, biologi sel, humaniora, ekologi, dan sains iklim. Selain itu, ada juga platform iNaturalist yang dirancang pada 2008 oleh Akademi Sains California (Matchar 2017). iNaturalist adalah salah satu platform yang menggunakan pendekatan kecerdasan buatan berdasarkan teknologi komputasi visual untuk melakukan otomasi kumpulan observasi secara massal. Merlin BirdID, rancangan Universitas Cornell, menggunakan kecerdasan buatan untuk mengidentifikasi

lebih dari 750 spesies burung melalui jawaban pengguna atas beberapa pertanyaan sederhana, termasuk ukuran dan warna burung yang terlihat. Ada pula PlantNet, yaitu platform serupa untuk mengidentifikasi tanaman berdasarkan jenis buah, bunga, dan parameter lainnya (Matchar 2017).

Contoh terkini sains warga di bidang kesehatan masyarakat yaitu Eliminate Dengue Project (EDP) yang dilaksanakan Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, untuk memerangi demam berdarah dengan melepaskan nyamuk yang mengandung *Wolbachia*, bakteri alami yang menghalangi perkembangbiakan

virus dengue dalam tubuh nyamuk *Aedes aegypti* (Anders *et al.* 2018). EDP melibatkan warga Yogyakarta secara luas dengan membagikan ember-ember berisi telur nyamuk *Aedes aegypti* untuk dilepaskan oleh warga di lingkungan tempat tinggal mereka. Tim EDP kemudian melakukan pendataan demam di wilayah-wilayah tersebut bekerja sama dengan kader-kader kesehatan dan pusat kesehatan masyarakat selama periode tertentu. Targetnya adalah untuk menilai dampak pelepasan nyamuk yang mengandung *Wolbachia* tersebut. Upaya ini merupakan bagian dari gerakan global untuk mengeliminasi demam berdarah.

## Pendidikan Biodiversitas Melalui Sains Warga

Banyak proyek sains warga memiliki tujuan pendidikan dan sosialisasi (Osborn 2005; Brossard *et al.* 2005; Bauer *et al.* 2000). Sejumlah proyek sains warga ini dirancang untuk lingkup kelas formal maupun pendidikan informal seperti museum. Proyek terbaru sains warga lebih menekankan pada praktik ilmiah

dan tujuan terukur untuk pendidikan publik (Bonney *et al.* 2009).

Proyek sains warga telah mencapai hasil yang luar biasa bagi sains dan pendidikan. Dalam beberapa tahun terakhir, lebih dari seratus artikel telah dipublikasikan dalam kajian literatur ilmiah, yang menganalisis

dan menarik kesimpulan secara signifikan dari data yang dikumpulkan secara sukarela. Banyak artikel dan laporan yang menggambarkan hasil pembelajaran bagi peserta yang juga telah dipublikasikan.

Proyek sains warga dapat berdampak sangat baik bagi pendidikan sains secara umum dan sains biodiversitas Indonesia. Untuk tujuan pendidikan, proyek sains warga dapat meningkatkan pemahaman peserta tentang kandungan atau kapasitas ilmiah untuk menangani isu sains. Proyek sains warga juga dapat melengkapi praktikum kelas sains di Indonesia yang cenderung minim diadakan karena, misalnya, tidak terdapat laboratorium yang memadai atau kurangnya mentor.

Bagi sains biodiversitas Indonesia, sains warga akan mampu memberikan data keragaman hayati yang sebelumnya tidak dapat dilakukan karena memakan waktu lama dan biaya sangat tinggi jika dilakukan para ilmuwan melalui riset sains tradisional. Sains warga, misalnya, dapat mendokumentasikan perubahan populasi tanaman dan hewan atau variasi kualitas udara

dan air. Salah satu contoh proyek sains warga yang terbilang sukses adalah Lifepatch di Yogyakarta. Lewat Lifepatch, warga kota menganalisis kontaminasi bakteri *Escherichia coli* di sungai-sungai yang melintasi permukiman mereka.

Merancang proyek sains warga tentu bukan proses sederhana. Penggagas sains warga harus dapat memastikan bahwa proyek akan bermakna bagi semua peserta, data dikumpulkan secara akurat, dianalisis dengan teliti, dan hasilnya dikomunikasikan secara luas kepada peserta dan masyarakat ilmiah. Untuk mewujudkan hal ini diperlukan perencanaan yang matang. Jika kegiatan sains warga dapat dilakukan dalam skala besar, maka sains biodiversitas Indonesia akan mengalami perkembangan pesat, yang belum pernah terjadi sebelumnya.

## Sains untuk Memahami, Adaptasi, dan Mitigasi Perubahan Iklim

Strategi sains perubahan iklim secara internasional dalam ranah Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bertumpu pada tiga aspek, yaitu (i) pemahaman sains iklim, (ii) adaptasi dampak perubahan iklim, dan (iii) mitigasi konsentrasi gas rumah kaca.

Sains diperlukan untuk memahami status perubahan iklim, peran manusia dan proyeksi ke depan dengan sinergi data observasi, paleoklimatologi, dan model. Kompleksitas dinamika iklim dan oseanografi di kawasan maritim Indonesia membutuhkan data observasi yang representatif. Contohnya, laju pemanasan dan pengasaman laut di lokasi *upwelling* akan berbeda dengan lokasi lainnya. Iklim adalah cuaca dalam skala spasial dan temporal yang panjang, sehingga pemahaman akan perubahan iklim dan kontribusi manusia membutuhkan data selama minimal beberapa dekade. Namun data tersebut jarang tersedia, maka studi iklim masa lampau atau paleoklimat dengan membaca arsip

alam (karang, sedimen laut, dan garis pohon) menghadirkan data iklim yang dibutuhkan. Data observasi dan paleoklimat tersebut menjadi *groundtruth* bagi model iklim agar kita dapat memprediksi perubahan iklim mendatang dengan lebih akurat. Selain itu, data observasi seperti nutrisi dan pH laut yang representatif juga meningkatkan peran Indonesia bagi pencapaian Sustainable Development Goals PBB yaitu SDG 14.1 dan 14.3.

Adaptasi dampak perubahan iklim bagi biodiversitas membutuhkan pemahaman terkait respon biota terhadap *multi-stressor*. Di darat, perubahan iklim membawa perubahan suhu dan curah hujan. Di laut, kombinasi dari pemanasan, pengasaman, deoksigenasi dan nutrisi memberikan respon yang kompleks, terkadang bersifat akumulatif namun dapat pula bertentangan. Pemahaman respon biota terhadap perubahan iklim melibatkan studi eksperimen, *in situ* dan juga permodelan. Biodiversitas Indonesia juga berpotensi dalam

menanggulangi dampak perubahan iklim, misalnya lamun dapat meregulasi tingkat keasaman laut sekitarnya. Jasa lingkungan perlu ditingkatkan sebagai strategi *non-regret* untuk meminimalkan dampak perubahan iklim.

Para ilmuwan merekomendasikan berbagai solusi alami untuk memitigasi perubahan iklim, di mana dampak terbesar dari solusi tersebut diperoleh dari upaya reforestasi dan pencegahan konversi hutan (Griscom *et al.* 2017). Menahan laju pemanasan global di bawah 2°C kemungkinan dapat dicapai jika solusi alami ini dapat diimplementasikan dengan

biaya yang efektif, karena solusi *geoengineering* belum menunjukkan hasil yang optimal. Komitmen untuk mencapai target penahanan laju pemanasan pada akhirnya menjadi solusi global. IPCC memaparkan bahwa penekanan laju pemanasan sesuai dengan Paris Agreement pada angka 1.5°C di atas level masa pra Industri dapat menyelamatkan lebih dari 10 juta populasi dunia dari dampak kenaikan permukaan laut dibandingkan apabila laju pemanasan mencapai 2°C (IPCC 2018). Setiap derajat kenaikan suhu yang dapat ditekan berdampak luas bagi kehidupan di bumi.

## Mendokumentasikan Spesimen Biodiversitas Indonesia: Bekal Pembelajaran Masa Depan

Pemerintah Indonesia telah meratifikasi Protokol Nagoya pada 2013. Perjanjian internasional ini mengatur tentang perlindungan terhadap kekayaan biodiversitas dan menjamin pembagian keuntungan bagi pemilik sumber daya genetik seperti Indonesia.

Biodiversitas yang tinggi di Indonesia belum seluruhnya terdokumentasi dengan baik. Padahal, eksplorasi biodiversitas membutuhkan waktu, tenaga, dan dana yang tidak sedikit. Karenanya, penyimpanan spesimen hasil eksplorasi sangat diperlukan. Bank Spesimen Biodiversitas adalah sebuah bank spesimen

fungsional yang digunakan untuk mengumpulkan, mempersiapkan, menyimpan, dan memasok spesimen untuk berbagai keperluan kegiatan ilmiah, seperti pengawasan aktual dan retrospektif (Odsjo 2006).

Indonesia memiliki tiga tempat penyimpanan spesimen, yaitu Indonesian Culture Collection (InaCC), Herbarium Bogoriense, dan Museum Zoologicum Bogoriense, yang semuanya berlokasi di Bogor. InaCC merupakan pusat depository nasional mikroorganisme, seperti bakteri, cendawan mikroskopis, arkea, alga, kapang, khamir, aktinomisetes, dan bakteriofag. Saat ini InaCC menyimpan sebanyak 2.800 galur teridentifikasi dan terkarakterisasi sesuai panduan World Federation of Culture Collection (WFCC). Herbarium Bogoriense, yang berdiri sejak 1841, telah mengoleksi 900 ribu tumbuhan. Adapun Museum Zoologicum Bogoriense, yang berusia 22 tahun lebih muda, saat ini memiliki 3 juta spesimen koleksi. Selain itu, kita juga memiliki koleksi kayu dengan jumlah spesimen terbanyak di dunia, sebanyak 185.647 spesimen yang tersimpan di Xylarium Bogoriense, Bogor.

Spesimen mikrob yang dibiarkan hidup dapat membawa manfaat dari segi ekonomi dan pengembangan sains, termasuk efisiensi waktu penelitian. Pengguna, yaitu ilmuwan maupun kalangan industri, dapat memperoleh mikroorganisme yang dibutuhkan dengan mudah tanpa perlu riset kembali ke hutan atau mengisolasinya di alam. Organisme yang didaftarkan paten dapat menjadi salah satu keuntungan bagi inventor, lembaga, maupun pengguna. Seluruh organisme yang terdokumentasi dapat diakses dengan mudah oleh seluruh masyarakat di dalam negeri maupun komunitas internasional.

Tantangan dalam mengelola spesimen biodiversitas Indonesia adalah mengumpulkan spesimen yang telah dilakukan oleh peneliti dari berbagai lembaga dan universitas, terutama penelitian yang dibiayai oleh negara. Tantangan lain adalah sosialisasi kepada seluruh pemangku kepentingan, khususnya kalangan ilmuwan dan industri, terkait keberadaan bank spesimen beserta regulasinya. Oleh karena itu, perlu adanya fasilitas nasional dengan sistem penyimpanan dan pemanfaatan spesimen yang dapat diakses dengan mudah.

# VI

## KEBIJAKAN STRATEGIS: PENGARUSUTAMAAN SAINS BIODIVERSITAS INDONESIA

*Sains biodiversitas adalah alat utama dalam upaya menjaga dan mengoptimalkan manfaat keanekaragaman hayati. Pengarusutamaannya menjadi keharusan.*

Indonesia memiliki kesempatan besar untuk memanfaatkan keunggulan komparatifnya berupa megabiodiversitas sebagai motor utama pembangunan ekonomi Indonesia. Dari berbagai macam pilihan, di alam Indonesia terhampar kesempatan dengan potensi tinggi dalam bidang ekowisata, bioprospeksi untuk obat dan energi, dan potensi laut dalam. Kekayaan megabiodiversitas selayaknya dijadikan modal dasar untuk melakukan transisi dari ekonomi yang berdasar pada kekayaan alam (*natural resources-based economy*) menuju ekonomi yang bersandar pada ekonomi berbasis ilmu pengetahuan (*knowledge-based economy*) yang membutuhkan keahlian tenaga kerja berkualitas tinggi dan penciptaan ilmu pengetahuan baru. Keterpinggiran sains dan teknologi dari kebijakan nasional selama beberapa dekade membuat Indonesia telah ketinggalan banyak, meski dalam beberapa tahun terakhir upaya mengejar

keteringgalan tersebut mulai gencar dilakukan.

Untuk menjadikan megabiodiversitas kita sebagai pijakan membawa Indonesia menjadi negara maju, dibutuhkan komitmen nasional yang besar dan dukungan politik yang kuat untuk menjadikan sains dan teknologi sebagai kunci utama pembangunan ekonomi yang inovatif. Sejumlah penguatan dan terobosan baru bervisi jangka panjang di bidang infrastruktur sains dan teknologi harus dilakukan. Upaya-upaya itu, antara lain, membentuk sistem pendanaan riset yang otonom dan berkelanjutan, penguatan riset dasar yang inovatif di berbagai perguruan tinggi melalui pembangunan universitas riset, penguatan kerja sama internasional, serta pemotongan berbagai hambatan regulasi yang menghalangi kemajuan sains dan teknologi. Singkatnya, dibutuhkan pengarusutamaan sains biodiversitas.

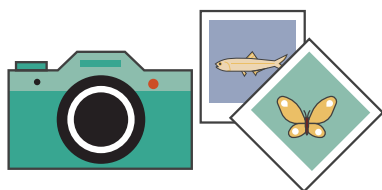
## Kebijakan Indonesia dalam Upaya Mengarusutamakan Biodiversitas

Upaya pengarusutamaan sains biodiversitas ke dalam kebijakan publik telah dimulai sejak awal 1990-an, melalui penyusunan, adopsi, dan penerbitan Rencana Aksi Biodiversitas atau Indonesia Biodiversity Action Plan (IBAP) yang kemudian diubah menjadi Rencana Aksi Strategi Keanekaragaman Hayati Indonesia (Indonesia Biodiversity Strategy and Action Plan/IBSAP) pada 2003, demi memberikan peran lebih besar kepada daerah sesuai Undang-Undang Otonomi Daerah. Pada 2015, strategi dan rencana aksi ini kembali dimutakhirkan menjadi IBSAP 2015-2020. Namun hingga 2019 ketika dokumen ini terbit, IBSAP 2015-2020 belum juga memiliki dasar hukum yang kuat, tidak dilengkapi petunjuk teknis jelas yang memungkinkan implementasinya, serta belum menjadi rujukan dalam riset terkait biodiversitas.

Momentum untuk mengintegrasikan IBSAP 2015-2020 dalam perencanaan dan kegiatan seluruh sektor pembangunan adalah Tujuan

Pembangunan Berkelanjutan atau Sustainable Development Goals (SDGs) yang disepakati oleh 193 negara pada 21 Oktober 2015 sebagai ambisi pembangunan bersama hingga 2030. Agenda pembangunan berkelanjutan untuk kemaslahatan manusia dan planet bumi dengan 17 tujuan dan 169 capaian yang terukur ini dibuat untuk menjawab tuntutan dalam mengatasi kemiskinan, kesenjangan, dan perubahan iklim dalam bentuk aksi nyata. Caranya dengan menetapkan rangkaian target yang bisa diaplikasikan secara universal serta dapat diukur dalam menyeimbangkan tiga dimensi pembangunan berkelanjutan, yaitu sosial, ekonomi, dan lingkungan.

Dengan pendekatan pembangunan berkelanjutan ini, pola pikir dalam pengarusutamaan kebijakan terkait segala kegiatan manusia terhadap biodiversitas, baik yang berdampak positif ataupun negatif, perlu diubah dari pendekatan *triple bottom line* menjadi pendekatan *nested logic* (lihat Gambar 6.1)



## Mengarusutamakan Biodiversitas dalam Kebijakan Publik



Indonesia merupakan salah satu negara pertama yang menyusun Rencana Aksi Biodiversitas atau Indonesian Biodiversity Action Plan (IBAP). Rencana ini diadopsi pada 1991 dan diterbitkan tahun 1993. Pada tahun 2014, Indonesia turut mengesahkan United Nations Convention on Biological Diversity (UNCBD) dalam bentuk Undang-Undang Nomor 5 Tahun 1994. Namun komitmen untuk mengimplementasikan Undang-Undang ini masih kurang. Rencana Aksi tersebut juga cenderung berfokus pada konservasi kawasan lindung dan konservasi spesies dan hanya sedikit rencana aksi terkait pengelolaan biodiversitas lainnya.

Pada tahun 2001, pemerintah Indonesia memutuskan untuk meninjau kembali keberhasilan dan kelemahan IBAP serta mengevaluasi keefektifan kebijakan nasional dan kondisi kelembagaan untuk konservasi biodiversitas. Selanjutnya pemerintah mencoba mengidentifikasi hambatan terhadap perlindungan keanekaragaman hayati dan pilihan untuk konservasi serta mendefinisikan strategi yang sesuai dengan realitas sosial dan ekonomi baru yang dihadapi

Indonesia. Pada 2003, Rencana Aksi Strategi Keanekaragaman Hayati Indonesia (Indonesian Biodiversity Strategy and Action Plan/IBSAP) telah disusun. IBSAP 2003 melakukan perubahan penting dalam bentuk pemberian kesempatan yang lebih luas untuk partisipasi pemangku kepentingan dan tanggung jawab yang lebih besar untuk pengelolaan keanekaragaman hayati di tingkat provinsi dan masyarakat. Selain itu, Undang-Undang tentang Otonomi Daerah dan Desentralisasi tahun 1999 juga memberi peran, tugas, dan tanggung jawab utama pada pemerintah provinsi dan kabupaten dalam perencanaan, pelaksanaan, serta pengelolaan sumber daya alam. Menurut Undang-Undang ini, pengelolaan dan konservasi keanekaragaman hayati sangat bergantung pada keseriusan pemerintah daerah. Dalam perkembangan setelah itu, Undang-undang Nomor 23 tahun 2014 tentang Pemerintah Daerah mengambil kembali sebagian tanggung jawab dari kabupaten dan sekarang memusatkan tata kelola hutan di tingkat provinsi.

Selanjutnya pada 22 April 2015, Indonesia memperkenalkan Strategi dan Rencana Aksi Keanekaragaman Hayati Indonesia yang baru dan telah direvisi atau IBSAP 2015-2020. Pemerintah Indonesia pun telah merancang strategi sektoral lima tahun (2015-2019) dengan prioritas dalam reformasi pengelolaan hutan, melestarikan keanekaragaman hayati, memperkuat hak-hak masyarakat lokal yang bergantung pada hutan dan tindakan penegakan hukum.

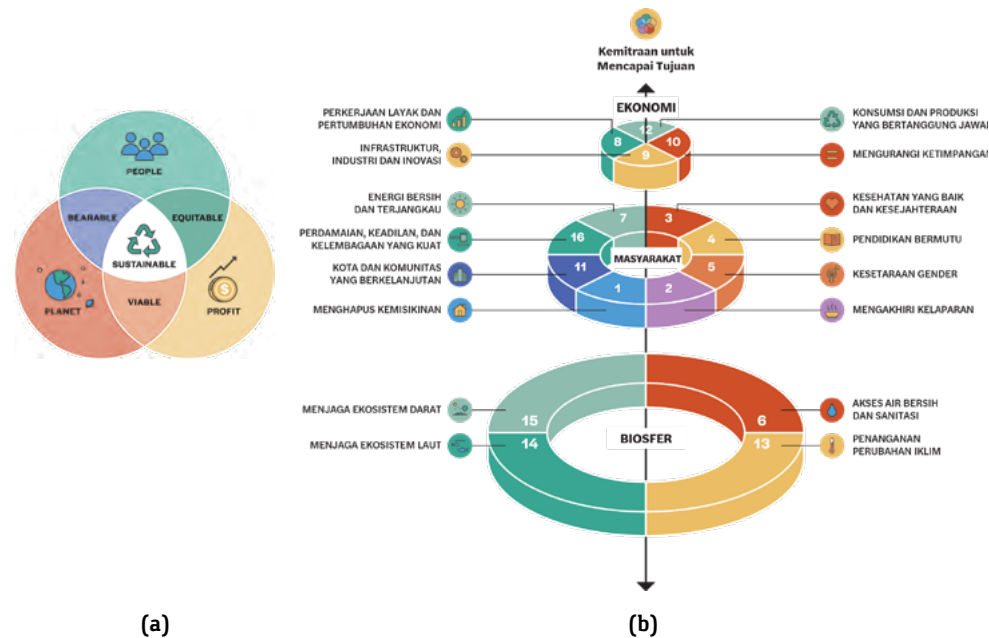
Protokol Nagoya mengenai akses pada sumber daya genetik dan pembagian keuntungan yang adil dan seimbang juga telah memiliki dasar hukum yang kuat melalui Undang-Undang Nomor 11 Tahun 2013 tentang Pengesahan Nagoya Protocol on Access to Genetic Resources and the Fair and Equitable Sharing of Benefits Arising from their Utilization to the Convention on Biological Diversity. IBSAP 2015-2020 berisi strategi nasional serta rencana aksi pengelolaan biodiversitas Indonesia yang meliputi aspek-aspek yang relevan dengan isu biodiversitas serta agenda prioritas pembangunan nasional dalam beberapa tahun ke depan.

IBSAP 2015-2020 ditujukan bagi semua pemangku kepentingan agar dapat menjadi pedoman perumusan kebijakan, perencanaan pelestarian dan pemanfaatan di bidang biodiversitas, serta menjadi acuan bagi pelaksanaan program dan kegiatan di bidang pembangunan lainnya, baik di sektor pemerintah, swasta, maupun organisasi masyarakat sipil di tingkat pusat maupun daerah.

Hingga saat ini, IBSAP 2015-2020 belum memiliki dasar hukum yang kuat. IBSAP ini pun belum memiliki petunjuk teknis yang jelas dalam implementasinya dan belum menjadi pedoman nasional dalam mengelola biodiversitas. Sebagai contoh, Rencana Induk Riset Nasional (RIRN) yang selayaknya mendukung riset biodiversitas tidak menjadikan IBSAP 2015-2020 sebagai acuan. Tentu saja ini menjadi kontraproduktif. Sebagai pembanding, Strategic Plan for Biodiversity 2011-2020 dan Aichi Biodiversity Targets telah diadopsi di bawah Convention on Biological Diversity (CBD) yang telah diterima sebagai kerangka kerja global untuk penyusunan prioritas aksi terkait keanekaragaman hayati.

Pendekatan *triple bottom line* membenturkan secara dikotomis kepentingan ekonomi dan ekologi, sedangkan pendekatan *nested logic* melihat perlunya keseimbangan antara kepentingan ekonomi dan ekologi. Meskipun temuan-temuan di bidang sains berkelanjutan semakin menunjukkan hubungan antara dimensi sosial, ekonomi, dan lingkungan (Gambar 6.1), tetapi pada praktiknya, paradigma pembangunan

kita tetap memandang ketiga dimensi ini secara terpisah (Gambar 6.1-a). Akibatnya pertumbuhan ekonomi dimaksimalkan, tetapi dampak terhadap biodiversitas dan lingkungan masih terabaikan. Untuk mengimplementasikan IBSAP 2015-2020 dan mencapai target SDGs pada 2030, dibutuhkan pendekatan yang bergerak menuju *nested logic* seperti dalam ilustrasi di Gambar 6.1-b.



Gambar 6.1 Perubahan pola pengelolaan dari triple bottom line (a) menuju nested logic (b)

Konsep *triple bottom line* mempertimbangkan aspek keuntungan ekonomi, kualitas lingkungan, dan keadilan sosial (Elkington 1998). Ketiga lingkaran

ini menunjukkan tiga dimensi sosial, ekonomi, dan lingkungan yang saling terhubung melalui irisan, namun hakikatnya tetap terpisah. Pendekatan *nested logic*

menunjukkan pemahaman bahwa ekonomi dan masyarakat adalah bagian di dalam biosfer (Folke *et al.* 2016, Rockström & Sukhdev 2016). Karenanya pertumbuhan sosio-ekonomi haruslah tumbuh dalam batas kemampuan biosfer. Hilangnya biodiversitas akan menurunkan integritas biosfer yang mengakibatkan biosfer tidak dapat memberikan jasa ekosistem. Ekonomi adalah bagian dari masyarakat, dan keduanya adalah bagian dari biosfer. Dengan kata lain, pemenuhan kebutuhan ekonomi dan sosial hanya bisa dilakukan di dalam batas-batas planet bumi.

Pendekatan *nested logic* juga akan memungkinkan pencapaian Aichi Biodiversity Targets, yaitu

target global untuk mengurangi laju kehilangan keanekaragaman hayati yang disepakati 196 negara. Aichi Biodiversity Targets yang memuat 20 target keanekaragaman hayati yang dicanangkan pada 2010 lalu, merupakan target-target keanekaragaman hayati yang telah disepakati oleh negara-negara pihak pada Conference of the Parties (CoP) ke-10 Convention on Biological Diversity yang diselenggarakan di Nagoya, Prefektur Aichi, Jepang. Di antara target itu adalah, yang pertama, paling lambat pada 2020 masyarakat sadar akan nilai biodiversitas dan melakukan langkah-langkah untuk melestarikan dan menggunakan biodiversitas secara berkelanjutan.

## Kebijakan Berbasis Bukti

Pengarusutamaan biodiversitas ke dalam kebijakan berkaitan erat dengan perumusan dan pelaksanaan kebijakan berbasis bukti. Ada banyak contoh mengenai pentingnya kebijakan berbasis bukti terkait konservasi biodiversitas. Misalnya, pendorong utama deforestasi hutan

bakau dalam dekade terakhir di Asia Tenggara termasuk Indonesia selain akuakultur dan persawahan, juga perkebunan kelapa sawit (Richards & Friess 2015). Padahal hutan bakau menawarkan sejumlah jasa ekosistem termasuk peran pentingnya sebagai gudang

penyimpanan karbon jangka panjang yang bermanfaat untuk mitigasi perubahan iklim (Murdiyarto *et al.* 2015). Temuan-temuan seperti ini dapat melandasi kebijakan publik yang akan diambil dan dirumuskan terkait tata guna lahan.

Pengembangan metode analisis pengambilan contoh jarak jauh untuk mengakomodasi data dari perangkat kamera (Howe *et al.* 2017), memungkinkan dilakukannya analisis perubahan jumlah spesies. Dengan kombinasi data satelit dan darat, para peneliti berhasil memetakan beberapa indikator distribusi monyet, termasuk zona aktivitas manusia (Bush *et al.* 2017). Pemetaan tersebut dapat menunjukkan respons spesies terhadap perubahan lingkungan, baik yang terjadi secara alami maupun dengan campur tangan manusia, yang dapat dikomunikasikan kepada pengambil kebijakan terkait.

Contoh-contoh di atas menggambarkan kebijakan berbasis bukti untuk konteks-konteks spesifik dan sektoral. Dalam konteks perencanaan pembangunan nasional yang lintas sektor, pemerintah Indonesia sudah

menjajaki menggunakan *evidence-based policy* dalam perumusan rencana pembangunan jangka menengah (RPJMN 2020-2024). Upaya ini merupakan bagian dari pengejawantahan regulasi yang memerintahkan dokumen perencanaan pembangunan sebagai objek dari Kajian Lingkungan Hidup Strategis (KLHS). Untuk pertama kalinya dalam sejarah Indonesia, intervensi-intervensi kebijakan berbagai bidang pembangunan untuk RPJMN ini akan diuji terhadap daya dukung dan daya tampung lingkungan serta sumber daya, yang didefinisikan antara lain melalui daya tampung dan daya dukung biodiversitas. Upaya ini tentu saja akan sangat bergantung pada ketersediaan serta mutu data dan sains biodiversitas, baik di tingkat nasional maupun di tingkat ekoregion di seluruh tanah air.

## Indonesia Menuju Satu Basis Data Biodiversitas



Satu Data adalah sebuah inisiatif pemerintah Indonesia untuk meningkatkan interoperabilitas dan pemanfaatan data pemerintah. Pemanfaatan data pemerintah tidak terbatas pada penggunaan internal antarinstansi, tetapi juga sebagai bentuk pemenuhan kebutuhan data publik bagi masyarakat. Melalui Satu Data, pemerintah Indonesia mendukung dan berupaya penuh melakukan pembenahan data pemerintah Indonesia. Data tersedia dalam format terbuka dan mudah digunakan dengan tujuan meningkatkan transparansi dan akuntabilitas pemerintah, serta untuk meningkatkan partisipasi masyarakat dalam mengawal pembangunan.

Basis data biodiversitas Indonesia yang terpadu dalam Satu Data akan menjadi suatu terobosan besar dalam pengelolaan biodiversitas. Saat ini data awal biodiversitas yang digunakan di dalam IBSAP 2015-2020 adalah data jenis flora, fauna, dan mikrob yang berasal dari Pusat Penelitian Biologi - LIPI (Indonesian Biodiversity Information System/IBIS). Data ini lalu digabung dengan data

dari herbarium dan museum yang berada di luar negeri, serta data lain dari Global Biodiversity Information Facility (GBIF), National Herbarium of the Netherlands (NHN), dan Fish Database. Namun masih banyak lagi data biodiversitas yang tidak tercatat dalam IBSAP 2015-2020. Untuk mikrob, misalnya, terdapat setidaknya 16 koleksi kultur mikrob Indonesia selain koleksi mikrob LIPI di InaCC, yaitu di Balitvet Culture Collection, Biofarma Culture Collection, Biogen Culture Collection, BPPT Culture Collection, dan ITB Culture Collection. Jika data biodiversitas ini dapat menjadi satu data, terlebih jika digabung dengan data pemanfaatan ekonomi serta kearifan lokal terkait biodiversitas, maka satu data biodiversitas Indonesia ini akan menjadi satu modal besar bagi pembangunan bangsa dan negara secara berkelanjutan. Dengan kebijakan dan pengelolaan yang tepat, biodiversitas Indonesia yang selama ini menjadi keunggulan komparatif bangsa Indonesia dapat secara bertahap menjadi keunggulan kompetitif yang unik.

## Pendanaan Berkelanjutan untuk Sains Biodiversitas Indonesia

Dalam aspek pendanaan, perlu dibedakan antara pendanaan untuk konservasi biodiversitas dengan pendanaan untuk sains biodiversitas, walaupun sains biodiversitas, misalnya berupa kegiatan riset, dapat menjadi unsur dari kegiatan konservasi biodiversitas. Di sinilah terdapat banyak tantangan. Secara umum, informasi dan analisis pendanaan untuk konservasi biodiversitas belum memadai. Sementara itu, informasi dan analisis terkait pendanaan untuk sains biodiversitas masih sangat terbatas, kalau bukan tidak ada. Bahkan di tingkat global, biaya finansial yang diperlukan untuk menghentikan laju kepunahan keanekaragaman hayati dan menjaga situs penting biodiversitas, boleh dibilang belum diketahui secara pasti, meskipun upaya untuk menaksir biaya finansial tersebut telah mulai dilakukan.

### Kebijakan Indonesia dalam Pendanaan Lingkungan Hidup dan Konservasi Biodiversitas

Untuk konteks Indonesia, salah satu kajian awal tentang pendanaan sektor publik untuk lingkungan hidup menemukan bahwa pengeluaran di sektor lingkungan justru sebagian besar tidak untuk kegiatan terkait lingkungan hidup, sementara itu banyak kegiatan yang terkait lingkungan hidup ditemukan di sektor-sektor lain (Vincent *et al.* 2002). Kajian ini juga menunjukkan bahwa dibandingkan negara-negara ASEAN yang sama-sama mengalami krisis ekonomi tahun 1998, pengeluaran Indonesia untuk lingkungan hidup turun lebih besar dari segi besaran anggaran dan proporsi terhadap PDB.

Kajian lebih baru melihat pembiayaan keanekaragaman hayati dengan menggunakan data pembiayaan nonpemerintah, secara khusus pinjaman/utang dan hibah (Ekayana 2017). Pembiayaan tersebut berasal dari lembaga donor multilateral dan bilateral serta lembaga lain di luar kategori ini, ini sejak 2006 sampai 2016. Dalam kurun waktu ini, pemerintah Indonesia

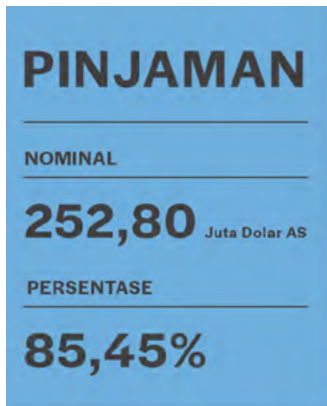
mendapatkan pinjaman/utang sebesar 252,8 juta dolar Amerika dan hibah sebesar 43 juta dolar Amerika untuk pembiayaan yang terkait dengan keanekaragaman hayati. Struktur pinjaman ini menunjukkan bahwa pinjaman/utang merupakan bagian terbesar pembiayaan nonpemerintah kita (85%). Lihat tabel 6.1 untuk rincian lebih lanjut.


Untuk kelompok pinjaman, pinjaman multilateral merupakan jenis pinjaman terbesar, diikuti oleh pinjaman bilateral dan komersial dengan proporsi yang tidak terpaut jauh. Adapun untuk pembiayaan berbentuk hibah berasal dari skema bilateral dan multilateral, serta korporasi dan NGO. Sebagian besar pembiayaan, baik utang maupun hibah, terkait dengan pengelolaan dan pemeliharaan biodiversitas. Sementara pembiayaan yang terkait dengan riset dan sains biodiversitas, terutama yang rencana aksi IBSAP untuk penelitian, pengelolaan data, dan dokumentasi keanekaragaman hayati masih sangat terbatas.

Di negara seperti Thailand dan Malaysia, pengeluaran publik untuk lingkungan hidup distrukturkan

dalam empat kelompok pengeluaran, yakni pengendalian mutu lingkungan, pengendalian polusi, pengelolaan sumber daya alam, dan proyek riset lingkungan hidup (Vincent *et al.* 2002). Secara umum, struktur ini juga berlaku dalam sistem keuangan publik di Indonesia, termasuk bagi sebagian riset terkait konservasi biodiversitas, khususnya riset biodiversitas terestrial.

Pemerintah telah menyusun IBSAP 2015-2020 untuk mendanai berbagai kegiatan biodiversitas. IBSAP 2015-2020 mengajukan tiga langkah untuk pendanaan biodiversitas. Pertama, berpedoman pada IBSAP 2015-2020 dan rencana aksi. Kedua, mengembangkan mekanisme, kriteria, dan indikator kerja sama kegiatan dan pendanaan; dan ketiga, pembentukan lembaga pembiayaan keanekaragaman hayati. Peraturan Pemerintah Nomor 46 Tahun 2017 tentang Instrumen Ekonomi untuk Lingkungan Hidup memberikan kerangka regulasi penting terhadap langkah-langkah pendanaan biodiversitas. Operasionalisasi langkah lebih lanjut diperlukan untuk pendanaan sains biodiversitas.



 **Multilateral**

---

NOMINAL **98,01** Juta Dolar AS


---

PERSENTASE **38,77%**

PEMBERI PINJAMAN

**Asian Development Bank; IBRD; IDA**

Pinjaman ADB untuk Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) sebesar 27,7 juta dolar AS (nilai realisasi) untuk proyek Coral Reef Rehabilitation and Management Program–Coral Triangle Initiative (COREMAP–CTI) dan sebesar 20,4 juta dolar AS (nilai realisasi) untuk proyek Sustainable Aquaculture Development for Food Security and Poverty Reduction.



 **Bilateral**

---

NOMINAL **84,01** Juta Dolar AS

---


PERSENTASE **33,23%**

PEMBERI PINJAMAN

**Agence Francaise de Development (AFD) Perancis; Pemerintah Spanyol; Pemerintah Amerika Serikat**

Sejumlah proyek di Kementerian Kelautan dan Perikanan dan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan untuk pembiayaan keanekaragaman hayati dibiayai oleh pinjaman bilateral dari AFD, Pemerintah Spanyol dan US Department of Treasury.



 **Komersial**

---

NOMINAL **70,78** Juta Dolar AS

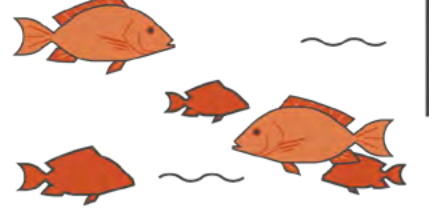
---


PERSENTASE **27,99%**

PEMBERI PINJAMAN

**Deutsche Bank Madrid; Natexis Banques; PT BNI-Sgp**

Budi daya kelautan di Batam, pengembangan pelatihan perikanan, dan Sistem Kapal Inspeksi Perikanan (SKIPI) adalah contoh proyek dengan pembiayaan komersial.





 **Bilateral & Multilateral**


---

PEMBERI HIBAH

**ACIAR, GIZ, KfW, ADB, ITTO, Lembaga PBB, dll**

Untuk periode waktu yang berbeda-beda, hibah bilateral dari berbagai lembaga (realisasi sebesar 43 juta dolar AS) bagi pengelolaan dan pemanfaatan keanekaragaman hayati: Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR) memberikan hibah sebesar 0,78 juta dolar AS untuk pengembangan manfaat keanekaragaman hayati; hibah dari Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit (GIZ) memberikan mencapai 6,62 juta dolar AS; hibah bilateral Kreditanstalt fur Wiederaufbau (KfW) untuk program pemulihan ekosistem Gunung Leuser mencapai 7,10 juta dolar AS; hibah multilateral senilai 24,72 juta dolar AS berasal dari berbagai lembaga seperti ADB, ITTO, dan Lembaga PBB.




 **Korporasi**


---

PEMBERI HIBAH

**Sumitomo Jepang**

KLHK menerima hibah korporasi sebesar 0,59 juta dolar AS untuk pemeliharaan dan pengelolaan Taman Nasional Gunung Bromo.




 **Lembaga Non Pemerintah (NGO)**

---

PEMBERI HIBAH

**Yayasan Kehati, TNC, WRI, WWF, dll**

Yayasan Keanekaragaman Hayati Indonesia (Yayasan KEHATI) sebesar 91 milyar rupiah untuk seluruh rencana aksi dalam IBSAP (2014-2015); The Nature Conservancy Indonesia (TNC) sebesar 243 miliar rupiah (2012-2015) bagi program sektor.



Tabel 6.1 Pengeluaran nonpemerintah (pinjaman dan hibah) terkait keanekaragaman hayati, 2006-2016

Sumber: Data Kementerian Keuangan, disarikan dari Ekayana (2017). Tabel oleh S. Mumbunan.

## Pendanaan Sains Biodiversitas Indonesia

Untuk menyandarkan ekonomi Indonesia pada sains biodiversitas, salah satu hal mendasar dan membutuhkan terobosan besar serta dukungan politik yang kuat adalah investasi infrastruktur keuangan berupa sistem pendanaan riset yang otonom, berkelanjutan, dan lentur terhadap siklus APBN, memungkinkan riset tahun jamak untuk mendanai berbagai riset strategis sains garda depan. Riset dasar menciptakan pengetahuan baru dan dapat mendorong tumbuhnya industri yang inovatif. Selain rendahnya jumlah investasi dalam riset, tidak adanya sistem pendanaan yang baik di skala nasional menjadi salah satu penyebab utama rendahnya produktivitas ilmuwan Indonesia, baik dari jumlah dan kualitas publikasi maupun dari segi paten (Brodjonegoro & Greene 2012). Ilmuwan Indonesia mengalami belenggu birokratisasi sains yang menghambat kreativitas mereka. Dana yang sedikit pun dikelola melalui sistem yang rumit yang menciutkan keinginan

ilmuwan Indonesia yang potensial berkontribusi secara substantif dalam penciptaan ilmu pengetahuan untuk ekonomi yang inovatif.

Meski terdapat sejumlah perbaikan di beberapa hal, namun terobosan besar masih sangat dibutuhkan agar ilmuwan Indonesia dapat berdiri sama tegak dengan ilmuwan-ilmuwan dunia, membangun rasa percaya diri sebagai bangsa yang bermartabat. Kebutuhan mendasar ini telah terabaikan begitu lama. Akibatnya adalah lemahnya budaya ilmiah di perguruan tinggi kita. Dibutuhkan terobosan besar dan dukungan politik yang kuat untuk membalikkan hal ini.

Kerjasama pendanaan dengan mitra penelitian luar negeri bersama peneliti dalam negeri perlu didorong, terutama untuk penelitian skala besar dan tahun jamak, yang diharapkan berdampak besar bagi pemajuan sains biodiversitas Indonesia. Sebagai contoh adalah pendanaan Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) untuk penelitian antara Universitas Goettingen dengan

Institut Pertanian Bogor dan Universitas Tadulako, Sulawesi Tengah, dalam kajian perubahan pola biodiversitas di lanskap tropis Sulawesi, yang berubah untuk kasus sejumlah tanaman, artropoda, dan vertebrata. Komunitas biodiversitas relevan yang dikaji termasuk rotan, briofita, serangga, herbivora, semut, parasitoid, laba-laba, lebah, kumbang, kupu-kupu, burung, amfibi, reptil, dan tikus, serta implikasi sosial-ekonomi dari perubahan lanskap terhadap komunitas ini (lihat Clough *et al.* 2010). Mobilisasi pendanaan bersama untuk penelitian skala besar dan tahun jamak akan semakin relevan untuk menopang kajian-kajian strategis dan berbiaya mahal, seperti kajian biodiversitas di lingkungan ekstrem seperti laut dalam.

Prakarsa internasional atau regional dalam konservasi biodiversitas dapat dijadikan modal dalam memobilisasi pendanaan untuk kegiatan riset biodiversitas, selain kegiatan konservasi keanekaragaman hayati. Akan tetapi perlu dicatat bahwa menjadi bagian dari prakarsa-

prakarsa semacam itu tidak serta-merta menjamin mobilisasi pendanaan untuk kegiatan riset dan konservasi. Mobilisasi pendanaan membutuhkan waktu, misalnya sampai syarat-syarat pemungkin (*enabling conditions*) tersedia.

Prakarsa Heart of Borneo (HoB) yang mencakup kawasan bernilai konservasi tinggi di Kalimantan dapat dijadikan contoh (Van Paddenburg 2012). Peningkatan belanja langsung di sektor kehutanan dari kabupaten yang menjadi bagian Heart of Borneo belum signifikan. Di tingkat lokal, pembiayaan kegiatan konservasi biodiversitas terestrial sektor publik lazimnya berada di belanja sektor kehutanan. Dengan kata lain, menjadi bagian atau tidak dari prakarsa Heart of Borneo belum memengaruhi belanja sektor kehutanan sebuah kabupaten di dalam kawasan Heart of Borneo. Keadaan pendanaan seperti ini dapat membatasi kemampuan dalam melaksanakan atau mendukung kegiatan riset biodiversitas pada skala lokal.

## Universitas Riset

“Sebagian besar ekonomi masa depan lahir di berbagai laboratorium universitas riset.”—Laporan European Molecular Biology Organization (EMBO 2007)

Universitas riset dapat didefinisikan sebagai universitas yang kegiatan utamanya melakukan riset berkelas dunia yang ditandai dengan besarnya jumlah mahasiswa pascasarjana, kolaborasi dengan ilmuwan internasional dalam skala yang substantif, serta praktik keunggulan dalam berbagai lini aktivitasnya. Di negara maju, universitas riset menghimpun bakat-bakat terbaik dari seluruh dunia untuk mengembangkan suatu ide dan gagasan riset garda depan.

Universitas riset adalah aset nasional yang vital dalam menentukan masa depan sebuah bangsa, salah satu pilar utama ekonomi berbasis ilmu pengetahuan (NSF 2012). Universitas riset merupakan sumber utama keahlian berkualitas tinggi yang dibutuhkan dalam pembangunan serta sebagai mesin pencipta ilmu

pengetahuan untuk menjawab berbagai tantangan, kebutuhan masyarakat, dan ketidakpastian masa depan.

Untuk mendukung riset dan inovasi biodiversitas demi meraih daya saing kompetitif, Indonesia membutuhkan sumber daya manusia yang terdidik. Dalam dunia yang berubah cepat, universitas riset adalah bagian mendasar dari infrastruktur pendidikan guna memenuhi kebutuhan ini.

Universitas riset memiliki peran unik dan tak tergantikan dalam lanskap pendidikan. Selain menghasilkan penelitian dan memberikan beasiswa, universitas riset juga melakukan pengembangan ekonomi dan bantuan teknis untuk komunitas, negara, dan bangsa. Sementara lembaga lain mungkin menangani kebutuhan ini secara individual, universitas riset menjawab kebutuhan ini bersama-sama secara efektif, efisien, dan semurah mungkin.

Universitas riset memulai penelitian

mendasar yang mendorong penemuan ilmiah dan teknologi. Universitas riset menghasilkan sumber daya manusia yang mumpuni, memiliki daya analisis yang kuat serta adaptif dan kreatif terhadap perubahan. Universitas riset sekaligus memperkuat budaya ilmiah di perguruan tinggi. Mereka mendidik dan melatih tenaga kerja terampil masa depan serta mempersiapkan pengajar di sekolah. Mereka melengkapi generasi pemimpin berikutnya dengan pengetahuan, keterampilan, dan empati untuk memimpin dalam konteks abad ke-21. Akhirnya yang paling penting, universitas riset adalah pelayan dan repositori pengetahuan manusia.

Wageningen University and Research (WUR) di Belanda adalah salah satu contoh universitas riset dengan fokus dan perhatian kuat pada lingkungan hidup, pertanian, kehutanan, maupun kelautan. WUR menjadi salah satu pusat riset terkait lingkungan hidup kelas dunia, tempat peneliti dari beraneka bangsa meneliti berbagai aspek lingkungan hidup, mengembangkan penelitian lintas disiplin terkait lingkungan hidup dan memanfaatkan

sains garda depan di berbagai bidang untuk pemeliharaan dan pemanfaatan lingkungan hidup. Termasuk dalam pengembangan studi mengenai ekonomi sirkular yang menyeimbangkan kepentingan ekologi, sosial dan ekonomi. Netherlands Institute of Ecology (NIOO) adalah salah satu lembaga di bidang lingkungan hidup dalam lingkup WUR yang bukan saja menjadi lembaga penelitian terkemuka tetapi bahkan mengembangkan percontohan sebuah lembaga dengan pendekatan ekonomi sirkular di mana tak ada bahan yang terbuang, tetapi semua diproses kembali menjadi energi. WUR dan NIOO di Belanda telah menginspirasi banyak orang di negeri itu dan dunia internasional mengenai penelitian garda depan dan lintas disiplin dalam bidang lingkungan hidup yang berguna bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan masyarakat.

## Riwayat Amerika Serikat Bertransformasi Menjadi Negara Adidaya

“...tanpa kemajuan sains, tak ada pencapaian yang dapat menjamin kesehatan, kemakmuran, dan keamanan sebagai bangsa di dunia modern...” V. Bush, *Science. The Endless Frontier*, 1945.

Pada 1944, satu tahun sebelum Perang Dunia II berakhir, Presiden Roosevelt meminta rekomendasi dari Dr. Vannevar Bush, ketika itu Direktur Kantor Penelitian Ilmiah dan Pengembangan, untuk mentransformasikan keunggulan sains dan teknologi perang ke tujuan damai pascaperang bagi kemajuan Amerika Serikat. Surat Presiden Roosevelt menanyakan empat hal penting, yakni:

1. Bagaimana ilmu pengetahuan yang bersifat sangat rahasia selama perang dapat segera dibuka ke publik/dunia untuk kemajuan bersama;
2. Bagaimana kegiatan riset kedokteran tetap dapat dilanjutkan untuk memerangi penyakit;
3. Bagaimana pemerintah dapat membantu pelaksanaan riset oleh organisasi publik dan privat;
4. Apakah dapat mengusulkan program untuk menghasilkan bibit-bibit generasi muda mumpuni di bidang sains untuk dapat terus memajukan dunia riset berkualitas tinggi Amerika Serikat di masa depan?

Jawaban Dr. Bush tertuang dalam dokumen berjudul *Science, The Endless*

*Frontier—A Report to the President by Vannevar Bush, Director of the Office of Scientific Research and Development*, July 1945, yang disarikan sebagai berikut:

1. Perang terhadap penyakit. Untuk terus mempertahankan kemajuan di bidang kedokteran, pemerintah perlu memberikan dukungan pendanaan untuk penelitian dasar kedokteran di berbagai fakultas kedokteran dan universitas.
2. Keamanan nasional. Melanjutkan riset sains dan teknologi kemiliteran dalam kondisi damai dengan keterlibatan dan kontrol oleh ilmuwan sipil melalui organisasi yang bekerja dekat dengan Angkatan Darat dan Angkatan Laut AS, namun didanai oleh Kongres dan memiliki kekuatan jelas untuk menginisiasi riset militer yang akan membantu dan memperkuat militer.
3. Menciptakan kesejahteraan umum. Untuk menciptakan lapangan kerja, harus mendorong lahirnya berbagai perusahaan dan industri yang menghasilkan produk yang lebih baik dengan harga terjangkau. Untuk itu diperlukan riset ilmiah mendasar sebagai modal ilmiah dengan cara menghasilkan tenaga kerja terlatih di bidang sains sebagai motor utama penciptaan ilmu pengetahuan baru dan aplikasinya untuk berbagai tujuan praktis. Memperkuat pusat-pusat riset dasar terutama di perguruan tinggi dan

lembaga penelitian yang mengabdikan diri untuk riset untuk memperluas ilmu pengetahuan garda depan, menciptakan sistem yang kondusif untuk penciptaan ilmu pengetahuan baru dan kurangnya tekanan untuk menghasilkan sesuatu yang berwujud dalam jangka waktu singkat. Cara paling penting pemerintah untuk dapat mempromosikan riset industri dengan meningkatkan aliran ilmu pengetahuan baru melalui dukungan atas riset dasar, dan membantu perkembangan bakat-bakat baru dalam dunia sains. Dibutuhkan lembaga baru untuk mendukung program-program riset jangka panjang dengan dana stabil. Lembaga ini harus menghargai kebebasan berpikir di mana kebijakan kontrol internal, personal, dan metode, serta cakupan riset diserahkan kepada institusi tempat riset tersebut dilaksanakan. Lembaga tersebut bertanggung jawab penuh secara langsung kepada presiden dan melalui presiden, program-programnya dipertanggungjawabkan kepada Kongres.

Inilah cikal bakal lahirnya berbagai lembaga pendanaan riset dasar di Amerika Serikat yang telah meletakkan dasar bagi kelanjutan kemajuan sains dan teknologi di negara tersebut. Lebih dari delapan dekade sebelumnya,

meski di tengah kecamuk perang sipil, pada 1862 Kongres Amerika mengeluarkan kebijakan strategis, suatu terobosan besar untuk mendukung sebesar-besarnya kemitraan antara negara federal, negara bagian, institusi pendidikan tinggi, dan industri, guna menciptakan universitas yang bertumpu pada pendidikan yang memenuhi kebutuhan praktis serta riset yang menopang Amerika Serikat menjadi pemimpin dunia di bidang pertanian dan industri. Hasil dari keputusan besar ini antara lain berupa Revolusi Hijau di bidang pertanian yang menyediakan pangan pada penduduk dunia dan industri manufaktur yang menjadi mesin ekonomi Amerika Serikat pada abad ke-20. Ini semua mengantarkan Amerika Serikat pada demokrasi, serta terciptanya kelas menengah terdidik yang menjadikannya bertransformasi menjadi salah satu negara terkuat di dunia.



Model universitas riset dalam cerita tersebut sebenarnya berasal dari masa Reformasi Prusia tahun 1809. Seorang politisi pendidikan Prusia, Wilhelm von Humboldt, mendirikan universitas riset pertama di dunia yang kini bernama Humboldt University of Berlin, dengan dukungan Raja Friedrich Wilhelm III. Universitas ini sangat intensif melakukan riset sains serta menyatukan prinsip utama pengajaran dan riset dalam kegiatan para staf akademiknya. Universitas riset ini kemudian menjadi model universitas serupa di seluruh Eropa dan di Amerika Serikat.

Setelah Perang Dunia II usai, seperti diuraikan di atas, Kongres lagi-lagi mengambil terobosan besar berupa kebijakan strategis untuk sekali lagi memperkuat kemitraan tersebut. Kongres melakukan investasi besar di bidang riset mendasar dan pendidikan pascasarjana yang berbasis riset untuk membangun universitas riset terkemuka di dunia, memasok lulusan yang terdidik, serta penguatan inovasi sains dan teknologi. Kemitraan riset yang besar ini telah memungkinkan Amerika Serikat memenangkan Perang Dingin, menempatkan jejak kaki

manusia untuk pertama kali di bulan, serta melakukan revolusi sains dan teknologi dalam eksplorasi ke dalam tubuh sendiri berupa penyusunan genom manusia secara menyeluruh, yang telah mengantar pada berbagai kemajuan di bidang kedokteran dan kesehatan masyarakat. Selain itu, berbagai teknologi baru seperti komputer, internet, GPS, prosedur medis, serta farmasi telah berkontribusi secara signifikan dalam kemajuan dan kesejahteraan masyarakat Amerika Serikat dan dunia (National Research Council 2012).

Terobosan kebijakan dalam menciptakan universitas riset serta perangkat infrastruktur riset seperti lembaga pendanaan otonom sebagai aset nasional telah membawa Amerika Serikat menjadi negara dengan ekonomi dimotori oleh inovasi. Negara ini unggul dalam pencatutan ide dan gagasan, produk, serta proses menghasilkan industri baru dan lapangan kerja.

Universitas riset telah menjadikan perguruan tinggi Amerika Serikat sebagai simpul pertemuan bakat-bakat ilmiah terbaik dunia, sebuah reputasi yang dibangun dengan

desain besar yang strategis. Universitas riset adalah aset nasional, rumah bagi penciptaan ilmu pengetahuan dan kapabilitas serta kapasitas SDM yang mumpuni, yang menjadi tumpuan bagi dunia bisnis, pemerintah, maupun masyarakat umum untuk menghadapi berbagai ketidakpastian di masa depan.

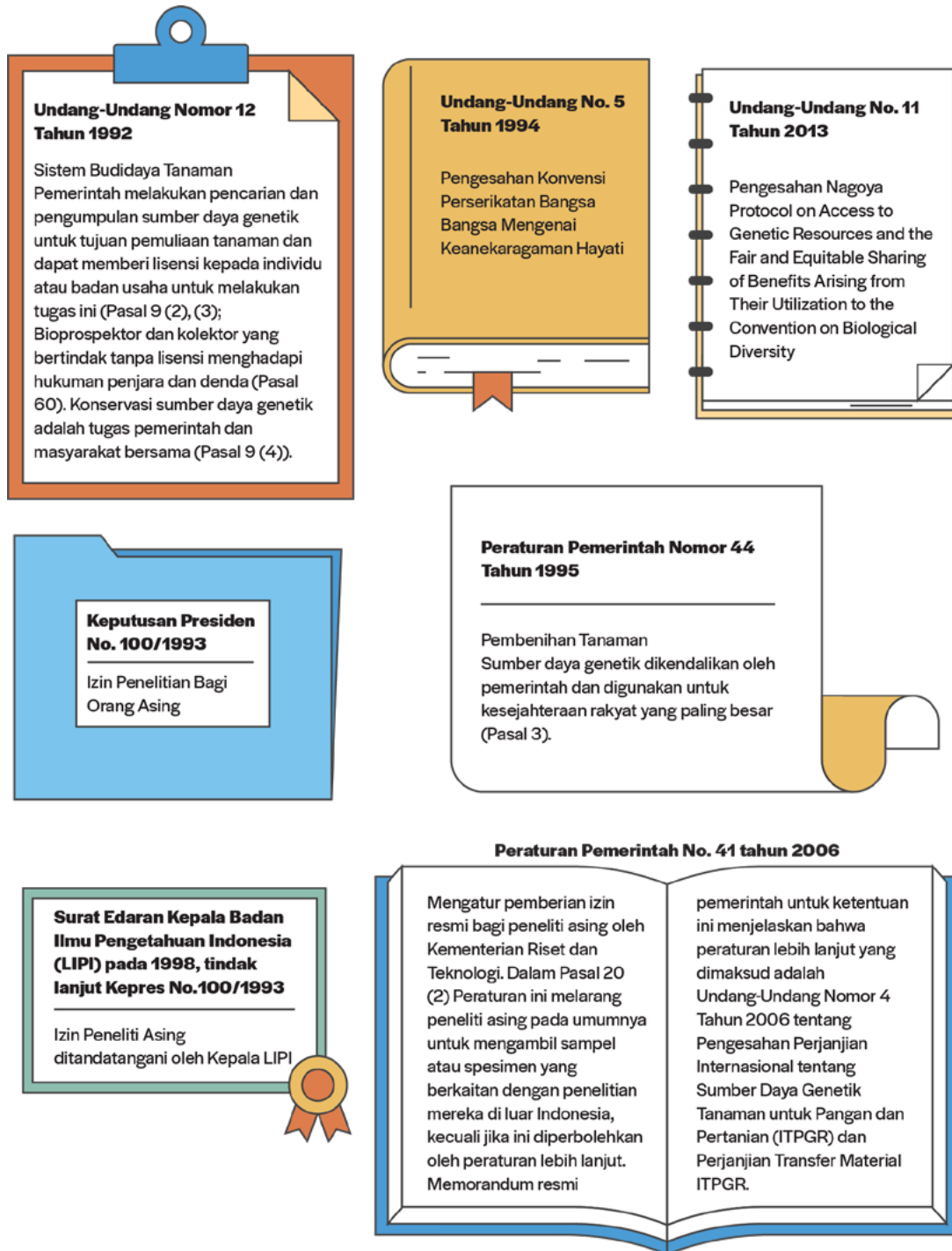
Dalam tingkatan yang berbeda, Universitas Mahidol di Thailand dan Australian National University di Canberra, Australia, merupakan

universitas riset yang didirikan dengan program awal hanya berupa studi pascasarjana yang berfokus pada riset. Indonesia semestinya dapat belajar dari negara-negara tersebut untuk menyiapkan diri melakukan transisi ekonomi dengan menjadikan megabiodiversitas serta kekayaan alamnya sebagai modal utama pembangunan ekonomi berbasis sains, teknologi, dan inovasi untuk menjadikannya bertransformasi sebagai negara maju.

## Kolaborasi Internasional dan Berbagi Manfaat Bersama

Tak ada satu laboratorium atau kelompok riset di negara maju sekalipun yang cukup canggih untuk mencakup semua aspek topik riset biodiversitas yang kompleks. Kolaborasi riset merupakan keharusan dalam sains modern. Untuk Indonesia yang kaya dengan biodiversitas tapi relatif miskin dalam sains dan teknologi, kerja sama internasional menjadi suatu keniscayaan. Melalui kerja sama internasional, transfer ilmu pengetahuan dan teknologi serta penguatan budaya ilmiah dapat dipercepat.

Di satu pihak, peran kuat pemerintah Indonesia dalam konservasi dan eksploitasi sumber daya alam diabadikan dalam Pasal 33 (3) Undang-Undang Dasar, yang mengatur bahwa "bumi, air, dan kekayaan alam yang terkandung di dalamnya dikuasai oleh negara dan dipergunakan untuk sebesar-besar kemakmuran rakyat". Peran kuat negara juga tercermin dalam sejumlah perangkat undang-undang pendukung dan aturan turunan untuk memastikan perlindungan biodiversitas seperti sumber daya genetik (Tabel 6.2).



Tabel 6.2 Undang-undang pendukung dan aturan turunan berkaitan dengan sumber daya genetik.

Pada dasarnya, pemerintah bertugas untuk mencari, mengumpulkan, menggunakan dan melakukan konservasi sumber daya genetik tanaman. Namun warga negara Indonesia atau badan usaha dapat diberi lisensi untuk pencarian dan pengumpulan. Pencarian dan pengumpulan sumber daya genetik hanya diperbolehkan untuk tujuan pemuliaan tanaman dan dapat dilakukan oleh pihak asing hanya dalam rangka kolaborasi penelitian dengan mitra kerja Indonesia. Ekspor sumber daya genetik hanya diperbolehkan untuk spesies tertentu dan untuk tujuan penelitian dalam pemuliaan tanaman, di mana pertukaran sumber daya semacam itu dipertimbangkan. Akses peneliti dan institusi asing bergantung pada izin penelitian dan isinya.

Keseimbangan yang baik antara kepentingan nasional dan kemajuan bersama umat manusia sangat diperlukan. Begitu pula perangkat regulasi yang mendorong tumbuhnya kerja sama lintas sektoral dalam skala internasional untuk bersama-sama menjawab berbagai tantangan global seperti kerusakan ekosistem, ancaman kepunahan berbagai spesies, ketidakpastian iklim,

dan sebagainya. Untuk dapat memanfaatkan megabiodiversitas Indonesia, riset dasar yang dapat dipercepat dengan kerja sama ilmuwan internasional mutlak perlu. Pencarian senyawa berharga dan bernilai komersial merupakan aktivitas transnasional saling membutuhkan. Aktivitas ini kerap kali melibatkan institusi di negara kaya sumber genetik dengan institusi dari negara kaya teknologi dan kemampuan komersialisasi sumber genetika.

*Access and Benefit Sharing (ABS)* disusun untuk menjamin kesetaraan antara berbagai pihak yang bermitra dalam meneliti dan memanfaatkan biodiversitas. United Nations Convention on Biological Diversity (UNCBD) yang diadopsi pada 1992 merupakan instrumen internasional pertama yang bukan hanya memiliki tujuan konservasi dan penggunaan biodiversitas yang berkelanjutan, tetapi juga pembagian manfaat yang adil dan merata dari penggunaan biodiversitas tersebut. Indonesia mengesahkan UNCBD pada 1994 dalam bentuk Undang-Undang No. 5 Tahun 1994. Selanjutnya melalui Undang-Undang No. 11 Tahun 2013 tentang Pengesahan *Nagoya Protocol*

*on Access to Genetic Resources and the Fair and Equitable Sharing of Benefits Arising from Their Utilization to the Convention on Biological Diversity*, Indonesia memastikan bahwa ABS pada sumber daya genetik dan pembagian keuntungan yang adil dan seimbang telah memiliki dasar hukum yang kuat.

Praktik penerapan ABS ini jauh dari sederhana. Di antaranya karena dalam bioprospeksi, yakni upaya eksplorasi biodiversitas untuk mendapatkan sumber daya genetik dan biokimia yang bernilai komersial, pengetahuan tradisional yang dimiliki oleh masyarakat adat dan masyarakat lokal adalah informasi yang memberikan petunjuk tentang sifat sumber genetik yang berpotensi dikomersialisasikan. Dalam hal ini ABS adalah alat untuk mempromosikan keadilan di tingkat antarnegara, sementara peran pengetahuan tradisional ini pun menuntut adanya peraturan di tingkat pemerintah daerah dan pusat. Masyarakat adat dan masyarakat lokal pemilik pengetahuan ini berada di dalam suatu negara, dan hak mereka, yang tunduk pada norma hak asasi manusia internasional, diatur oleh undang-undang nasional.

Peraturan yang memengaruhi penerapan, *prior informed consent*, dan prosedur pembagian keuntungan dirancang untuk menjamin transparansi, partisipasi pemangku kepentingan, dan pembagian manfaat yang adil. Namun, hukum Indonesia memiliki prosedur yang relatif panjang dan rumit. Prinsip kehati-hatian seperti yang tercermin dalam aturan-aturan tersebut memang diperlukan, tapi aturan yang terlalu banyak dan cenderung tumpang-tindih akan menghambat upaya kolaborasi internasional dalam melakukan penelitian-penelitian terkait biodiversitas. Hal ini membuat Indonesia kurang kompetitif dibandingkan dengan negara-negara tetangga, karena pengguna (dalam hal ini negara-negara maju dengan sains dan teknologi yang tinggi) akan lebih memilih untuk berinvestasi di negara-negara yang relatif "tidak rumit" aturan-aturannya. Kita perlu menyeimbangkan aspek kehati-hatian dengan aspek perlunya mendukung kolaborasi internasional dalam mengembangkan penelitian-penelitian mengenai biodiversitas kita.

Walaupun peran mutlak kolaborasi internasional dalam penelitian

biodiversitas telah disadari sepenuhnya, banyak keluhan dari ilmuwan Indonesia maupun mitra internasionalnya tentang sulitnya menjalin kerja sama. Keluhan yang sering terdengar antara lain birokratisasi yang berlebihan untuk mendapatkan izin penelitian, melibatkan banyak sekali lembaga dan kantor pemerintah pusat dan daerah; sulitnya menemukan mitra

kerja sama yang setara karena banyak dari ilmuwan Indonesia telah terbelenggu oleh beban administrasi dalam jangka waktu panjang sehingga telah tertinggal dalam perkembangan ilmu pengetahuan terkini; dan banyak penelitian yang tidak jadi dijalankan hanya karena dianggap terlalu sensitif (Shetty *et al.* 2014).

## Rumah Kliring

Alam, lingkungan, beserta megabiodiversitas Indonesia adalah *public goods* yang merupakan bagian ekosistem global. Untuk itu seyogianya dikelola dan dimanfaatkan untuk menciptakan kemakmuran bersama umat manusia. Isu megabiodiversitas sangatlah kompleks. Pendekatan lintas sektoral dalam pengelolaan dan pemanfaatan biodiversitas merupakan sebuah keharusan.

Kegiatan terkait biodiversitas Indonesia, baik riset maupun pengelolaan biodiversitas seringkali masih dijalankan oleh berbagai pihak secara terpisah, terpecah, dan belum

terpadu. Pada tataran cara pandang, biodiversitas cenderung didekati, diorganisasikan, dan distrukturkan sebagai sebuah sektor, padahal biodiversitas bersifat lintas sektor. Pada tataran tata cara, mekanisme yang ada membatasi pihak yang satu dengan yang lain untuk berbagi dan bertukar informasi. Sekat-sekat ini dapat ditemukan di banyak tempat seperti antarkementerian/ lembaga, antar universitas, antar lembaga penelitian, antar kelompok masyarakat sipil yang bergerak di, atau mendalami, biodiversitas.

Bahkan sekat-sekat ini dapat pula ditemukan dalam sebuah institusi,

intrakementerian/lembaga. Rasa memiliki yang terlalu besar dan ego sektoral menjadi pemicu utama munculnya batasan-batasan tersebut, sekaligus memperuncingnya. Cara pandang ini secara signifikan menjadi penghambat upaya pengarusutamaan dan pelaksanaan riset dan pengelolaan biodiversitas Indonesia.

Salah satu terobosan untuk menjembatani sekat-sekat tersebut adalah melalui mekanisme informal berbentuk rumah kliring. Disebut mekanisme informal karena struktur dan proses dari rumah kliring ini didorong oleh kebutuhan-kebutuhan untuk mengatasi persoalan biodiversitas secara terpadu. Proses dan struktur yang muncul merupakan hasil dari nilai-nilai yang muncul dari para peserta dan berbasis konsensus bersama. Rumah kliring tidak memiliki regulasi formal. Struktur dan prosesnya sedemikian rupa sehingga memungkinkan terjadi pertukaran informasi secara vertikal dan horizontal tanpa memandang asal institusi, eselon, dan hierarki, baik di lembaga publik maupun swasta. Rumah kliring ini menunjukkan *institutional fit* (Young 2002) di

mana pengaturan-pengaturan rumah kliring sepadan dengan persoalan yang hendak diselesaikan, yakni penanganan biodiversitas Indonesia tanpa sekat dan bersifat lintas sektor serta lintas pihak. Rumah kliring lebih memungkinkan untuk melampaui batas-batas institusi, termasuk mandat dan yurisdiksi dan pergelutan kuasa internal dibandingkan proses dan mekanisme formal yang ada saat ini. Dengan demikian, rumah kliring ini dapat berperan sebagai simpul penghubung pengetahuan sekaligus sarana mengurai kemandekan akibat proses dan mekanisme formal.

Sejumlah fungsi yang mungkin diperankan suatu rumah kliring, antara lain, berbagi pengetahuan secara lintas disiplin (intra dan inter) ilmu alam, sosial, dan humaniora; tukar-menukar informasi dan data melalui alur yang tidak kaku dan formal; membahas rancangan dan rumusan kebijakan maupun kebijakan yang ada terkait biodiversitas Indonesia baik darat maupun laut; mendorong upaya akumulasi pengetahuan, misalnya melalui *evidence summit* atau *call for evidence* untuk biodiversitas Indonesia, serta ikut mengupayakan

kelahiran dan pengelolaan jurnal yang menjadi wadah bagi literatur abu-abu biodiversitas Indonesia; melahirkan para kampiun masa depan yang memiliki kemampuan mengapresiasi kompleksitas dan signifikansi biodiversitas Indonesia; menjembatani proses pendanaan dan kolaborasi penelitian dan penanganan biodiversitas Indonesia, termasuk kolaborasi internasional mengingat biodiversitas Indonesia merupakan properti publik global.

Salah satu unsur sangat penting adalah bahwa sebuah rumah kliring perlu difasilitasi oleh sekelompok tokoh atau pihak yang dihargai para peserta karena dedikasi dan integritas mereka yang tinggi bagi biodiversitas Indonesia, baik dari segi pengetahuan maupun tindakan. Lebih dari itu, mereka dianggap netral oleh para peserta dan dipandang mampu merangkul sebanyak mungkin pihak, sehingga dapat menjadi fasilitator bagi semua. Kepemimpinan tersebut merupakan kunci bagi keberhasilan rumah kliring ini.

Dalam derajat tertentu, cikal bakal rumah kliring telah muncul di Indonesia. Sebagai contoh, pada

masa awal penyusunan dokumen IBSAP, proses yang berlangsung berhasil mempertemukan lebih dari 100 organisasi biodiversitas. Kita pernah pula memiliki Lembaga Biologi Nasional, terutama sebelum lembaga ini distrukturkan seperti sekarang ini. Hari-hari ini kita juga menyaksikan organisasi-organisasi besar yang bergerak dalam konservasi lingkungan dan pengelolaan sumber daya di Indonesia mengorganisasikan diri ke dalam Forum Komunikasi Konservasi Indonesia (FKKI), yang antara lain menjajaki kemungkinan pertukaran informasi dan data antar organisasi. Modalitas seperti ini dapat dijadikan pembelajaran sekaligus rujukan bagi unsur-unsur penyusun dan pemungkin rumah kliring untuk biodiversitas Indonesia.



# VII

## REKOMENDASI

*Lihatlah lebih dekat ke alam, maka kau akan memahami segalanya lebih baik*  
– Albert Einstein



Paradigma Indonesia kaya yang hanya menekankan kuantitas kekayaan alam, termasuk biodiversitas, melenakan dan berujung pada eksploitasi alam untuk tujuan ekonomi jangka pendek. Di tengah keberlimpahan ini, kita miskin ilmu pengetahuan, fakir teknologi, dan minim modal sosial sehingga kekayaan alam dan

biodiversitas kita belum secara optimal dimanfaatkan untuk kesejahteraan rakyat dan kemajuan bangsa. Saatnya kita mengambil langkah strategis dengan paradigma baru berbasis sains dan teknologi untuk mengelola biodiversitas secara lebih cerdas, produktif, dan berkelanjutan.

## Prioritas Investasi Nasional dalam Pemanfaatan dan Pengelolaan Biodiversitas

“Dalam bidang lingkungan hidup dan biodiversitas, di mana pemerintah sebaiknya berinvestasi?” Itulah pertanyaan penting yang perlu kita jawab. Sejumlah prioritas investasi nasional memiliki level tantangan dan kebutuhan investasi berbeda yang mencerminkan ambisi dan komitmen politik para pengambil kebijakan. Terdapat tiga kegiatan utama yang dapat dijadikan prioritas investasi nasional berbasis sumber daya hayati, yaitu ekowisata, bioprospeksi untuk penemuan obat dan bioenergi, serta eksplorasi laut dalam. Ketiga prioritas investasi ini juga memiliki potensi dampak

ekonomi berbeda, yakni sedang, besar, dan sangat besar.

### 1. Pengembangan Ekowisata Berbasis Sains

Pengembangan ekowisata memang telah dirintis oleh pemerintah, namun dukungan sains dan teknologi akan menghasilkan dampak ekonomi yang lebih besar dan berkesinambungan. Indonesia memiliki banyak sekali spesies endemik dan kharismatik yang dapat dikelola sebagai paket ekowisata dunia. Selain komodo dan orang utan, kita juga memiliki babirusa

dan berbagai macam burung khas Indonesia. Burung maleo, misalnya, memiliki keunikan biologis yang dapat dikemas menarik. Telur burung ini berukuran hingga lima kali lipat telur ayam dan dapat menetas dalam timbunan pasir tanpa dierami. Seluk-beluk burung maleo ini dan upaya konservasi spesies kharismatik dengan pendekatan sains dan teknologi dapat menarik segmen khusus wisatawan pecinta sains dan lingkungan.

Potensi ekowisata kita sangat besar dan seharusnya dikelola secara lebih optimal sebagaimana Cina sukses mengembangkan dan memperkenalkan panda kepada dunia. Cina sukses mengemas upaya konservasi panda menjadi paket ekowisata. Kita pun dapat melakukan hal serupa. Konservasi spesies endemik dan kharismatik seperti komodo, anoa, babirusa, dan berbagai jenis burung dapat dikemas menjadi industri ekowisata. Pemaparan secara menarik dengan pendekatan berbagai bidang sains dalam upaya konservasi spesies-spesies kharismatik dapat menjadi daya tarik wisatawan dengan minat khusus dan daya beli tinggi. Jumlah wisatawan jenis ini semakin besar,

khususnya dari negara-negara maju. Pendekatan komprehensif yang memadukan ekowisata dengan upaya konservasi dan pusat riset biodiversitas dapat meningkatkan kesadaran, penghargaan, serta kepedulian terhadap alam, nilai-nilai peninggalan sejarah dan budaya setempat (*eco-heritage*). Selain membawa kepada kesejahteraan masyarakat lokal, upaya ini sekaligus dapat menguatkan sains, teknologi, dan budaya ilmiah Indonesia.

Kita juga memiliki potensi besar dalam pengembangan wisata *eco-heritage*. Kekayaan megabiodiversitas Indonesia telah menginspirasi lahirnya berbagai terobosan besar ilmu pengetahuan dunia. Ilmuwan-ilmuwan legendaris dunia menghasilkan *magnum opus* dan meninggalkan jejak berharga di Indonesia. Pada abad ke-19, Alfred Russel Wallace melahirkan teori evolusi dan biogeografi modern, Franz Junghuhn merintis upaya aklimatisasi tanaman, dan Eugene Dubois menemukan fosil *Homo erectus* di Sangiran. Jauh di abad ke-17, Rumphius merintis lahirnya taksonomi dan botani tropis dari Ambon. Warisan-warisan mereka dapat dihidupkan dan dikelola

sebagai aset wisata bernilai ekonomi tinggi, tidak kalah dari industri ekowisata Galapagos yang mengandalkan jejak Charles Darwin.

Keterpaduan dukungan pemerintah baik pusat maupun daerah, perguruan tinggi dan lembaga riset lingkungan hidup, sektor swasta, dan masyarakat setempat menjadi sangat penting. Karena itu hal yang mendesak dilakukan adalah pemetaan potensi ekowisata, pemetaan kelembagaan beserta kekuatan dan kelemahannya, pemetaan koordinasi antarlembaga, serta pemetaan potensi dan kendala pendanaan untuk pengembangan ekowisata.

## 2. Bioprospeksi untuk Penemuan Obat dan Energi

Indonesia memiliki lebih dari 30.000 tanaman obat, 4.000 di antaranya memiliki rekam jejak turun-temurun sebagai bahan pembuat jamu. Namun untuk obat, hampir seluruh bahan bakunya masih diimpor. Indonesia juga dikaruniai keragaman mikroorganisme yang dapat mengkonversi energi matahari menjadi sumber energi alternatif. Investasi untuk bioprospeksi dapat

mendongkrak dampak ekonomi dari penemuan obat dan sumber bioenergi.

Kekayaan alam Indonesia mencakup lebih dari 10% tanaman dunia yang dapat menjadi sumber utama obat-obatan. Pasar obat tradisional pun tumbuh cukup pesat (Kementerian Perindustrian 2017). Saintifikasi jamu selaku upaya modernisasi guna meningkatkan nilai ekonomi telah diatur dalam peraturan Kementerian Kesehatan sebagai pembuktian ilmiah melalui penelitian berbasis pelayanan kesehatan.

Pemanfaatan sains dan teknologi terkini, dikombinasikan dengan pengetahuan dari naskah-naskah kuno dapat membuka jalan bagi pengembangan obat-obat herbal yang sudah distandarkan, fitofarmaka, hingga penemuan zat aktif untuk obat baru. Langkah ini bahkan telah membuahkan hadiah Nobel Kedokteran yang diraih ilmuwan Cina, Tu Youyou, pada 2015, atas penemuan artemisinin sebagai antimalaria. Penelitian tersebut bermula dari pengumpulan dan pencarian ribuan resep ramuan herbal berumur 1.700 tahun untuk melacak zat-zat yang berpotensi memiliki sifat antimalaria.

Perkembangan sains data dan teknologi informasi dapat mempercepat upaya pencarian obat baru dari naskah-naskah kuno. Upaya ini telah dimulai oleh Mayo Clinic di Amerika Serikat yang memanfaatkan karya akbar Rumphius, *Herbarium Amboniense*, untuk mengembangkan antibakteri dari ekstrak pohon atun (*Atuna racemosa*). Kitab yang ditulis Rumphius pada abad ke-17 tersebut mencatat tanaman-tanaman obat tradisional di Ambon berikut khasiatnya.

Pengumpulan data berskala nasional secara sistematis dan berkesinambungan dari naskah-naskah kuno dan tradisi lisan Nusantara berpotensi menjadi lumbung pengetahuan awal tentang sistem pengobatan tradisional dari berbagai suku di Indonesia. Pengetahuan dan kearifan lokal masyarakat dalam bentuk tradisi lisan perlu didokumentasikan sebelum punah. Upaya pencarian obat baru lewat pendekatan seperti ini akan berjalan lebih cepat lagi berkat pesatnya perkembangan sains dan teknologi seperti kecerdasan buatan. Peningkatan kapasitas dalam penapisan dan klasifikasi

tanaman obat ini perlu didukung dengan kemampuan yang mumpuni dalam bidang fitokimia, farmakologi molekuler, uji praklinik dan klinik, serta translasi hasil studi menjadi obat. Studi farmakogenetik dan farmakogenomik manusia Indonesia dengan etnik yang beragam juga sangat diperlukan untuk mengetahui respons tubuh terhadap obat, terkait efektivitas dan keamanannya. Salah satu tantangan kesehatan yang kita hadapi adalah munculnya resistensi agen penyakit terhadap obat yang ada, munculnya kuman dan penyakit baru serta berbagai penyakit metabolisme terkait gaya hidup yang juga terus menuntut pencarian alternatif obat baru.

Di bidang energi, Indonesia dan beberapa negara di Asia Tenggara telah mencoba mengembangkan bioenergi berbasis biodiesel dan bioetanol. Namun sejumlah studi menunjukkan upaya itu layu sebelum berkembang karena harga yang tak bersaing, kompetisi dengan pertanian untuk pangan, dan isu alih fungsi lahan. Idealnya, kita membutuhkan sumber energi terbarukan yang bersifat *climate positive*, yakni menghasilkan energi sekaligus mengurangi jumlah karbon

dari atmosfer. Indonesia sebagai negara kepulauan terbesar di dunia memiliki potensi mengembangkan bioenergi dari fotosintesis mikroalga guna menyerap energi matahari menjadi biomassa, bioetanol, atau bahkan *carbon-negative hydrogen*. Meningkatkan efisiensi dan kinerja fotosintesis merupakan tantangan besarnya. Namun, perkembangan ilmu pengetahuan saat ini memungkinkan untuk mendesain ulang fotosintesis secara substantial.

Untuk mencapai tujuan ini diperlukan sistem terpadu antar pemangku kepentingan, termasuk badan pemerintahan, komunitas lokal dan global, lembaga riset, lembaga hukum, organisasi kesehatan, dan industri. Hal serupa juga dibutuhkan terkait bioprospeksi untuk bionergi. Integrasi ini diperlukan untuk mengoptimalkan upaya pemanfaatan potensi ekonomi biodiversitas Indonesia dalam pelacakan sumber obat-obatan dan energi baru sekaligus menjaga keberlangsungan pelestarian biodiversitas.

### 3. Eksplorasi Laut Dalam

Kedalaman samudra menyimpan misteri yang hingga kini belum

terpecahkan. Padahal 90% laut Indonesia adalah laut dalam. Inilah ruang kehidupan tanpa cahaya matahari dengan suhu amat ekstrem serta tekanan sangat tinggi. Dalam lingkungan ini aneka makhluk hidup ternyata dapat berkembang, meski sulit diterima nalar manusia. Ada yang tak bermata, ada yang sekadar pendar-endar cahaya, ada pula yang tinggal di celah gunung api bawah samudra. Belum lagi berbagai jasad renik yang hidup dan berinteraksi di sana. Pemahaman mengenai mekanisme hidup makhluk-makhluk unik nan mencengangkan ini dapat mengantar kita pada pengetahuan baru yang tak terpikirkan sebelumnya. Dasar laut juga memendam harta karun seperti mineral-mineral berharga.

Dunia misterius ini jauh lebih dekat ketimbang luar angkasa. Namun kita memiliki pengetahuan lebih banyak mengenai ruang angkasa dibanding laut dalam. Eksplorasi laut dalam adalah sebuah momentum yang memerlukan ikhtiar raksasa. Tantangannya memang besar, namun menjanjikan imbalan yang luar biasa. Eksplorasi laut dalam akan menyumbang pengetahuan baru, inovasi teknologi, serta potensi

keuntungan ekonomi sangat besar seperti yang terjadi pada eksplorasi ruang angkasa pada 1960-an yang dipelopori Amerika Serikat. Eksplorasi laut dalam juga sebanding dengan eksplorasi ke dalam tubuh manusia dengan menguraikan secara total informasi genetik melalui Human Genome Project. Proyek ini juga menghasilkan lompatan besar dalam dunia sains dan teknologi kedokteran dan kesehatan, beserta keuntungan ekonomi yang amat besar dari teknologi pencegahan, diagnostik, dan pengobatan hasil dari terobosan Human Genome Project tersebut. Eksplorasi laut dalam juga berpotensi besar menghasilkan

pengetahuan, inovasi, dan teknologi baru yang akan mendorong industri kimia, obat-obatan, dan energi baru. Dan di planet ini, tak ada negara lain dianugerahi laut sekaya Indonesia.

Pemetaan kekuatan dan kelemahan sumber daya manusia, kelembagaan, dan potensi pendanaan untuk mendukung ikhtiar akbar ini sangat diperlukan. Penguatan sumber daya manusia dengan mendorong lebih banyak generasi muda Indonesia untuk mempelajari laut dalam hingga tingkat doktoral serta terlibat dalam penelitian-penelitian internasional juga sangat penting.

## Mengembangkan Sains dan Teknologi untuk Biodiversitas Indonesia

Bagaimanapun, Indonesia tetap harus berinvestasi dalam sains dasar dan teknologi untuk dapat mengelola kekayaan biodiversitasnya secara lestari dan mendapatkan manfaat ekonomi sebesar-besarnya. Selain itu, diperlukan peningkatan berbagai faktor pendukung seperti ekosistem riset, kelembagaan, dan sumber daya manusia.

### Mengembangkan Sains dan Teknologi untuk Memahami Sifat-sifat Dasar Megabiodiversitas Indonesia

#### 1. Membuat Penelitian yang Lebih Komprehensif Melalui Pengembangan Observasi dan Pemodelan yang Tepat.

Pemahaman yang lebih mendalam mengenai sifat-sifat dasar

megabiodiversitas Indonesia memerlukan upaya komprehensif dari hulu hingga hilir. Sifat-sifat dasar seperti bagaimana bermacam spesies hidup bersama, saling berinteraksi dan memengaruhi satu sama lain dalam ekosistem yang dinamis, memerlukan pemantauan yang cermat dan berkesinambungan.

Di tataran hulu, pembangunan sistem pemantauan terintegrasi dapat meliputi pengembangan sensor satelit mikro dan stasiun lapang, baik di darat maupun laut. Di laut misalnya, pemantauan dapat berbasis anjungan lepas pantai ataupun terapung lainnya. Pemantauan dan pengambilan sampel di daratan dan lautan, seperti ekspedisi reguler di berbagai ekosistem hutan, pelayaran riset berkala di lokasi-lokasi yang kaya dan sensitif—seperti perairan *upwelling* dan terumbu karang—maupun dengan teknologi nirawak, sangat dibutuhkan.

Pada tataran hilir, semua data yang terkumpul dari upaya pemantauan di atas memerlukan pengolahan lanjutan berbasis grid spasial (horizontal dan vertikal) dalam beberapa level data. Hal ini memerlukan manajemen satu data

yang fokus dalam pengembangan *big data* serta layanan untuk kepentingan riset. Pada akhirnya, sistem pemantauan terintegrasi dan pusat kompilasi data lapangan dapat diasimilasi dengan pemodelan numerik tingkat tinggi. Tujuannya adalah memahami biodiversitas dan memodelkan skenario perubahan masa depan di Bumi Maritim Indonesia—variabilitas iklim, proses-proses di laut, perubahan lahan, serta sistem hidrologi.

## **2. Meningkatkan Pemahaman tentang Keseimbangan Ekosistem demi Keberlangsungan Perlindungan Spesies Endemik dan/atau Terancam Punah.**

Salah satu keunikan biodiversitas Indonesia adalah tingginya tingkat endemisitas, yaitu spesies yang hanya dapat ditemukan di Indonesia. Pola sebaran endemisitas ini pun berbeda-beda pada wilayah biogeografi yang berbeda. Setiap wilayah memiliki ragam spesies berbeda, yang seringkali terancam punah. Karena itulah penelitian-penelitian tentang peran keseimbangan ekosistem perlu dilakukan di wilayah biogeografi yang berbeda-beda ini.

Dalam hal endemisitas, misalnya, Indonesia memiliki spesies burung jelajah terbatas (< 50.000 km<sup>2</sup>) dengan jumlah tertinggi di dunia. Paparan Sunda memiliki biodiversitas tinggi namun endemisitas rendah; Kawasan Wallacea memiliki biodiversitas rendah namun endemisitas tinggi; sedangkan Paparan Sahul memiliki biodiversitas tinggi dengan endemisitas sedang. Perbedaan tingkat endemisitas ini menunjukkan perlunya prioritas penentuan wilayah dalam penelitian-penelitian yang akan dilakukan jika sumber daya yang dimiliki terbatas. Bias data juga terjadi untuk spesies yang terancam punah. Kebanyakan data berasal dari fauna dan flora daratan, karena penelitian-penelitian lebih banyak dilakukan pada jenis organisme daratan ini. Perlu eksplorasi lebih intensif untuk organisme lain di habitat perairan yang kemungkinan juga terancam punah.

## **3. Memahami Pola Adaptasi Biodiversitas terhadap Perkembangan Global dan Perubahan Iklim.**

Adaptasi adalah suatu proses perubahan tubuh atau bagiannya yang dapat diturunkan yang terjadi

pada makhluk hidup untuk dapat bertahan dan menyesuaikan dengan perubahan lingkungan. Proses ini unik dan melibatkan berbagai faktor yang hingga kini belum seluruhnya dipahami. Penelitian-penelitian untuk memahami pola adaptasi, baik di tingkat organisme, populasi, maupun ekosistem, mendesak dilakukan sehingga kita mampu melestarikan berbagai organisme dalam perubahan lingkungan yang sangat cepat dalam beberapa dasawarsa ini. Penelitian dapat diprioritaskan di berbagai lingkungan ekstrem atau dinamis seperti di laut dalam maupun gunung berapi.

## **4. Memperkuat Bank Spesimen Biodiversitas Indonesia**

Spesimen dari biodiversitas Indonesia mempunyai nilai ekonomi sangat besar. Diperlukan suatu depository koleksi spesimen, baik mikroorganisme, tumbuhan, maupun hewan, dengan standar internasional (*biobank*) untuk menyimpan aset tersebut dengan baik. *Biobank* seperti ini hendaknya juga menyimpan spesimen klinis dari manusia seperti sisa jaringan/sel, biopsi, sel punca, dan sebagainya, yang merupakan sumber daya genetik yang dapat dilihat secara

genomik/metagenomik, proteomik, transkriptomik, metabolomik, dan sebagainya.

Upaya-upaya serius yang perlu dilakukan, antara lain:

- a. Penguatan database spesimen biodiversitas yang efektif dan mudah diakses.
- b. Penguatan kelembagaan dengan peningkatan kualitas sumber daya manusia dan anggaran untuk pengelolaan tempat penyimpanan.
- c. Penguatan jejaring antara lembaga pengelola bank spesimen, inventor, dan pengguna, sehingga koleksi spesimen terus bertambah, jumlah paten meningkat, dan pemanfaatan spesimen semakin tinggi, baik untuk pengembangan sains maupun tujuan komersialisasi.
- d. Diseminasi informasi mengenai keberadaan Bank Spesimen Biodiversitas di kalangan peneliti, akademisi, industri, dan masyarakat umum.

### **Meningkatkan Partisipasi Masyarakat dalam Upaya Mengelola Biodiversitas yang Produktif dan Berkelanjutan**

#### **1. Meningkatkan Kesadaran Masyarakat akan Pentingnya Biodiversitas**

Biodiversitas Indonesia memenuhi semua kriteria sebagai modal dasar bagi kelangsungan hidup dan keunggulan komparatif bangsa. Ironisnya, literasi publik akan biodiversitas masih sangat rendah. Padahal dukungan masyarakat sangat penting untuk menjadikan biodiversitas sebagai arus utama dalam kebijakan. Karena itu, komunikasi strategis untuk menggali dukungan publik terhadap segala hal yang mendukung pengelolaan dan pemanfaatan biodiversitas sebaiknya menjadi prioritas. Langkah pertama yang perlu dilakukan adalah mengkampanyekan konsep biodiversitas secara umum, biodiversitas Indonesia, dan potensi ekonominya. Untuk generasi muda, informasi terkait biodiversitas harus disampaikan dengan menarik. Melatih guru di sekolah dasar hingga sekolah menengah untuk mampu menanamkan ketertarikan dan rasa ingin tahu mengenai biodiversitas secara umum serta biodiversitas Indonesia dan manfaatnya, juga sangat diperlukan.

#### **2. Mengembangkan Kearifan Lokal**

Masyarakat adat di berbagai belahan dunia, termasuk di Indonesia, umumnya memiliki ketergantungan dan kedekatan lebih pada alam untuk bertahan hidup. Hal inilah yang menghasilkan perilaku, kebiasaan, dan budaya penghargaan terhadap alam beserta segala isinya, baik di darat maupun di laut. Penghargaan tersebut mawujud dalam berbagai bentuk pengetahuan, kearifan, sikap, ritual, tradisi, ataupun seperangkat aturan adat sebagai produk budaya, fisik maupun nonfisik, harfiah, maupun simbolis.

Aneka budaya dan kearifan dalam tradisi masyarakat tersebut memang bersifat lokal. Namun makna dan implikasi produk budayanya mempunyai prinsip dasar sama, yaitu penghormatan kepada alam dan pelestarian keanekaragaman hayati sebagai penopang kehidupan, termasuk sebagai penyedia makanan dan obat-obatan. Bertambahnya jumlah penduduk, meningkatnya mobilitas manusia, dan tingginya hasrat mengeksploitasi alam untuk keuntungan ekonomi sebesar-besarnya merupakan tantangan bagi kearifan lokal tersebut untuk tetap bertahan.

Diperlukan kondisi dan strategi khusus untuk mempertahankan dan memanfaatkannya sebagai penjaga biodiversitas. Namun demikian, kearifan lokal harus senantiasa ditinjau ulang dalam dunia yang terus berubah.

#### **3. Mengembangkan Sains Warga dan Data Komputasi**

Era *big data*, teknologi komputasi, dan ilmu kuantitatif membuka kesempatan melakukan intervensi dan penerapan aplikasi yang inovatif, terutama melalui biodiversitas Indonesia yang kaya dan potensial. Bagaimana mengintegrasikan komponen multidimensi dari observasi ilmiah dengan sejarah kearifan lokal, kondisi sosial budaya, kebijakan ekonomi dan pemerintahan, untuk memenuhi kebutuhan manusia yang terus berkembang dan berubah, namun tetap harmonis dengan alam?

Diperlukan pembentukan sistem kolaborasi, perekaman data, infrastruktur komputasi intensif, proses berbagi dan analisis data yang terintegrasi. Dengan demikian, arus informasi dapat bermanfaat untuk merancang intervensi permasalahan dan pemanfaatan sumber

biodiversitas yang inovatif. Sains warga dengan dukungan kecerdasan buatan merupakan terobosan utama era *big data* yang diharapkan dapat dikembangkan untuk membantu pelacakan, pendataan, dan pemetaan biodiversitas secara lebih efisien melalui otomasi observasi skala besar. Pendekatan ini diharapkan dapat dibangun sebagai program awal pemanfaatan inovatif sumber biodiversitas nasional dan pelestariannya.

Untuk mendukung sains warga, diperlukan juga penguatan muatan biodiversitas dalam kurikulum sekolah, yang meliputi:

- a. Pemetaan kurikulum secara lintas sektoral untuk menempatkan topik biodiversitas sebagai tema lintas disiplin dalam pendidikan sejak TK hingga SMA. Matriks yang dihasilkan diharapkan cukup dalam dan memberikan perspektif luas mengenai biodiversitas dalam semua mata pelajaran yang terintegrasi dengan pendidikan karakter.
- b. Proyek aksi lokal sebagai percontohan sains warga dengan memasukkan tema biodiversitas—khususnya biodiversitas lokal daerah tersebut. Koordinasi sains

warga dapat dilakukan bersama perguruan tinggi setempat dan/atau lembaga riset.

- c. Pelatihan guru untuk memasukkan muatan biodiversitas dalam mata pelajaran yang mereka ampu. Para guru diberikan keahlian dasar pengumpulan data atau literatur terkait biodiversitas serta metodologi pengajaran yang memadai dan mudah dilakukan.

## Meningkatkan Pemanfaatan dan Nilai Ekonomi Keunggulan Biodiversitas Indonesia

### 1. Pemanfaatan dan Pengusahaan Jasa Ekosistem

Pemanfaatan dan pengusahaan ekonomi dari jasa ekosistem akan sangat bergantung pada terjaganya modal alam, termasuk biodiversitas, yang menyusun ekosistem dan menghasilkan jasa ekosistem. Pemanfaatan jasa ekosistem perlu memastikan daya dukung dan daya tampung ekosistem agar tidak menimbulkan biaya dan beban. Misalnya, hilangnya sumber pendapatan—tunai dan nontunai—dari jasa ekosistem, penurunan ketahanan pangan, atau

memburuknya kualitas kesehatan masyarakat yang hidupnya bergantung pada hutan, sungai, atau laut. Pengusahaan jasa ekosistem yang berkelanjutan sekaligus bernilai ekonomi tinggi akan ditentukan oleh inovasi-inovasi yang memberi nilai tambah dan meningkatkan efisiensinya.

Inovasi tersebut berlaku untuk teknologi tepat guna dan rendah dampak. Akses pendanaan, insentif fiskal, dan sertifikasi berkelanjutan diperlukan untuk mengembangkan produk berbasis jasa ekosistem serta berwawasan biodiversitas. Selain itu, pengelolaan berupa model usaha terpadu dengan pengelolaan lanskap untuk konservasi atau restorasi ekosistem, misalnya terumbu karang atau lahan gambut, dapat didukung melalui koperasi/badan usaha desa atau Kesatuan Pengelolaan Hutan/KPH Konservasi.

Di tingkat ekonomi yang lebih makro, pemanfaatan dan pengusahaan ekonomi jasa ekosistem tidak bisa tidak harus memperhatikan ketersediaan dan perubahan jasa ekosistem. Neraca sumber daya alam dan jasa ekosistem sebagaimana dimandatkan dalam

Peraturan Pemerintah No. 46 tahun 2017 tentang Instrumen Ekonomi Lingkungan Hidup, perlu selekasnya dijalankan agar kita mengetahui stok fisik dan nilai moneter berbagai jasa ekosistem kita di hutan, danau, gambut, bakau, dan laut.

### 2. Inspirasi Teknologi dari Alam: Mengembangkan Sains Biomimikri

Biomimikri adalah pendekatan yang menggunakan sistem alam sebagai model untuk memecahkan masalah yang dihadapi manusia, terutama dalam desain produk. Dengan mempelajari sistem alam, kita dapat lebih memahami bahwa alam sebenarnya sudah menyediakan solusi atas masalah yang dihadapi. Penelitian-penelitian lintas disiplin perlu dilakukan agar kita dapat secara efisien memanen pengetahuan yang telah disediakan alam untuk meningkatkan kesejahteraan manusia lewat berbagai produk dan inovasi mutakhir.

Atap Teater Esplanade di Singapura yang meniru kulit buah durian adalah salah satu contoh aplikasi biomimikri dalam bidang arsitektur. Atap teater berduri laksana durian itu dibuat bukan sebagai hiasan semata untuk menarik wisatawan,

tetapi juga berfungsi sebagai panel aluminium yang mengikuti posisi matahari. Atap berduri itu bertujuan memantulkan kembali panas matahari yang membantu menjaga kesejukan dalam ruangan teater. Dalam hal ini, aspek estetika, identitas lokal, dan fungsi praktis digabungkan melalui sains dan seni.

Alam memang menyediakan berbagai fenomena yang dapat mengilhami kita untuk mengembangkan sains dan teknologi baru. Sejumlah hewan seperti bintang laut memiliki kemampuan meregenerasi dirinya. Beberapa jenis bintang laut mampu menumbuhkan lengannya yang terputus, bahkan pada beberapa jenis, potongan lengannya dapat tumbuh menjadi bintang laut utuh. Penelitian lebih lanjut mengenai hal ini dapat mengantar kita pada pengetahuan baru mengenai proses regenerasi organ pada bintang laut. Akumulasi pengetahuan baru ini potensial mendorong inovasi dan teknologi pembuatan organ tubuh manusia yang akan sangat berguna bagi kesehatan manusia.

### **3. Pemanfaatan Sumber Daya Laut Dalam Secara Berkelanjutan** Pemahaman sumber daya laut pada

akhirnya akan bermuara pada pemanfaatan untuk keperluan pembangunan ekonomi. Pada tahap pemahaman, aspek-aspek yang krusial adalah perikanan dan bioteknologi. Pemahaman struktur dan sebaran biota laut dalam dapat difokuskan pada sebaran ikan di lapisan perairan sekitar lereng benua yang kaya nutrisi, akibat proses pertukaran vertikal yang dibangkitkan oleh gelombang internal, khususnya di kedalaman 100-400 m. Tantangan selanjutnya adalah pengembangan alat tangkap yang ramah lingkungan dan cocok pada kondisi lereng benua. Untuk konteks bioteknologi kelautan, eksplorasi sumber daya biologi di laut dalam, genetika biodiversitas serta bakteri di kolom air, sedimen serta ventilasi hidrotermal, memerlukan perhatian dan keberpihakan, termasuk alokasi anggaran. Dengan demikian, pengembangan produk-produk berbasis bioteknologi laut dalam dapat menjadi andalan ekonomi, khususnya terkait obat-obatan masa depan dan material maju, serta inspirasi teknologi mutakhir yang inovatif.

### **4. Pemanfaatan Keanekaragaman Hayati Lokal yang Berpotensi**

### **Mendukung Kedaulatan Pangan**

Sumber pangan utama masyarakat Indonesia adalah padi. Diperlukan suatu upaya diversifikasi pangan dan pengembangan potensi keanekaragaman hayati lokal sebagai sumber pangan baru untuk mendukung kedaulatan pangan. Kontribusi sains diperlukan sebagai antisipasi menghadapi perubahan iklim dan peningkatan jumlah penduduk.

### **Mengembangkan dan Meningkatkan Efektivitas Konservasi dan Tata Kelola Biodiversitas**

**1. Restorasi dan konservasi ekosistem kunci: hutan, bakau, padang lamun, dan terumbu karang**  
Walaupun nilai sosial-ekonomi dari ekosistem kunci—hutan, bakau, padang lamun, dan terumbu karang—di Indonesia sangat besar serta dapat menjadi penopang daya saing bangsa dan ketahanan pangan, namun kerusakan pada ekosistem-ekosistem tersebut belum dapat diatasi dengan baik. Untuk mempercepat pemulihannya, diperlukan intervensi melalui restorasi ekosistem berbasis ilmu

pengetahuan dan teknologi terkini. Dalam kondisi normal, dengan mengatasi penyebab degradasi, kemungkinan besar ekosistem yang rusak dapat pulih secara alami. Namun, dengan tingkat kerusakan pada beberapa kawasan sudah sangat parah, pengembangan metode rehabilitasi yang efektif sudah sangat mendesak.

Kemudian, untuk menjamin keberlanjutan dan mempertahankan kualitas ekosistem kunci, diperlukan penguatan strategi pengelolaan, pemanfaatan, dan konservasi. Pengelolaan kawasan konservasi yang efektif merupakan salah satu kunci dalam menjamin keberlanjutan dan pemulihan ekosistem, serta mempertahankan kekayaan biodiversitasnya. Untuk itu, diperlukan penguatan sains dalam berbagai aspek. Biologi konservasi, keterpaduan biososio-ekologi, zonasi, serta proses adaptasi terhadap berbagai gangguan, baik alami maupun antropogenik, merupakan aspek-aspek yang harus dikuatkan. Selain itu, diperlukan koordinasi yang baik antarlembaga. Upaya konservasi yang efektif juga dapat menunjang pengembangan ekowisata.

## 2. Interaksi dan dampak spesies asing terhadap spesies lokal dan ekosistem

Invasi spesies asing dapat mengancam ekosistem suatu tempat. Salah satu cara efektif untuk menghentikan perkembangannya adalah memahami rute masuk dan dampak apa saja yang mungkin ditimbulkan. Dengan demikian kita dapat merancang upaya pencegahan dan mitigasi dampak invasi spesies asing.

Keterlibatan masyarakat luas secara aktif dan pemangku kepentingan pun sangat diperlukan. Masyarakat umum, staf di kawasan konservasi, bandar udara, pelabuhan, stasiun, dan di terminal moda transportasi lain, perlu mendapatkan informasi dan pelatihan untuk memantau pergerakan organisme, baik secara aktif maupun pasif, terutama di habitat-habitat yang rentan terhadap kemunculan spesies invasif. Masyarakat perlu didukung untuk melakukan upaya pengendalian intensif. Sebagai bagian strategi terpadu, mungkin perlu diterapkan terlebih dulu penelitian menyeluruh atas berbagai pilihan kontrol biologis.

Spesies pengendali dari kawasan

yang sama dapat dikerahkan untuk mengendalikan spesies asing invasif. Selain itu, pelaksanaan undang-undang dan peraturan terkait spesies asing invasif dapat lebih diefektifkan. Koordinasi antar pemegang mandat dalam penegakan hukum terkait invasi spesies asing harus dilakukan dan terintegrasi secara nasional, seperti yang telah dilakukan Australia.

## Pengembangan Sumber Daya Manusia

Butir-butir di atas sangat memerlukan kekuatan sumber daya manusia yang memiliki kompetensi dan keterampilan mumpuni terkait biodiversitas, khususnya di bidang-bidang strategis yang justru sumber daya manusianya sangat kurang. Taksonomi, bioinformatika, *big data*, genetika, dan keahlian teknologi maju lain memerlukan penguatan sumber daya manusia untuk menopang pengelolaan dan pemanfaatan biodiversitas Indonesia.

Sebagai negara dengan keberlimpahan biodiversitas, kita sangat kekurangan ahli taksonomi. Keahlian seorang ahli taksonomi dalam memberi deskripsi, nama,

dan mengklasifikasikan suatu spesies, sangat dibutuhkan. Hal ini penting dalam pemahaman dasar terhadap biodiversitas dan upaya konservasinya. Sedikitnya jumlah ahli taksonomi di dunia, terlebih di Indonesia, diduga sebagai penyebab rendahnya jumlah spesies baru yang dideskripsikan para ilmuwan dalam 60-70 tahun terakhir. Dampaknya sangat besar pada sains konservasi. Sebagian besar spesies akan punah bahkan sebelum sempat dideskripsikan. Alhasil, kita akan selalu tertinggal mengetahui jumlah total spesies dalam biodiversitas kita. Pekerjaan taksonomi juga tidak hanya bertujuan akademik. Terdapat aspek ekonomi dalam kegiatan ini. Kita perlu mengetahui perbedaan setiap spesies untuk mengetahui spesies yang bernilai ekonomi dan apa penyebabnya. Taksonomi akan membantu pengelolaan dan budi daya berkelanjutan suatu spesies. Sumber daya bidang bioinformatika dan *big data* adalah kunci dalam melacak, merekam, dan mentabulasi potensi kekayaan biodiversitas.

Diperlukan pengembangan sumber daya manusia dalam kemampuan teknologi komputasi dan ilmu kuantitatif untuk memanfaatkan

peluang penerapan aplikasi yang inovatif dalam pengelolaan data sumber biodiversitas Indonesia. Kemampuan ini meliputi keahlian komputasi dan informatik dalam penyimpanan data, pengelolaan, analisis, interpretasi, dan integrasi data biodiversitas.

Sifat data biodiversitas yang luas, kompleks, dan multidimensional memerlukan perancangan program pelatihan integratif lintas disiplin seperti biologi, ilmu sosial, ilmu komputasi, dan pendekatan kuantitatif. Dengan ini, diperlukan lingkungan yang kondusif terhadap pertukaran ilmu yang bersifat terbuka dan kolaboratif agar dapat memanfaatkan data biodiversitas lintas disiplin, di mana pertukaran informasi dapat digunakan secara optimal untuk menunjang terobosan inovasi berbasis sains biodiversitas.

Unsur genetika makhluk adalah unit fundamental dalam usaha karakterisasi dan pelacakan keanekaragaman biodiversitas. Usaha konservasi, pemanfaatan, dan pengelolaan sumber biodiversitas tergantung pada pengukuran dan pelacakan variasi unsur genetik level genom individu hingga metagenomik

populasi. Terobosan teknologi terkini bidang genomik dan metagenomik membuka potensi luas pemanfaatan sumber biodiversitas alam dalam usaha penemuan zat/senyawa aktif bagi inovasi industri farmakologi dan industri terapan lainnya. Terutama adalah kemampuan pemanfaatan teknologi pelacakan dan pemetaan keberagaman genetik komunitas mikrob (mikrobiom) yang kini mulai berkembang pesat dan berkontribusi terhadap inovasi baru pengobatan penyakit, pertanian berkelanjutan, budi daya perairan, dan intervensi pelestarian lingkungan.

Untuk menguasai teknologi maju, sumber daya manusia Indonesia perlu didorong untuk menguasai berbagai keahlian di atas. Hal ini perlu dilakukan dalam berbagai tataran, mulai dari keahlian untuk mengembangkan inovasi seperti biorekayasa; pengembangan sains yang memperhitungkan aspek etik dan legal; pengarusutamaan sains melalui komunikasi dan diplomasi sains, hingga kewirausahaan yang dikembangkan dari berbagai biodiversitas yang dimiliki Indonesia. Pemanfaatan skema beasiswa yang kita miliki seperti beasiswa LPDP (Lembaga

Pengelola Dana Pendidikan) maupun beasiswa yang dikelola berbagai kementerian/lembaga untuk mendukung generasi muda menjalani pendidikan pascasarjana di bidang-bidang strategis di atas perlu dipertimbangkan.

## Kelembagaan dan Pendanaan

### 1. Sistem Pendanaan Kompetitif, Otonom, dan Berkelanjutan

Sains biodiversitas untuk penelitian dasar dan terapan serta untuk upaya konservasi dan restorasi keanekaragaman hayati membutuhkan pendanaan dalam jumlah memadai dan sinambung. Besaran pendanaan dapat merujuk pada potensi yang disediakan oleh biodiversitas Indonesia secara langsung (misalnya, berupa sumber daya kelautan dan kehutanan) maupun sebagai unsur pendukung pembangunan perekonomian dan pemungkin terciptanya kesejahteraan masyarakat. Kesenambungan pendanaan diperlukan untuk memastikan akumulasi pengetahuan biodiversitas Indonesia bisa terjadi. Besaran memadai dan kesinambungan pendanaan tersebut ditopang oleh dukungan kelembagaan pendanaan yang sepadan.

Besaran dan kesinambungan pendanaan sains biodiversitas dapat ditautkan dengan dokumen perencanaan pembangunan seperti Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN). Penautan sangat diperlukan terutama pada bagian pendanaan kegiatan penelitian biodiversitas, yang kemudian akan diterjemahkan sebagai kebijakan, rencana, dan program pemerintah. Penautan ini semakin relevan mengingat mulai RPJMN 2020-2024 nanti, untuk pertama kalinya dalam sejarah Indonesia kajian lingkungan hidup strategis untuk menilai daya dukung dan daya tampung lingkungan, termasuk biodiversitas, menjadi melekat dalam dokumen perencanaan pembangunan kita seperti dimandatkan Undang-Undang. Sains biodiversitas dengan demikian bisa menjadi prioritas pembangunan.

Selain itu, pengelolaan dana penelitian memerlukan lembaga yang otonom dengan pendanaan yang kompetitif dan berkelanjutan (Brodjonegoro & Greene 2012). Sebagai prioritas, diperlukan mekanisme-mekanisme berupa pendanaan khusus untuk sains biodiversitas pada setiap

kementerian/lembaga atau sektor/tematik terkait, maupun untuk kegiatan lintas kementerian/lembaga dan lintas sektor/tematik sebagai bentuk integrasi pembiayaan sains biodiversitas. Dibutuhkan pula pelibatan pihak lain bukan-pemerintah dan pembiayaan inovatif, seperti melalui pembiayaan investasi non-anggaran pemerintah, dalam rangka memahami ketersediaan, kesenjangan, dan mobilisasi pendanaan sains biodiversitas.

Tidak kalah penting, pengelolaan pendanaan dalam penguatan sains dan teknologi terkait biodiversitas Indonesia memerlukan sejumlah faktor pendukung. Terutama adanya kelembagaan pendanaan yang otonom, bertanggung jawab, dan diabdikan pada kebutuhan riset biodiversitas. Kelembagaan tersebut bersifat mandiri terutama dalam pengambilan keputusan terkait kegiatan riset dan penyaluran pendanaan, pendanaan bersifat tahun jamak dan tidak terikat terhadap siklus keuangan APBN (Brodjonegoro & Greene 2012).

Diperlukan juga faktor pendukung lain yang mendorong pendanaan kompetitif bagi kegiatan sains

biodiversitas berdasarkan tingkatan dan cakupan penelitian. Seperti pendanaan jangka pendek (5-10 tahun) guna penelitian seperti rona awal (*baseline*) untuk keperluan penelusuran dan pengawasan status biodiversitas tingkat spesies atau komunitas; pendanaan khusus dan tertarget untuk mendorong dan membangun kapasitas penelitian, seperti pembiayaan mahasiswa master dan doktoral dari kelompok penelitian lintas disiplin terpilih; dan pendanaan skala besar, misalnya pendanaan kawasan biosfer, koleksi biologis dan basis data biodiversitas seperti bank spesimen, sejumlah riset garda depan dan strategis, serta universitas riset.

## 2. Menghidupkan Rumah Kliring Biodiversitas Indonesia

Struktur dan proses terkait riset dan pengelolaan biodiversitas yang ada saat ini menghadapi sekat-sekat yang dipicu cara pandang sektoral terhadap biodiversitas secara sektoral. Sejumlah hal baik mungkin menjadi tidak atau lambat terwujud, misalnya pertukaran data sampai pembelajaran antarlembaga. Dalam kondisi ini, perlu menghidupkan tata cara dan proses informal berupa rumah kliring biodiversitas

Indonesia, untuk menerobos batas-batas dan sekat-sekat formal tersebut.

Peserta rumah kliring adalah mereka yang mendalami dan bergiat dengan riset dan pengelolaan biodiversitas Indonesia. Proses di dalam rumah kliring berlangsung tanpa memandang latar dan hierarki peserta, serta bersifat konsensus. Rumah kliring bisa menjadi tempat dan wahana berbagi serta akumulasi pengetahuan, pertukaran data dan informasi, pembahasan kebijakan, kelahiran para pemimpin biodiversitas masa depan, dan pendanaan serta kolaborasi untuk riset dan pengelolaan biodiversitas Indonesia. Agar berjalan dan berkelanjutan, rumah kliring perlu difasilitasi oleh pihak atau kelompok yang pemikiran dan/atau tindakan mereka dihormati, berintegritas tinggi, dan netral dari konflik kepentingan. Sebagai langkah awal, diperlukan pembentukan tim *ad hoc* untuk menginisiasi pendirian rumah kliring biodiversitas Indonesia dengan melibatkan seluruh pemangku kepentingan, seperti universitas, lembaga penelitian, LSM, instansi pemerintah, dan industri.

## 3. Kolaborasi Internasional

Kolaborasi internasional merupakan hal esensial dalam aktivitas ilmiah saat ini. Tidak ada satu laboratorium atau kelompok riset di negara maju sekali pun yang cukup canggih untuk mencakup semua aspek dari topik riset biodiversitas yang kompleks. Oleh karena itu, Indonesia perlu lebih meningkatkan dan memperkuat kerja sama internasional, khususnya dengan universitas atau lembaga riset ternama di bidang yang terkait biodiversitas. Untuk penelitian yang sifatnya mendasar perlu difasilitasi kolaborasi internasional sebesar-besarnya guna mempercepat kemajuan. Karena itu, dibutuhkan regulasi yang menyeimbangkan keperluan menjaga keamanan biodiversitas kita dan kepentingan memfasilitasi kolaborasi riset internasional.

## 4. Universitas Riset

Untuk mendukung rekomendasi-rekomendasi di atas, Indonesia sangat membutuhkan lembaga pendidikan tinggi yang kuat dan sumber daya manusia yang mumpuni di bidang biodiversitas. Dalam dunia yang saling berhubungan dan

berubah dengan cepat, universitas riset, termasuk yang berfokus pada bidang biodiversitas dan lingkungan hidup, adalah prasyarat penting bagi penguatan sumber daya manusia di bidang biodiversitas. Hal ini juga memungkinkan kita lebih optimal menggunakan sains dan teknologi dalam pengelolaan biodiversitas kita.

Universitas riset di bidang biodiversitas sekaligus dapat memperkuat budaya ilmiah di perguruan tinggi serta akan mendorong literasi biodiversitas dan lingkungan hidup di kalangan masyarakat. Universitas riset juga melatih sumber daya manusia dan menghasilkan tenaga kerja mumpuni di bidang biodiversitas yang dapat menjadi mitra pemerintah dan sektor swasta dalam mengembangkan kebijakan berbasis bukti serta industri terkait biodiversitas. Sejumlah negara seperti Amerika Serikat, Jerman, Belanda, maupun Australia memiliki pengalaman yang dapat kita pelajari dan adaptasikan dalam membangun universitas riset, termasuk yang berfokus pada masalah lingkungan hidup dan biodiversitas.

# Daftar Pustaka

- AAU, LERU, GO8, & C9. (2013). *Hefei statements on the ten characteristics of contemporary university announced by AAU, LERU, GO8 AND C9*.
- ActionAid, November 1999. 'Trade Related Intellectual Property Rights and Farmers Rights.' *A recipe for change. Food security - the key issues for the WTO Ministerial Conference, Seattle*.
- AIPI. (2016). *SAINS45. Agenda Ilmu Pengetahuan Indonesia Menyongsong Satu Abad Kemerdekaan*. Jakarta.
- American Academy of Arts & Sciences. (2016). *Public research universities. Recommitting to Lincoln's Vision: An Educational Compact for the 21<sup>st</sup> Century*. Cambridge.
- Anders, K., Indriani, C., Ahmad, R., Tantowijoyo, W., Arguni, E., Andari, B., Jewell, N., Rances, E., O'Neill, S., Simmons, C. dan Utarini, A. (2018). The AWED trial (Applying Wolbachia to Eliminate Dengue) to assess the efficacy of Wolbachia-infected mosquito deployments to reduce dengue incidence in Yogyakarta, Indonesia: study protocol for a cluster randomised controlled trial. *Trials*, 19(1).
- Angelo Samir Melim Miguel, Bianca Waruar Paulo Lobo, Érika Veríssimo da Costa Figueiredo, Gisela Maria Dellamora-Ortiz, & Tathiana Souza Martins-Meyer. (2013). *Enzymes in Bakery: Current and Future Trends*. INTECH Open Access Publisher.
- Angelsen, A., Jagger, P., Babigumira, R., Belcher, B., Hogarth, N., & Bauch, S. et al. (2014). Environmental Income and Rural Livelihoods: A Global-Comparative Analysis. *World Development*, 64, S12-S28. doi: 10.1016/j.worlddev.2014.03.006
- Anna, Z. (2017). Economic valuation of whale shark tourism in Cenderawasih Bay National Park, Papua, Indonesia. *Biodiversitas, Journal of Biological Diversity*, 18(3). doi: 10.13057/biodiv/d180321
- AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014—IPCC. Diambil dari <http://www.ipcc.ch/report/ar5/>
- Arida, E., Sihotang, V., & Tihurua, E. (2014). *Update on Indonesia's Draft of Invasive Alien Species*. Bogor: Pusat Penelitian Biologi-LIPI.
- Arifin, Z. (2005). Trend of Coastal Pollution in Jakarta Bay, Indonesia: Implication to Fishery and Recreation Activities. Dalam Bilateral Worskhop on Costal Resources Exploration and Conservation. Bali 13 - 14 Oktober 2004. p:16-21.
- Armitage, D., Charles, A. dan Berkes, F. (2017). *Governing the Coastal Commons: Communities, Resilience and Transformation*. London: Routledge.
- Asaad I., Lundquist C.J., Erdmann M.V., Van Hooionk R. dan Costello M.J. (2018) Designating Spatial Priorities for Marine Biodiversity Conservation in the Coral Triangle. *Front. Mar. Sci.* 5:400. doi: 10.3389/fmars.2018.00400
- Asner, G., & Levick, S. (2012). Landscape-scale effects of herbivores on treefall in African savannas. *Ecology Letters*, 15(11), 1211-1217. doi: 10.1111/j.1461-0248.2012.01842.x
- Audley-Charles, M., Ballantyne, P., & Hall, R. (1988). Mesozoic-Cenozoic rift-drift sequence of Asian fragments from Gondwanaland. *Tectonophysics*, 155(1-4), 317-330. doi: 10.1016/0040-1951(88)90272-7
- Austin, H., Allen, M., Donohoe, B., Rorrer, N., Kearns, F., & Silveira, R. et al. (2018). Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 115(19), E4350-E4357. doi: 10.1073/pnas.1718804115
- Austin, K., González-Roglich, M., Schaffer-Smith, D., Schwantes, A. dan Swenson, J. (2017). Erratum: Trends in size of tropical deforestation events signal increasing dominance of industrial-scale drivers (2017 Environ. Res. Lett. 5 054009). *Environmental Research Letters*, 12(7), p.079601.
- Austin, K., Schwantes, A., Gu, Y. dan Kasibhatla, P. (2019). What causes deforestation in Indonesia?. *Environmental Research Letters*, 14(2), p.024007.
- Baicha, Z., Salar-García, M., Ortiz-Martínez, V., Hernández-Fernández, F., de los Ríos, A., & Labjar, N. et al. (2016). A critical review on microalgae as an alternative source for bioenergy production: A promising low cost substrate for microbial fuel cells. *Fuel Processing Technology*, 154, 104-116. doi: 10.1016/j.fuproc.2016.08.017

- Balvanera, P., Pfisterer, A., Buchmann, N., He, J., Nakashizuka, T., Raffaelli, D., & Schmid, B. (2006). Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 9(10), 1146-1156. doi: 10.1111/j.1461-0248.2006.00963.x
- Barkmann, J., Glenk, K., Handi, H., Sundawati, L., Witte, J-P., Marggraf, R. (2007). Assessing Economic Preferences for Biological Diversity and Ecosystem Services at the Central Sulawesi Rainforest Margin—a Choice Experiment Approach. Dalam Tucharntke, T., Leuschner, C., Zeller, M., Guhardja, E., Bidin, A (Ed.), *The Stability of Tropical Rainforest Margins, Linking Ecological, Economic and Social Constraints of Land Use and Conservation* (pp. 181-208), Berlin: Springer Verlag Berlin.
- Bauer, M., Petkova, K., & Boyadjieva, P. (2000). Public Knowledge of and Attitudes to Science: Alternative Measures That May End the “Science War”. *Science, Technology, & Human Values*, 25(1), 30-51. doi: 10.1177/016224390002500102
- Beattie, A., Hay, M., Magnusson, B., De Nys, R., Smeathers, J., & Vincent, J. (2010). Ecology and bioprospecting. *Austral Ecology*, 36(3), 341-356. doi: 10.1111/j.1442-9993.2010.02170.x
- Becking, L., Erpenbeck, D., Peijnenburg, K. dan de Voogd, N. (2013). Phylogeography of the Sponge *Suberites diversicolor* in Indonesia: Insights into the Evolution of Marine Lake Populations. *PLoS ONE*, 8(10), p.e75996.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365-377. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x
- Benyus, J. (1998). *Biomimicry*. New York: Morrow.
- BLM. (2019). Diambil dari <https://businessleadersformichigan.com/>
- Bonnaud, E., Berger, G., Bourgeois, K., Legrand, J. dan Vidal, E. (2012). Predation by cats could lead to the extinction of the Mediterranean endemic Yelkouan Shearwater *Puffinus yelkouan* at a major breeding site. *Ibis*, 154(3), pp.566-577.
- Bonney, R., Cooper, C., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K., & Shirk, J. (2009). Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy. *Bioscience*, 59(11), 977-984. doi: 10.1525/bio.2009.59.11.9
- BPS. (2017). *Statistik Lingkungan Hidup Indonesia 2017*. Jakarta: Biro Pusat Statistik.
- Bowen, B., Rocha, L., Toonen, R. dan Karl, S. (2013). The origins of tropical marine biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(6), pp.359-366.
- Brandon, K. (1996). *Ecotourism and conservation*. Washington, D.C.: Global Environment Division, Environment Dept., The World Bank.
- Brandt, J., & Buckley, R. (2018). A global systematic review of empirical evidence of ecotourism impacts on forests in biodiversity hotspots. *Current Opinion In Environmental Sustainability*, 32, 112-118. doi: 10.1016/j.cosust.2018.04.004
- Brodjonegoro, S., & Greene, M. (2012). *Creating an Indonesian Science Fund*. Jakarta: AIPI.
- Brossard, D., Lewenstein, B., & Bonney, R. (2005). Scientific knowledge and attitude change: The impact of a citizen science project. *International Journal Of Science Education*, 27(9), 1099-1121. doi: 10.1080/09500690500069483
- Buenz, E., Bauer, B., Johnson, H., Tavana, G., Beekman, E., Frank, K., & Howe, C. (2006). Searching historical herbal texts for potential new drugs. *BMJ*, 333(7582), 1314-1315. doi: 10.1136/bmj.39008.492361.be
- Bush, A., Sollmann, R., Wilting, A., Bohmann, K., Cole, B., & Balzter, H. et al. (2017). Connecting Earth observation to high-throughput biodiversity data. *Nature Ecology & Evolution*, 1(7). doi: 10.1038/s41559-017-0176
- Bush, V. (1945). *Science, the Endless Frontier. A Report to the President by Vannevar Bush, Director of the Office of Scientific Research and Development, July 1945*. Washington D.C.: United States Government Printing Office.

- Buys F, Hurbissoon R. (2011). "Green buildings: A Mauritian Built Environment Stakeholders' Perspective". *Acta Structilia* 18 (1): 81-101.
- Callaway, E., & Cyranoski, D. (2015). Anti-parasite drugs sweep Nobel prize in medicine 2015. *Nature*, 526(7572), 174-175. doi: 10.1038/nature.2015.18507
- Case, M., Ardiansyah, F., & Spector, E. (2007). *Climate Change in Indonesia. Implications for Humans and Nature*. Gland, Switzerland: WWF.
- CBD. (2002). Sixth Conference of the Parties, The Hague, the Netherlands, 7-19 April 2002: *Decision VI/23: Alien species that threaten ecosystems, habitats or species to which is annexed Guiding principles for the prevention, introduction and mitigation of impacts of alien species that threaten ecosystems, habitats or species* (available at www.biodiv.org).
- Chandler, M., See, L., Copas, K., Bonde, A., López, B., & Danielsen, F. et al. (2017). Contribution of citizen science towards international biodiversity monitoring. *Biological Conservation*, 213, 280-294. doi: 10.1016/j.biocon.2016.09.004
- Chasanah, E. (2013). Marine Biodiversity Research in Indonesia: Challenges and Rewards. *Journal Of Coastal Development*, 12(1), 107- 121.
- Check-Hayden, E. (2014). Technology: The \$1,000 genome. *Nature*, 507(7492), 294-295. doi: 10.1038/507294a
- Chen, K., R.M. Horton, D.A. Bader, C. Lesk, L. Jiang, B. Jones, L. Zhou, X. Chen, J. Bi, dan P.L. Kinney. (2017). Impact of climate change on heat-related mortality in Jiangsu Province, China. *Environ. Pollut.*, 224, no. 317, doi:10.1016/j.envpol.2017.02.011.
- Chivian, E., & Bernstein, A. (2008). *Sustaining life*. New York: Oxford University Press.
- Choi, J., Hwang, J., Jeong, Y., Park, J., Lee, K., & Hong, J. (2015). Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine. *International Journal Of Nanomedicine*, 5701. doi: 10.2147/ijn.s83642
- Climate Change 2013 - *The Physical Science Basis*. (2009). doi: 10.1017/cbo9781107415324
- Clough, Y., Abrahamczyk, S., Adams, M., Anshary, A., Ariyanti, N., & Betz, L. et al. (2010). Biodiversity patterns and thropic interactions in human-dominated tropical landscapes in Sulawesi (Indonesia): plants, arthropods and vertebrates. Dalam T. Tschardtke, C. C. Leuschner, E. E. Veldkamp, H. Faust, A. A. Bidin & E. Guhardja (Ed.), *Tropical rainforests and agroforests under global change - Ecological and socio-economic valuations* (pp. 15-71).
- Coats, V., & Rumpho, M. (2014). The rhizosphere microbiota of plant invaders: an overview of recent advances in the microbiomics of invasive plants. *Frontiers In Microbiology*, 5. doi: 10.3389/fmicb.2014.00368
- Corson TW, Crews CM. (2007). Molecular understanding and modern application of traditional medicines: triumphs and trials. *Cell* 130: 769-774
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P. dan van den Belt, M. (1998). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 25(1), pp.3-15.
- Cranbrook, E. O. (1981). The vertebrate faunas. Dalam T. C. Whitmore (Ed.), *Wallace's Line and Plate Tectonics* (pp. 57-69). Oxford: Clarendon Press.
- Crandall ED, Frey MA, Grosberg RK, Barber PH. (2008). Contrasting demographic history and phylogeographical patterns in two Indo-Pacific gastropods. *Mol Ecol* 17: 611-626.
- Dahrudin, H., Hutama, A., Busson, F., Sauri, S., Hanner, R., Keith, P., Hadiaty, R. dan Hubert, N. (2016). Revisiting the ichthyodiversity of Java and Bali through DNA barcodes: taxonomic coverage, identification accuracy, cryptic diversity and identification of exotic species. *Molecular Ecology Resources*, 17(2), pp.288-299
- Danovaro, R., Gambi, C., Dell'Anno, A., Corinaldesi, C., Fraschetti, S., & Vanreusel, A. et al. (2008). Exponential Decline of Deep-Sea Ecosystem Functioning Linked to Benthic Biodiversity Loss. *Current Biology*, 18(1), 1-8. doi: 10.1016/j.cub.2007.11.056

De Groot, R., Fisher, B., Christie, M., Aronson, J., Braat, L., Gowdy, J., Kadekodi, G. K. (2012). Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations* (pp. 9-40). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9781849775489>

Díaz, S., Fargione, J., Chapin, F., & Tilman, D. (2006). Biodiversity Loss Threatens Human Well-Being. *Plos Biology*, 4(8), e277. doi: 10.1371/journal.pbio.0040277

Dickerson, F., Severance, E., & Yolken, R. (2017). The microbiome, immunity, and schizophrenia and bipolar disorder. *Brain, Behavior, And Immunity*, 62, 46-52. doi: 10.1016/j.bbi.2016.12.010

Donohoe, M. (2003). Causes and health consequences of environmental degradation and social injustice. *Social Science & Medicine*, 56(3), 573-587. doi: 10.1016/s0277-9536(02)00055-2

Dooley, E. (2002). Global Biodiversity Information Facility. *Environmental Health Perspectives*, 110(11). doi: 10.1289/ehp.110-a669

Dusséaux, S., Croux, C., Soucaille, P., & Meynial-Salles, I. (2013). Metabolic engineering of *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 for the high-yield production of a biofuel composed of an isopropanol/butanol/ethanol mixture. *Metabolic Engineering*, 18, 1-8. doi: 10.1016/j.ymben.2013.03.003

Ekayana, D. (2017). Pengarusutamaan pengeluaran non-pemerintah dalam rangka pelestarian keanekaragaman hayati di Indonesia. Dalam Parjiono, A. Samosir & M. Sujai (Ed.), *Kebijakan fiskal, perubahan iklim, dan keberlanjutan pembangunan*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.

Elkington, J. (1998). Accounting for The Triple Bottom Line. *Measuring Business Excellence*, 2(3), pp.18-22.

Ellen Macarthur Foundation. (2015). *Potential for Denmark as a circular economy*. [S.l.].

Elmqvist, T., dan E. Maltby. (2010). Biodiversity, Ecosystems and Ecosystem Services. Dalam Kumar P (ed). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB)*. Earthscan, UK.

FAO Rice Market Monitor. Trade and Markets Division (2017). *Rice Market Monitor*. VOLUME XX ISSUE No. 4 December 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fennel, D. (2007). *Ecotourism*. London- New-York: Routledge.

Fitriani, N., dan Mumbunan, S. (2018). "Environmental Income and Inequality of Indigenous Community in a High Conservation Value Area". Manuskrip.

Folke, C., Biggs, R., Norström, A., Reyers, B., & Rockström, J. (2016). Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. *Ecology And Society*, 21(3). doi: 10.5751/es-08748-210341

Food and Agriculture Organization. (2017). *Agriculture and the environment: Changing pressure and solution*. [www.fao.org/docrep/pdf/005/y4252e/y4252e12.pdf](http://www.fao.org/docrep/pdf/005/y4252e/y4252e12.pdf)

Franklin, J., Serra-Diaz, J., Syphard, A., & Regan, H. (2016). Big data for forecasting the impacts of global change on plant communities. *Global Ecology And Biogeography*, 26(1), 6-17. doi: 10.1111/geb.12501

Frison, E., Cherfas, J., & Hodgkin, T. (2011). Agricultural Biodiversity Is Essential for a Sustainable Improvement in Food and Nutrition Security. *Sustainability*, 3(1), 238-253. doi: 10.3390/su3010238

Future Trend of Herbal Medicine Market 2018 Scope - Reuters. (2019). Diambil dari <https://www.reuters.com/brandfeatures/venture-capital/article?id=32992>

Gaither, M., Bernal, M., Coleman, R., Bowen, B., Jones, S., Simison, W. dan Rocha, L. (2015). Genomic signatures of geographic isolation and natural selection in coral reef fishes. *Molecular Ecology*, 24(7), pp.1543-1557.

Georgia Research Alliance. (2019). Diambil dari [http://gra.org/page/1025/about\\_gra.html](http://gra.org/page/1025/about_gra.html).

- GF Securities (Hong Kong) (2016). *Traditional Chinese Medicine Industry*. Equity Research, Healthcare. Hong Kong: GF Securities (Hong Kong) Brokerage Limited.
- Gilbert, H. (2010). The Biochemistry and Structural Biology of Plant Cell Wall Deconstruction. *PLANT PHYSIOLOGY*, 153(2), 444-455. doi: 10.1104/pp.110.156646
- Grace, J., Anderson, T., Seabloom, E., Borer, E., Adler, P., & Harpole, W. et al. (2016). Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness. *Nature*, 529(7586), 390-393. doi: 10.1038/nature16524
- Green, J., & Plotkin, J. (2007). A statistical theory for sampling species abundances. *Ecology Letters*, 10(11), 1037-1045. doi: 10.1111/j.1461-0248.2007.01101.x
- Griscom, B., Adams, J., Ellis, P., Houghton, R., Lomax, G., & Miteva, D. et al. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 114(44), 11645-11650. doi: 10.1073/pnas.1710465114
- Hadhazy, A. (2019). Think Twice: How the Gut's "Second Brain" Influences Mood and Well-Being. Diambil dari <https://www.scientificamerican.com/article/gut-second-brain/>
- Hadiyanto, H., Azimatun Nur, M. dan Hartanto, G. (2012). Cultivation of *Chlorella* sp. as Biofuel Sources in Palm Oil Mill Effluent (POME). *International Journal of Renewable Energy Development*, 1(2), p.45.
- Haines-Young, R. dan M. Potschin. (2010). The Links Between Biodiversity, Ecosystem Services and Human Well-being. Dalam Raffaelli, D. dan C. Frid (Ed.), *Ecosystem Ecology: a New Synthesis* (pp. 110-139). Cambridge: Cambridge University Press.
- Hall, R. (2002). Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4), pp.353-431.
- Hamid, A. (2008). *Pengobatan Tradisional Berbasis Lontara di Sulawesi Selatan*. Makassar: Dinas Kebudayaan dan Pariwisata Sulawesi Selatan.
- Hamilton, W. (1979). Tectonics of the Indonesian region. *Professional Paper*. doi: 10.3133/pp1078
- Hand, E. (2010). Citizen science: People power. *Nature*, 466(7307), 685-687. doi: 10.1038/466685a
- Herbal Supplements Market Size, Share, Report, Analysis, Trends - Reuters. (2019). Diambil dari <https://www.reuters.com/brandfeatures/venture-capital/article?id=5660>
- Hijjang, P. (2014). Pasang dan Kepemimpinan Ammatoa: Memahami Kembali Sistem Kepemimpinan Tradisional Masyarakat Adat dalam Pengelolaan Sumberdaya Hutan di Kajang Sulawesi Selatan. *Antropologi Indonesia*, 29(3), 127-144. doi: 10.7454/ai.v29i3.3545
- Honey, M. (1999). *Ecotourism and Sustainable Development: Who own paradise?*. Washington, D.C: Island Press.
- Hooper, D., Chapin, F., Ewel, J., Hector, A., Inchausti, P., & Lavorel, S. et al. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75(1), 3-35. doi: 10.1890/04-0922
- Hopkins, J. (2011). *Asian Aphrodisiacs*. New York: Tuttle Pub.
- Howe, E., Buckland, S., Després-Einspenner, M. dan Köhl, H. (2017). Distance sampling with camera traps. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(11), pp.1558-1565.
- Huang Y, Tan F, Su G, Deng S, He H, Shi S. (2008). Population genetic structure of three tree species in the mangrove genus *Ceriops* (Rhizophoraceae) from the Indo West Pacific. *Genetica* 133:47-56 DOI 10.1007/s10709-007-9182-1.
- Hubert, N., Kadarusman, Wibowo, A., Busson, F., Caruso, D., Sulandari, S., Nafiqoh, N., Pouyaud, L., Rüber, L., Avarre, J., Herder, F., Hanner, R., Keith, P. dan Hadiaty, R. (2015). DNA Barcoding Indonesian freshwater fishes: challenges and prospects. *DNA Barcodes*, 3(1).
- Hulme, D., & Murphree, M. (2001). *African wildlife and livelihood*. Heinemann: London.

Human Microbiome Project - Home | NIH Common Fund. (2019). Diambil dari <https://commonfund.nih.gov/hmp>

Hunter, P. (2017). *From imitation to inspiration* (pp. 363-366).

Hunter-Cevera, J. C. (1998). The value of microbial diversity. *Curr. Opinion Microbiol.*, 1:278-285.

iDigBio's Big Data Methods Symposium at TDWG 2016. (2019). Diambil dari <https://www.idigbio.org/content/idigbios-big-data-methods-symposium-tdwg-2016>

Illumina wants to sequence your whole genome for \$100. (2019). Diambil dari <https://techcrunch.com/2017/01/10/illumina-wants-to-sequence-your-whole-genome-for-100/>

IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (ed.)]. In Press.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex dan P.M. Midgley (ed.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom dan New York, NY, USA (pp. 1535).

Iswandono, E., Zuhud, E., Hikmat, A. dan Kosmaryandi, N. (2015). Integrating Local Culture into Forest Conservation: A Case Study of The Manggarai Tribe in Ruteng Mountains, Indonesia. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika* (Journal of Tropical Forest Management), 21(2), pp.55-64.

J O'Mahoney (2017) The economic, social and icon value of the Great Barrier Reef. <https://www2.deloitte.com/.../deloitte-au-economics-great-barrier-reef-230617.pdf>

Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., & Kopriva, S. (2017). The Role of Soil Microorganisms in Plant Mineral Nutrition—Current Knowledge and Future Directions. *Frontiers In Plant Science*, 8. doi: 10.3389/fpls.2017.01617

Jambeck, J., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T., Perryman, M., & Andrady, A. et al. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771. doi: 10.1126/science.1260352

Jansson, J., & Hofmockel, K. (2018). The soil microbiome—from metagenomics to metaphenomics. *Current Opinion In Microbiology*, 43, 162-168. doi: 10.1016/j.mib.2018.01.013

Ji H-F, Zhang H-Y. (2008). Multipotent natural agents to combat Alzheimer's disease. Functional spectrum and structural features. *Acta Pharmacol Sin* 29: 143-151

Ji, H., Li, X., & Zhang, H. (2009). Natural products and drug discovery. Can thousands of years of ancient medical knowledge lead us to new and powerful drug combinations in the fight against cancer and dementia?. *EMBO Reports*, 10(3), 194-200. doi: 10.1038/embor.2009.12

Joo, S., Cho, I., Seo, H., Son, H., Sagong, H., & Shin, T. et al. (2018). Structural insight into molecular mechanism of poly(ethylene terephthalate) degradation. *Nature Communications*, 9(1). doi: 10.1038/s41467-018-02881-1

Juanes, F. (2018). Visual and acoustic sensors for early detection of biological invasions: Current uses and future potential. *Journal For Nature Conservation*, 42, 7-11. doi: 10.1016/j.jnc.2018.01.003

Karidewi, M., Ritohardoyo, S., & Santosa, L. (2012). Desa Adat Tenganan Pengringsingan dalam Pengelolaan Hutan di Desa Tenganan, Kecamatan Manggis, Karangasem, Bali. *Majalah Geografi Indonesia*, (26 (1), 26-45.

Kelbessa, W. (2013). Indigenous knowledge and its contribution to biodiversity conservation. *International Social Science Journal*, 64(211-212), 143-152. doi: 10.1111/issj.12038

Kementerian Kesehatan RI. (2017). *Laporan Riset Tanaman Obat dan Jamu (Ristoja)*. Jakarta.

- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2018). *Indeks Kualitas Lingkungan Hidup Indonesia 2017*. Jakarta.
- Kerson, R. (1989). Lab for the Environment. *MIT Technology Review*, Vol. 92(no. 1), pp. 11-12.
- Kingston, D. (2011). Modern Natural Products Drug Discovery and Its Relevance to Biodiversity Conservation. *Journal Of Natural Products*, 74(3), 496-511. doi: 10.1021/np100550t
- Klein, A., Vaissière, B., Cane, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S., Kremen, C., & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings Of The Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1608), 303-313. doi: 10.1098/rspb.2006.3721
- Kothari, A. (2008). The 4C factor: Community conservation and climate change. *Biodiversity*, 9(3-4), 19-23. doi: 10.1080/14888386.2008.9712903
- Kraaijenhagen, C., Van Oppen, C., & Bocken, N. (2018). *Circular business*. [S.n.]: Circular Collaboration.
- Laird, S., & Wynberg, R. (2008). *Access and Benefit-Sharing in Practise: Trends in Partnerships Across Sectors*. CBD Technical Series (38th ed.).
- Lifepatch - citizen initiative in art, science and technology. (2019). Diambil dari <http://lifepatch.org/>
- Limmon, G., Rijoly, F., Ongkers, O., Loupaty, S. dan Pattikawa, J. (2018). Community structure of reef fish in the southern waters of Ambon Island, eastern Indonesia. *AACL Bioflux*.
- Lin, T. (2013). Big data is too big for scientists to handle alone. *Wired*.
- Liu, B., He, L., Wang, L., Li, T., Li, C., & Liu, H. et al. (2018). Protein Crystallography and Site-Direct Mutagenesis Analysis of the Poly(ethylene terephthalate) Hydrolase PETase from *Ideonella sakaiensis*. *Chembiochem*, 19(14), 1471-1475. doi: 10.1002/cbic.201800097
- Liu, X., Ashforth, E., Ren, B., Song, F., Dai, H., & Liu, M. et al. (2010). Bioprospecting microbial natural product libraries from the marine environment for drug discovery. *The Journal Of Antibiotics*, 63(8), 415-422. doi: 10.1038/ja.2010.56
- Loss S.R., Will T., Marra P.P. (2013) The impact of free-ranging domestic cats on wildlife of the United States. *Nat Commun* 4:1396
- Lowe, S. dan Boudjelas, S. (2000). *100 of the world's worst invasive alien species*. Auckland, New Zealand: IUCN/SSC Invasive Species Specialist Group (ISSG).
- Lynd, L., Currie, D., Ciazza, N., Herring, C., & Orem, N. (2009). ChemInform Abstract: Consolidated Bioprocessing of Cellulosic Biomass to Ethanol Using Thermophilic Bacteria. *Cheminform*, 40(8). doi: 10.1002/chin.200908274
- Maldonado, C., Molina, C., Zizka, A., Persson, C., Taylor, C., & Albán, J. et al. (2015). Estimating species diversity and distribution in the era of Big Data: to what extent can we trust public databases?. *Global Ecology And Biogeography*, 24(8), 973-984. doi: 10.1111/geb.12326
- Margules, C., & Sarkar, S. (2007). *Systematic conservation planning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Matchar, E. (2017). AI Plant and Animal Identification Helps Us All Be Citizen Scientists. Diambil dari <https://www.smithsonianmag.com/innovation/ai-plant-and-animal-identification-helps-us-all-be-citizen-scientists-180963525/>
- McCarthy, D., Donald, P., Scharlemann, J., Buchanan, G., Balmford, A., & Green, J. et al. (2012). Financial Costs of Meeting Global Biodiversity Conservation Targets: Current Spending and Unmet Needs. *Science*, 338(6109), 946-949. doi: 10.1126/science.1229803
- Measey, M. (2010). Indonesia: a vulnerable country in the face of climate change. *Global Majority E-Journal*, 1, 31-45.
- Medina, F., Bonnaud, E., Vidal, E., Tershy, B., Zavaleta, E., Josh Donlan, C., Keitt, B., Corre, M., Horwath, S. dan Nogales, M. (2011). A global review of the impacts of invasive cats on island endangered vertebrates. *Global Change Biology*, 17(11), pp.3503-3510.

Melim Miguel, A., Souza, T., Costa Figueiredo, E., Paulo Lobo, B. dan Maria, G. (2013). Enzymes in Bakery: Current and Future Trends. *Food Industry*.

Mining Of Ancient Herbal Text Leads To Potential New Anti-bacterial Drug. (2019). Diambil dari <https://www.sciencedaily.com/releases/2006/12/061228154205.htm>

Mishra, M., Mishra, V., Kashaw, V., Iyer, A., & Kashaw, S. (2017). Comprehensive review on various strategies for antimalarial drug discovery. *European Journal Of Medicinal Chemistry*, 125, 1300-1320. doi: 10.1016/j.ejmech.2016.11.025

Mittermeier, R. A., N. Myers, J. B. Thomsen, G. A. B. Da Fonseca, dan S. Olivieri. (1998). Biodiversity hotspots and major tropical wilderness areas: approaches to setting conservation priorities. *Conservation Biology* 12:516-520

Molnar, J., Gamboa, R., Revenga, C., & Spalding, M. (2008). Assessing the global threat of invasive species to marine biodiversity. *Frontiers In Ecology And The Environment*, 6(9), 485-492. doi: 10.1890/070064  
Mony, A., Satria, A. dan Kinseng, R. (2017). Sasi laut in Maluku: transformation and sustainability of traditional governance in the face of globalisation. Dalam D. Armitage, A. Charles and F. Berkes, ed., *Governing the Coastal Commons: Communities, Resilience and Transformation*. London: Routledge.

Moss, Steve J. & Wilson, Moyra E. J. (1998). Biogeographic implications of the Tertiary palaeogeographic evolution of Sulawesi and Borneo. Dalam *Biogeography and Geological Evolution of SE Asia* (pp. 133-163). Leiden: Backhuys Publishers.

Mukherjee, S (2018). Viagra Just Turned 20. *Here's How Much Money the ED Drug Makes*.

Murdiyarto, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J., Warren, M., Sasmito, S., & Donato, D. et al. (2015). The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 5(12), 1089-1092. doi: 10.1038/nclimate2734

Myers, S., Gaffikin, L., Golden, C., Ostfeld, R., H. Redford, K., & H. Ricketts, T. et al. (2013). Human health impacts of ecosystem alteration. *Proceedings*

*Of The National Academy Of Sciences*, 110(47), 18753-18760. doi: 10.1073/pnas.1218656110

Narro, C., Zinsstag, J., & Tiongco, M. (2012). A One Health Framework for Estimating the Economic Costs of Zoonotic Diseases on Society. *Ecohealth*, 9(2), 150-162. doi: 10.1007/s10393-012-0747-9

National Agency for Drug and Food Control World Health Organization, Indonesia. Trips, CBD and Traditional Medicines: Concepts and Questions. Report of an ASEAN Workshop on the TRIPS Agreement and Traditional Medicine, Jakarta, February 2001. <http://apps.who.int/medicinedocs/en/d/Jh2996e/6.3.html>

National Institutes of Health State-of-the-Science Conference Statement: Multivitamin/Mineral Supplements and Chronic Disease Prevention. (2007). *The American Journal of Clinical Nutrition*, 85(1), pp.257S-264S.

National Research Council. (2007). *The New Science of Metagenomics: Revealing the Secrets of Our Microbial Planet*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11902>.

National Research Council. (2012). *Research Universities and the Future of America: Ten Breakthrough Actions Vital to Our Nation's Prosperity and Security*. Washington, DC: The National Academies Press

National Science Foundation. (2012). *National Science Board, Diminishing Funding and Rising Expectations: Trends and Challenges for Public Research Universities (a companion to Science and Engineering Indicators 2012)* (Arlington, Va.: National Science Foundation, 2012), <http://www.nsf.gov/nsb/sei/companion2/files/nsb1245.pdf>.

Nawangningrum, D., Widodo, S., Suparta, I.M., & Holil, M. (2004). Kajian Terhadap Naskah Kuna Nusantara Koleksi Fakultas Ilmu Pengetahuan Budaya Universitas Indonesia: Penyakit Dan Pengobatan Ramuan Tradisional. *Makara Seri Sosial Humaniora*, 8(2), 45-53. DOI:10.7454/mssh.v8i2.86

Newman, D., & Cragg, G. (2016). Natural Products as Sources of New Drugs from 1981 to 2014. *Journal Of Natural Products*, 79(3), 629-661. doi: 10.1021/acs.jnatprod.5b01055

- Newmark, W., Jenkins, C., Pimm, S., McNeally, P., & Halley, J. (2017). Targeted habitat restoration can reduce extinction rates in fragmented forests. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 114(36), 9635-9640. doi: 10.1073/pnas.1705834114
- Novianto, F. (2017). *Jamu Saintifik, Suatu Lompatan Ilmiah Pengembangan Jamu, Balai Penelitian dan Pengembangan Kesehatan*. Tawangmangu: Balai besar Penelitian dan Pengembangan Tanaman Obat dan Obat Tradisional.
- NRC Committee on Metagenomics. (2007). *The new science of metagenomics*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- O'Brien, B. (1999). *Our national parks and the search for sustainability*. Austin: Univ. of Texas Press.
- O'Connor, B., Secades, C., Penner, J., Sonnenschein, R., Skidmore, A., Burgess, N., & Hutton, J. (2015). Earth observation as a tool for tracking progress towards the Aichi Biodiversity Targets. *Remote Sensing In Ecology And Conservation*, 1(1), 19-28. doi: 10.1002/rse2.4
- Odsjö, T. (2006). The environmental specimen bank, Swedish Museum of Natural History—A base for contaminant monitoring and environmental research. *J. Environ. Monit.*, 8(8), pp.791-794.
- Olofsson, K., Bertilsson, M., & Lidén, G. (2008). A short review on SSF - an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Biotechnology For Biofuels*, 1(1), 7. doi: 10.1186/1754-6834-1-7
- Orr, J., Fabry, V., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S., & Feely, R. et al. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437(7059), 681-686. doi: 10.1038/nature04095
- Osborn, D., Pearse, J., & Roe, C. (2005). Monitoring Rocky Intertidal Shorelines: A Role for the Public in Resource Management. *California And The World Ocean '02*. doi: 10.1061/40761(175)57
- Overmann, J. (2015). Significance and future role of microbial resource centers. *Systematic and Applied Microbiology*, 38(4), pp.258-265.
- Parisutham, V., Kim, T., & Lee, S. (2014). Feasibilities of consolidated bioprocessing microbes: From pretreatment to biofuel production. *Bioresource Technology*, 161, 431-440. doi: 10.1016/j.biortech.2014.03.114
- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., & Stenseke, M. et al. (2017). Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. *Current Opinion In Environmental Sustainability*, 26-27, 7-16. doi: 10.1016/j.cosust.2016.12.006
- Pattanayak, S., & Kramer, R. (2001). Pricing ecological services: Willingness to pay for drought mitigation from watershed protection in eastern Indonesia. *Water Resources Research*, 37(3), 771-778. doi: 10.1029/2000wr900320
- Peck, S. (1998). *Planning for Biodiversity: Issues and Examples*. Island Press.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 68 Tahun 1998. Tentang Kawasan Suaka Alam dan Kawasan Pelestarian Alam.
- Perry, Neil. (2017). What's the economic value of the Great Barrier Reef? It's priceless. *The Conversation*, June 29.
- Pimm, S., Jenkins, C., Abell, R., Brooks, T., Gittleman, J., & Joppa, L. et al. (2014). The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, 344(6187), 1246752-1246752. doi: 10.1126/science.1246752
- Pocock, M., Tweddle, J., Savage, J., Robinson, L., & Roy, H. (2017). The diversity and evolution of ecological and environmental citizen science. *PLOS ONE*, 12(4), e0172579. doi: 10.1371/journal.pone.0172579
- Polo, M. dan Latham, R. (1958). *The Travels of Marco Polo. Translated, with an introduction, by Ronald Latham*. Harmondsworth: Penguin Books.
- Potential of traditional medicine should be fostered, economic and social council president tells panel on attaining millennium development goals in public health | Meetings Coverage and Press Releases. (2019). Diambil dari <https://www.un.org/press/en/2009/ecosoc6385.doc.htm>
- Pramudji. (2004). Penanganan Hutan Mangrove di Kawasan Pesisir Indonesia: Suatu Program yang sangat Mendesak. *Oseana*, 29 (1): 19-26.

- Priess, J., Mimler, M., Klein, A., Schwarze, S., Tschardt, T., & Steffan-Dewenter, I. (2007). Linking deforestation scenarios to pollination services and economic returns in coffee agroforestry systems. *Ecological Applications*, 17(2), 407-417. doi: 10.1890/05-1795
- Rands, M., Adams, W., Bennun, L., Butchart, S., Clements, A., & Coomes, D. et al. (2010). Biodiversity Conservation: Challenges Beyond 2010. *Science*, 329(5997), 1298-1303. doi: 10.1126/science.1189138
- Reese, A. (2017). Newly discovered orangutan species is also the most endangered. *Nature*, 551(7679), 151-151. doi: 10.1038/nature.2017.22934
- Renema, W., Bellwood, D., Braga, J., Bromfield, K., Hall, R., & Johnson, K. et al. (2008). Hopping Hotspots: Global Shifts in Marine Biodiversity. *Science*, 321(5889), 654-657. doi: 10.1126/science.1155674
- Richards, A. (2001). Does Low Biodiversity Resulting from Modern Agricultural Practice Affect Crop Pollination and Yield?. *Annals Of Botany*, 88(2), 165-172. doi: 10.1006/anbo.2001.1463
- Richards, D., & Friess, D. (2015). Rates and drivers of mangrove deforestation in Southeast Asia, 2000-2012. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 113(2), 344-349. doi: 10.1073/pnas.1510272113
- Ricketts, T., Regetz, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S., Kremen, C., & Bogdanski, A. et al. (2008). Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns?. *Ecology Letters*, 11(5), 499-515. doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01157.x
- Rizal, A. (2017). Using economic values to evaluate management options for fish biodiversity in the Sikakap Strait, Indonesia. *Biodiversitas, Journal Of Biological Diversity*, 18(2), 575-581. doi: 10.13057/biodiv/dl180218
- Rockström, J., & Sukhdev, P. (2016). *How food connects all the SDGs*.
- Roy, D., Docker, M., Hehanussa, P., Heath, D. dan Haffner, G. (2004). Genetic and morphological data supporting the hypothesis of adaptive radiation in the endemic fish of Lake Matano. *Journal of Evolutionary Biology*, 17(6), pp.1268-1276.
- Sachoemar, S. I dan Heru Dwi Wahjono (2007). Kondisi Pencemaran Lingkungan di Teluk Jakarta. *Jurnal Kesehatan Lingkungan* 3(1): 37-49.
- Sakurai, H., Masukawa, H., Kitashima, M. dan Inoue, K. (2015). How Close We Are to Achieving Commercially Viable Large-Scale Photobiological Hydrogen Production by Cyanobacteria: A Review of the Biological Aspects. *Life*, 5(1), pp.997-1018.
- Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8-27. doi: 10.1016/j.biocon.2019.01.020
- Sanciangco, J., Carpenter, K., Etnoyer, P. dan Moretzsohn, F. (2013). Habitat Availability and Heterogeneity and the Indo-Pacific Warm Pool as Predictors of Marine Species Richness in the Tropical Indo-Pacific. *PLoS ONE*, 8(2), p.e56245.
- Science the Endless Frontier*. (2019). Diambil dari <https://www.nsf.gov/od/lpa/nsf50/vbush1945.htm>
- Sex and the Single Man. (2010). *The New York Times Magazine*. Diambil dari <https://www.nytimes.com/2010/07/11/magazine/11fob-q4-t.html>
- Shetty, P., Akil, H., Fizzanty, T., & Simamora, G. (2014). *Indonesia: The Atlas of Islamic World Science and Innovation*. Country Case Study. Royal Society.
- Siahaya, M., Hutauruk, T., Aponno, H., Hatulesila, J., & Mardhanie, A. (2016). Traditional ecological knowledge on shifting cultivation and forest management in East Borneo, Indonesia. *International Journal Of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 12(1-2), 14-23. doi: 10.1080/21513732.2016.1169559
- Silvertown, J. (2009). A new dawn for citizen science. *Trends In Ecology & Evolution*, 24(9), 467-471. doi: 10.1016/j.tree.2009.03.017
- Simberloff, D., Farr, J. A., Cox, J. dan Mehlman, D. W. (1992). Movement Corridors: Conservation Bargains or Poor Investments?. *Conservation Biology*, 6: 493-504. doi:10.1046/j.1523-1739.1992.06040493.x

- Skidmore, A., Pettorelli, N., Coops, N., Geller, G., Hansen, M., & Lucas, R. et al. (2015). Environmental science: Agree on biodiversity metrics to track from space. *Nature*, 523(7561), 403-405. doi: 10.1038/523403a
- Sodhi N.S., Koh L.P., Brook B.W., Ng PKL (2004) Southeast Asian biodiversity: an impending disaster. *Trends Ecol Evol* 19:654-660. doi:10.1016/j.tree.2004.09.006
- Solecki, R. (1975). Shanidar IV, a Neanderthal Flower Burial in Northern Iraq. *Science*, 190(4217), 880-881. doi: 10.1126/science.190.4217.880
- Solomon, S. (2008). *Climate change 2007*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Stattersfield A.J., Crosby MJ, Long A.J., Wege D.C. (1998). *Endemic Bird Areas of the World: Priorities for Biodiversity Conservation*. Cambridge (United Kingdom): BirdLife International.
- Steffan-Dewenter, I. (2003). Importance of Habitat Area and Landscape Context for Species Richness of Bees and Wasps in Fragmented Orchard Meadows. *Conservation Biology*, 17(4), 1036-1044. doi: 10.1046/j.1523-1739.2003.01575.x
- Steffan-Dewenter, I., & Tscharrntke, T. (1999). Effects of habitat isolation on pollinator communities and seed set. *Oecologia*, 121(3), 432-440. doi: 10.1007/s004420050949
- Su, X., & Miller, L. (2015). The discovery of artemisinin and the Nobel Prize in Physiology or Medicine. *Science China Life Sciences*, 58(11), 1175-1179. doi: 10.1007/s11427-015-4948-7
- Sukara, E. (2014). Tropical Forest Biodiversity to Provide Food, Health and Energy Solution of the Rapid Growth of Modern Society. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 803-808. doi: 10.1016/j.proenv.2014.03.097
- Sukara, E., & Lisdiyanti, E. (2016). *Exploring Indonesian microbial genetic resources for industrial application*.
- Sunderland, T. (2011). Food security: why is biodiversity important?. *International Forestry Review*, 13(3), 265-274. doi: 10.1505/146554811798293908
- Supriatna, J. (2008). *Melestarikan Alam Indonesia*. Jakarta: Yayasan Obor Indonesia.
- Supriatna, J. (2014). *Berwisata Alam di Taman Nasional*. Jakarta: Yayasan Obor Indonesia.
- Susilaningsih, D., Siburian, M. dan Murniasih, T. (2008). Biodiversity of Hydrocarbon-Producing Microalgae from oil Contaminated in Coastal Zone of Batam Island. *Marine Research in Indonesia*, 33(2).
- Talaue-McManus, L. (2000). Transboundary Diagnostic Analysis for the South China Sea. Dalam *EAS/RCU Technical Report Series No. 14* (pp. 1-99). Bangkok: UNEP.
- Tapilatu, Y. (2015). Status of Drug Discovery Research Based on Marine Organisms from Eastern Indonesia. *Procedia Chemistry*, 14, 484-492. doi: 10.1016/j.proche.2015.03.065
- TEEB - The Economics of Ecosystems and Biodiversity (2011). TEEB Manual for Cities: Ecosystem Services in Urban Management. [www.teebweb.org](http://www.teebweb.org)
- Texas Research Alliance - Connecting Research and Innovation in Dallas - Fort Worth. (2019). Diambil dari <http://www.texasresearchalliance.org/>
- The future of research universities. (2007). *EMBO Reports*, 8(9).
- Thebault, E., & Loreau, M. (2003). Food-web constraints on biodiversity-ecosystem functioning relationships. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 100(25), 14949-14954. doi: 10.1073/pnas.2434847100
- Thomas, T., Gilbert, J., & Meyer, F. (2012). Metagenomics - a guide from sampling to data analysis. *Microbial Informatics And Experimentation*, 2(1). doi: 10.1186/2042-5783-2-3
- Thresher, R.E dan Brothers, E.B. (1985). Pelagic duration, dispersal, and the distribution of Indo-Pacific coral-reef fishes. *Symp. Ser. Undersea Res.* 3(1):53-69.

- Toha, A., Sumitro, S., Widodo dan Hakim, L. (2015). Color diversity and distribution of sea urchin *Tripneustes gratilla* in Cenderawasih Bay ecoregion of Papua, Indonesia. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 41(3), pp.273-278.
- Timmermans, K. (2001). TRIPS, CBD and Traditional Medicines: Concepts and Questions. Report of an ASEAN Workshop on the TRIPS Agreement and Traditional Medicine. World Health Organization Publication.
- Undang-Undang Republik Indonesia. Nomor 5 Tahun 1990. Tentang Konservasi Sumber Daya Alam Hayati Dan Ekosistemnya.
- Undang-Undang Republik Indonesia. Nomor 41 Tahun 1999. Tentang Kehutanan.
- UNEP-WCMC (2001). *United Nations Environment World Conservation Monitoring Center. Annual report.*
- Urashi C, Teshima KM, Minobe S, Koizumi O, Inomata N. (2013). Inferences of evolutionary history of a widely distributed mangrove species, *Bruguiera gymnorrhiza*, in the Indo-West Pacific region. *Ecology and Evolution*, 3:2251-2261. DOI 10.1002/ece3.624.
- Urban, M. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234), 571-573. doi: 10.1126/science.aaa4984
- Urban, M., Bocedi, G., Hendry, A., Mihoub, J., Peer, G., & Singer, A. et al. (2016). Improving the forecast for biodiversity under climate change. *Science*, 353(6304), aad8466-aad8466. doi: 10.1126/science.aad8466
- Vaillant, J., Haffner, G. dan Cristescu, M. (2011). The Ancient Lakes of Indonesia: Towards Integrated Research on Speciation. *Integrative and Comparative Biology*, 51(4), pp.634-643.
- Van Beukering, P., Cesar, H., & Janssen, M. (2003). Economic valuation of the Leuser National Park on Sumatra, Indonesia. *Ecological Economics*, 44(1), 43-62. doi: 10.1016/s0921-8009(02)00224-0
- Van Der Heijden, M., Bakker, R., Verwaal, J., Scheublin, T., Rutten, M., Van Logtestijn, R. dan Staehelin, C. (2006). Symbiotic bacteria as a determinant of plant community structure and plant productivity in dune grassland. *FEMS Microbiology Ecology*, 56(2), pp.178-187.
- Van der Heijden, M., Streitwolf-Engel, R., Riedl, R., Siegrist, S., Neudecker, A., Ineichen, K., Boller, T., Wiemken, A. dan Sanders, I. (2006). The mycorrhizal contribution to plant productivity, plant nutrition and soil structure in experimental grassland. *New Phytologist*, 172(4), pp.739-752.
- Van Paddenburg, A., Bassi, A., Buter, E., Cosslett C. & Dean, A. 2012. *Heart of Borneo: Investing in Nature for a Green Economy*. WWF Heart of Borneo Global Initiative, Jakarta.
- Van Oosten, C. (2013). Restoring Landscapes—Governing Place: A Learning Approach to Forest Landscape Restoration. *Journal Of Sustainable Forestry*, 32(7), 659-676. doi: 10.1080/10549811.2013.818551
- Vedder, A., dan B. Weber. (1990). "The Mountain Gorilla Project." Dalam *Living With Wildlife: Wildlife Resource Management with Local Participation in Africa*, ed. A. Kiss. Washington, DC: World Bank.
- Vézquez, D., & Gittleman, J. (1998). Biodiversity conservation: Does phylogeny matter?. *Current Biology*, 8(11), R379-R381. doi: 10.1016/s0960-9822(98)70242-8
- Vincent, J., Aden, J., Dore, G., Adriani, M., Rambe, V., & Walton, T. (2002). Public Environmental Expenditures In Indonesia. *Bulletin Of Indonesian Economic Studies*, 38(1), 61-74. doi: 10.1080/000749102753620284
- Vogler, C., Benzie, J., Lessios, H., Barber, P. dan Wörheide, G. (2008). A threat to coral reefs multiplied? Four species of crown-of-thorns starfish. *Biology Letters*, 4(6), pp.696-699.
- Wallace, A. (2016). *Malay Archipelago*. Read Books Ltd.
- Waluyo, H., Sadikin, S., Gustami, & Whiting, P. (2005). An economic valuation of biodiversity in the karst area of Maros, South Sulawesi, Indonesia. *Biodiversity*, 6(2), 24-26. doi: 10.1080/14888386.2005.9712763

Wang, W., Xu, S., Ren, Z., Tao, L., Jiang, J., & Zheng, S. (2015). Application of metagenomics in the human gut microbiome. *World Journal Of Gastroenterology*, 21(3), 803. doi: 10.3748/wjg.v21.i3.803

Wargasmita, S. (2005). Ancaman Invasi Ikan Asing terhadap Keanekaragaman Ikan Asli. *Jurnal Iktiologi Indonesia*, Vol 5, Hal:(No 1, Juni 2005), 5-10.

Watts, D., & Strogatz, S. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393(6684), 440-442. doi: 10.1038/30918

What Is Ecotourism - The International Ecotourism Society. (2019). Diambil dari <http://www.ecotourism.org/what-is-ecotourism>

Whitman, W., Coleman, D., & Wiebe, W. (1998). Prokaryotes: The unseen majority. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 95(12), 6578-6583. doi: 10.1073/pnas.95.12.6578

Whitmore, T. (1987). *Biogeographical evolution of the Malay Archipelago*. Oxford: Clarendon Press.

Widjaja, E., Rahayuningsih, Y., Rahajoe, J., Ubaidillah, R., Maryanto, I., Walujo, E. dan Semiadi, G. (2014). *Kekinian Keanekaragaman Hayati Indonesia 2014*. Jakarta: LIPI Press.

Williams, S., Ambo-Rappe, R., Sur, C., Abbott, J. dan Limbong, S. (2017). Species richness accelerates marine ecosystem restoration in the Coral Triangle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(45), pp.11986-11991.

Wilson, A., & Jetz, W. (2016). Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions. *PLOS Biology*, 14(3), e1002415. doi: 10.1371/journal.pbio.1002415

Witono. (2017). Interkonferensi dan Seminar Nasional Lingkungan Hidup. Kasi Pengendalian Pencemaran Air Rumah Tangga, Direktorat Jenderal Pengendalian Pencemaran dan Kerusakan Lingkungan, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan), 23-24 Agustus 2017, Palangkaraya-Indonesia.

World Health Organization. (2013). *WHO traditional medicine strategy, 2014-2023*. Geneva.

Yasuda, N., Nagai, S., Hamaguchi, M., Okaji, K., Gérard, K. dan Nadaoka, K. (2009). Gene flow of *Acanthaster planci*(L.) in relation to ocean currents revealed by microsatellite analysis. *Molecular Ecology*, 18(8), pp.1574-1590.

Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., & Maeda, Y. et al. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196-1199. doi: 10.1126/science.aad6359

Young, O. (2002). *The institutional dimensions of environmental change*. Cambridge, Mass.: MIT Press.

Zhang, G., Liu, J., & Ding, W. (2011). Decreased Xylitol Formation during Xylose Fermentation in *Saccharomyces cerevisiae* Due to Overexpression of Water-Forming NADH Oxidase. *Applied And Environmental Microbiology*, 78(4), 1081-1086. doi: 10.1128/aem.06635-11

<https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S0960-9822%2817%2931245-9>

<https://www.theguardian.com/science/2017/nov/02/new-species-of-orangutan-discovered-in-northern-sumatra-tapanuli-pongo-tapanuliensis>

<http://fortune.com/2018/03/27/viagra-anniversary-pfizer/>

<https://ekonomi.bisnis.com/read/20170802/257/677271/naik-10-tahun-lalu-pemerintah-terus-pacu-industri-jamu-dan-kosmetik>

# Glosarium

**Afrodisiak:** zat yang mampu meningkatkan gairah seksual.

**Anaerob:** secara harfiah berarti "tanpa udara".

**Anomali:** tidak seperti biasanya, kejadian yang tidak bisa diperkirakan, sehingga sesuatu yang terjadi akan berbeda dari kejadian biasanya.

**Batimetri:** ilmu yang mempelajari kedalaman di bawah air dan studi tentang tiga dimensi lantai samudra atau danau.

**Biogeografis:** cabang ilmu biologi yang mempelajari tentang keanekaragaman hayati berdasarkan ruang dan waktu. Cabang keilmuan ini bertujuan mengungkapkan mengenai kehidupan suatu organisme dan apa yang mempengaruhi keberadaan dan persebarannya.

**Bioinformatika:** ilmu yang mempelajari penerapan teknik komputasional untuk mengelola dan menganalisis informasi biologis. Bidang ini mencakup penerapan metode-metode matematika, statistika, dan informatika untuk memecahkan masalah-masalah biologis, terutama dengan menggunakan sekuens DNA dan asam amino serta informasi yang berkaitan dengannya.

**Biomimikri:** ilmu yang menempatkan objek alam (khususnya makhluk hidup) sebagai model perancangan dan proses, menirunya dan diaplikasikan pada teknologi modern.

**Bioprospeksi:** upaya pencarian, penelitian, pengumpulan, dan pemilihan sumber daya hayati dan pengetahuan tradisional untuk mendapatkan materi yang bernilai komersial, terutama mengacu pada industri farmasi, bioteknologi, dan pertanian.

**Biorekayasa:** rekayasa hayati (*bioengineering*) adalah aplikasi dari konsep dan metode biologi, fisika, kimia, dan ilmu komputer untuk memecahkan masalah terkait makhluk hidup menggunakan aplikasi dan analisis teknik.

**Ekonomi sirkuler:** konsep ekonomi yang diciptakan guna mengurangi eksploitasi sumber daya alam yang merusak lingkungan, kesehatan, dan ekonomi.

**Etnobotani:** dari kata "etnologi"—kajian mengenai budaya, dan "botani"—kajian mengenai tumbuhan, adalah suatu bidang ilmu yang mempelajari hubungan antara manusia dan tumbuhan. Ahli etnobotani bertugas mendokumentasikan dan menjelaskan hubungan kompleks antara budaya dan penggunaan tumbuhan dengan fokus utama pada bagaimana tumbuhan digunakan, dikelola, dan dipersepsikan pada berbagai lingkungan masyarakat, misalnya sebagai makanan, obat, praktik keagamaan, kosmetik, pewarna, tekstil, pakaian, konstruksi, alat, mata uang, sastra, ritual, serta kehidupan sosial.

**Filogenetik:** cabang biologi yang mempelajari dan menentukan hubungan evolusioner, atau pola keturunan kelompok organisme.

**Fisiologi:** disebut juga ilmu faal, salah satu cabang biologi yang mempelajari berlangsungnya sistem kehidupan. Fisiologi menggunakan berbagai metode untuk mempelajari biomolekul, sel, jaringan, organ, sistem organ, dan organisme secara keseluruhan menjalankan fungsi fisik dan kimiawinya untuk mendukung kehidupan.

**Fitofarmaka:** sediaan obat bahan alam yang telah dibuktikan keamanan dan khasiatnya secara ilmiah dengan uji praklinik dan uji klinik.

**Genomik:** keseluruhan informasi genetik yang dimiliki suatu sel atau organisme, atau khususnya keseluruhan asam nukleat yang memuat informasi tersebut. Istilah genom diperkenalkan oleh Hans Winkler dari Universitas Hamburg, Jerman, pada tahun 1920, mungkin sebagai gabungan dari kata gen dan kromosom atau dimaksudkan untuk menyatakan kumpulan gen.

**Geomorfologi:** ilmu yang mempelajari tentang batuan dan bentuk luar bumi.

**Jasa ekosistem:** manfaat yang diperoleh manusia dari ekosistem.

**Kawasan Wallacea:** kawasan biogeografis yang mencakup sekelompok pulau-pulau dan kepulauan di wilayah Indonesia bagian tengah, terpisah dari paparan benua-benua Asia dan Australia oleh selat-selat yang dalam. Nama Wallacea sendiri diambil dari seorang naturalis Alfred

Russel Wallace yang telah mendeskripsikan batas-batas biologis kawasan zoogeografis yang dikenal sebagai Garis Wallace. Garis Wallacea terentang antara Bali dan Lombok, Kalimantan dan Sulawesi, serta Kepulauan Maluku dan Papua.

**Lontara Assikalibineang:** manuskrip kuno dengan tulisan aksara lontara. *Assikalaibineng* berarti cara berhubungan suami-istri, atau kitab tuntunan malam pertama bagi pengantin baru. Kitab ini tak hanya berisi tentang bagaimana hubungan seksual antara suami-istri, tetapi juga berisi tentang teknik sebelum dan sesudah berhubungan badan termasuk doa-doanya.

**Lontara Pabbura:** pengobatan tradisional leluhur Bugis berdasarkan lontara Bone yang didasarkan pada pemahaman terhadap tumbuh-tumbuhan sekitar, budaya, serta ajaran Islam. Salah satu filosofi yang dipegang teguh adalah bahwa setiap penyakit pasti ada obatnya yang disediakan oleh Tuhan di alam semesta (Hamid 2008).

**Magnum opus:** karya besar (Latin).

**Metagenomik:** ilmu yang mempelajari metagenom yaitu seluruh DNA dari suatu ekosistem secara lengkap, bukan hanya dari satu organisme saja. Dengan membaca seluruh cetak biru genetik dari seluruh spesies organisme yang ada pada suatu ekosistem, dapat diketahui jenis-jenis organisme (mikrob) apa saja yang terdapat dalam ekosistem mikro tersebut, serta interaksi yang terjadi di dalamnya.

**Mikrobiom:** mikroorganisme di dalam tubuh kita yang umumnya berguna buat manusia supaya terhindar dari penyakit-penyakit tertentu.

**Morfologi:** secara harafiah, morfologi berarti pengetahuan tentang bentuk (*morphos*). Dalam biologi, morfologi adalah ilmu yang mempelajari bentuk organisme, terutama hewan dan tumbuhan yang mencakup bagian-bagiannya.

**Obduksi:** atau disebut penekukan, yang terjadi ketika lempeng samudra bertabrakan dengan lempeng benua, dan menelusup ke bawah lempeng benua tersebut.

**Paleontologi:** disiplin ilmu yang mempelajari sejarah kehidupan di bumi dan tanaman serta hewan purba berdasarkan fosil.

**Penyakit kardiovaskuler:** penyakit yang berkaitan dengan jantung dan pembuluh darah, misalnya penyakit jantung iskemik, stroke, penyakit jantung akibat tekanan darah tinggi, penyakit jantung rematik, penyakit jantung bawaan, dan endocarditis.

**Polinasi:** penyerbukan, yaitu jatuhnya serbuk sari pada permukaan putik. Pada sebagian besar bunga, peristiwa ini berarti "jatuh pada bagian kepala putik". Penyerbukan merupakan bagian penting dari proses reproduksi tumbuhan berbiji.

**Sains bioremediasi:** ilmu tentang penggunaan mikroorganisme untuk mengurangi polutan di lingkungan.

**Serat Chentini:** salah satu karya sastra terbesar dalam kesusastraan Jawa Baru. *Serat Centhini* menghimpun segala macam ilmu pengetahuan dan kebudayaan Jawa dan disampaikan dalam bentuk tembang.

**Spatio-temporal:** *database* yang mengelola informasi ruang dan waktu.

**Subduksi:** atau disebut penunjaman, yang terjadi akibat perbedaan massa jenis antara kedua jenis lempeng sehingga lempeng yang lebih besar massa jenisnya menunjam ke bawah lempeng lainnya. Penunjaman ini terjadi di batas antar lempeng samudra dan benua atau di antara sesama lempeng samudra. Zona penunjaman adalah salah satu tempat bagi terbentuknya deretan gunung berapi dan gempa bumi.

**Taksonomi:** pengelompokan suatu hal berdasarkan hierarki (tingkatan) tertentu. Taksonomi yang lebih tinggi bersifat lebih umum dan taksonomi yang lebih rendah bersifat lebih spesifik.

**Upwelling:** fenomena di mana air laut yang lebih dingin dan bermassa jenis lebih besar bergerak dari dasar laut ke permukaan akibat pergerakan angin di atasnya. Pergerakan ini umumnya membawa nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan fitoplankton di dekat permukaan laut sehingga memperkaya biomassa di kawasan tersebut.

**Ventilasi hidrotermal:** retakan di permukaan planet yang secara geotermal memanaskan perairan. Ventilasi hidrotermal biasa ditemukan di dekat daerah yang aktif secara vulkanik, area di mana lempeng tektonik bergerak. Fitur ini ditemukan di punggung tengah samudra (kedalaman 3.000 meter) namun ada juga yang berada di laut dangkal. Rentang suhu lubang berkisar 5-100°C, pancaran asap hitam panasnya berkisar 250-400°C, sedang suhu sekitar lubang berkisar 8-35°C. Ekosistem ventilasi hidrotermal memiliki produktivitas yang cukup tinggi karena adanya aktivitas kemosintesis bakteri yang hidup bersimbiosis dengan cacing tabung *Riftia pachyptila*. Karbohidrat yang dihasilkan bakteri berfungsi bagi hewan agar dapat hidup di lingkungan yang ekstrem suhunya. Kemosintesis dilakukan dengan memanfaatkan H<sub>2</sub>S yang tersedia melimpah.

# Lampiran

## LAMPIRAN 1

Tim Penyunting Tempo Institute  
**Idrus F. Shahab**  
**Mahardika**  
**Mardiyah Chamim**  
**Purwanto Setiadi**  
**Yosep Suprayogi**

## LAMPIRAN 2

Jejaring Ilmuwan Muda Indonesia  
**Achmad Dinoto**  
**Adiwan Fahlan Aritenang**  
**Ahmad Faried**  
**Ahmad Najib Burhani**  
**Ahmad Rusdan Handoyo Utomo**  
**Aiyen B. Tjoa**  
**Akhmad Sabarudin**  
**Ali Akbar**  
**Almakin**  
**Aprina Murwanti**  
**Ari Winasti Satyagraha**  
**Arief Anshori Yusuf**  
**Arif Nuryawan**  
**Arli Aditya Parikesit**  
**Bambang Kuswandi**  
**Berry Juliandi**  
**Cecilia Anna Seumahu**  
**Claudia Surjadaja**  
**Daniel Suryadarma**  
**Dave Lumenta**  
**Deni Noviana**  
**Didi Rosiyadi**  
**Dwinita Larasati**  
**Eniya Listiani Dewi**  
**Enos Tangke Arung**  
**Felycia Edi Soetaredjo**  
**Fenny Martha Dwivany**

**Firman Witoelar**  
**Firzan Nainu**  
**Hadiyanto**  
**Harlinda Kuspradini**  
**Harry Susianto**  
**Hawis Madduppa**  
**Hendrik Oktendy Lintang**  
**Hilman Latif**  
**Husin Alatas**  
**Inaya Rakhmani**  
**Indriania Kartini**  
**Intan Suci Nurhati**  
**Iqbal Ridzi Fahdri Elyazar**  
**Jajah Fachiroh**  
**Kurniawati Hastuti Dewi**  
**M. Sayuti**  
**Marlina Ardiyani**  
**Mochamad Chalid**  
**Muhaimin**  
**Muhammad Ikhlasul Amal**  
**Natalita Maulani Nursam**  
**Neni Nurainy**  
**Nur Arfiyah Febriyani**  
**Perdinan**  
**Philips J Vermonte**  
**Premana W. Premadi**  
**Pri Utami**  
**Puspita Lisdiyanti**  
**Retno Supriyanti**  
**Rikson Siburian**  
**Rino Rakhmata Mukti**  
**Ronny Martien**  
**Siana Halim**  
**Sri Fatmawati**  
**Stefani Haning Swarati Nugroho**  
**Suharyo Sumowidagdo**  
**Sulfikar Amir**  
**Tatas H. P. Brotosudarmo**  
**Teguh Dartanto**  
**Topik Hidayat**  
**Tuswadi**  
**Vanny Narita**  
**Wenny Irawaty**  
**Widiastuti Karim**  
**Yanri W. Subronto**  
**Yanuar Nugroho**  
**Yoga Divayana**  
**Yohanes Kurniawan**  
**Yosmina Tapilatu**  
**Yudi Darma**  
**Yuni Krisyuningsih Krisnandi**

### **LAMPIRAN 3**

Terima Kasih Khusus  
**Augy Syahailatua**  
**Brigitta Isworo Laksmi**  
**Daniel Murdiyarso**  
**Diah S. Saminarsih**  
**Djoko Iskandar**  
**Emil Salim**  
**Endah Murniningtyas**  
**Endang Sukara**  
**Eniya L. Dewi**  
**Gino Valentino Limmon**  
**Hawis Madduppa**  
**Herry Subagiadi**  
**Ilyas Asaad**  
**Mubariq Ahmad**

### **LAMPIRAN 4**

Tim Monitor  
**Amin Abdullah**  
**Sofia Mubarika**  
**Terry Mart**



Akademi Ilmu Pengetahuan Indonesia (AIPI) didirikan pada tahun 1990 di bawah Undang-undang Republik Indonesia No. 8/1990 tentang Akademi Ilmu Pengetahuan Indonesia. Akademi ini dibentuk sebagai badan independen untuk memberikan pendapat, saran, dan nasihat kepada pemerintah dan masyarakat pada akuisisi, pengembangan, serta penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi. AIPI terbagi dalam lima komisi yaitu Komisi Ilmu Pengetahuan Dasar, Komisi Ilmu Kedokteran, Komisi Ilmu Rekayasa, Komisi Ilmu Sosial, dan Komisi Kebudayaan. AIPI berupaya mempromosikan ilmu pengetahuan melalui berbagai aktivitas seperti konferensi ilmiah dan forum diskusi kebijakan, publikasi, serta pengembangan hubungan nasional dan internasional. Profesor Satryo Soemantri Brodjonegoro saat ini menjabat sebagai Ketua AIPI.



Akademi Ilmuwan Muda Indonesia (ALMI) merupakan organisasi otonom ilmuwan muda Indonesia yang bernaung di bawah Akademi Ilmu Pengetahuan Indonesia. ALMI berdiri secara resmi dengan ditandatanganinya Keputusan Presiden RI No.9/2016 tentang Revisi Anggaran Dasar dan Anggaran Rumah Tangga AIPI, pada 29 Februari 2016. Lahirnya ALMI berawal dari penyusunan buku *SAINS45: Agenda Ilmu Pengetahuan Indonesia Menyongsong Satu Abad Kemerdekaan* oleh jejaring ilmuwan muda Indonesia, para alumni inisiatif *Frontiers of Science AIPI*. Keanggotaan ALMI berdasarkan nominasi dan pemilihan. Saat ini, ALMI bekerja pada empat fokus: Sains Garda Depan, Sains dan Masyarakat, Sains dan Kebijakan, serta Sains dan Pendidikan. Profesor Jamaluddin Jompa merupakan ketua perdana ALMI. Ketua ALMI saat ini adalah Dr. Alan F. Koropitan.

AIPI dan ALMI  
Gedung Perpustakaan Nasional RI, lantai 17-18  
Jalan Medan Merdeka Selatan No. 11  
Jakarta Pusat

[www.aipi.or.id](http://www.aipi.or.id)

[www.almi.or.id](http://www.almi.or.id)

