



KERENTANAN-KETAHANAN KAWASAN LANDAI PESISIR DAN PULAU KECIL

MITIGASI DAN ADAPTASINYA



Wahyoe Soepri Hantoro

Buku ini tidak diperjualbelikan.

KERENTANAN-KETAHANAN KAWASAN LANDAI PESISIR DAN PULAU KECIL

MITIGASI DAN ADAPTASINYA



Buku ini tidak diperjualbelikan.

Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh atau sebagian dari buku ini dalam bentuk atau cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

All Rights Reserved

Buku ini tidak diperjualbelikan.

KERENTANAN-KETAHANAN KAWASAN LANDAI PESISIR DAN PULAU KECIL

MITIGASI DAN ADAPTASINYA

Wahyoe Soepri Hantoro



LIPI Press

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2020 Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
Pusat Penelitian Geoteknologi

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Kerentanan-Ketahanan Kawasan Landai Pesisir dan Pulau Kecil: Mitigasi dan Adaptasinya/
Wahyoe Soepri Hantoro—Jakarta: LIPI Press, 2020.

xviii hlm. + 144 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-602-496-086-5 (*e-book*)

- | | |
|-------------------------|-------------------|
| 1. Kerentanan-Ketahanan | 2. Landai Pesisir |
| 3. Pulau Kecil | 4. Mitigasi |

551.457

Copyeditor : Risma Wahyu Hartiningsih dan Tantrina Dwi Aprianita
Proofreader : Noviasuti Putri Indrasari dan Martinus Helmiawan
Penata isi : Siti Qomariyah dan Meita Safitri
Desainer sampul : D.E.I.R. Mahelingga

Cetakan Pertama : Februari 2020



Diterbitkan oleh:
LIPI Press, anggota Ikapi
Gedung PDDI LIPI, Lantai 6
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta 12710
Telp.: (021) 573 3465
e-mail: press@mail.lipi.go.id
website: lipipress.lipi.go.id

 LIPI Press
 @lipi_press

Buku ini merupakan karya buku yang terpilih
dalam Program Akuisisi Pengetahuan Lokal 2020
Balai Media dan Reproduksi (LIPI Press),
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR	ix
PENGANTAR PENERBIT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
PRAKATA	xvii
BAB I. KAWASAN PULAU KECIL DAN PESISIR LANDAI	1
A. Latar belakang umum	3
1. Fisiografi busur kepulauan Indonesia	3
2. Cuaca dan iklim	6
3. Kelautan	12
4. Geologi	20
B. Latar belakang non fisik	26
1. Sosial budaya kependudukan	26
2. Kesepakatan adat	28
C. Potensi dan daya dukung	29
1. Sumber daya alam dan lingkungan	29
2. Sumber ancaman bahaya	30
3. Komunikasi dan transportasi	31
D. Pemerintahan dan pengelolaan wilayah	32
1. Tata kelola dan ruang	32
2. RTRT dan RPJM/P	34
E. Dasar Pemikiran dan Pendekatan	33
BAB II. ISU SEPUTAR PULAU KECIL DAN PESISIR LANDAI	
A. Daya dukung sumber daya alam-lingkungan: Keterbatasan dan dampak negatif pengelolaan	35

Buku ini tidak diperjualbelikan.

B. Kerentanan pada kejadian ekstrem alamiah	39
1. Pemanasan global gangguan cuaca dan iklim	40
2. Bahaya kejadian ekstrem geologi	42
C. Kawasan perbatasan dan daerah tertinggal	43
D. Kependudukan sosial ekonomi dan budaya	43
E. Tekanan eksplotasi berlebih dan limbah	44

BAB III. BENCANA DAN KERENTANAN PULAU KECIL

A. Siklus dan tahap respons kebencanaan	47
1. Bencana, kerentanan dan pulau kecil	49
2. Siklus kejadian bencana dan responsnya	53
B. Konsep bahaya dan bencana muka laut tinggi	55
1. Tinggi muka air laut: (H_{total}) dalam meter	55
2. Jangkauan air laut: (C_{total} atau C_{e1}) dalam km^2	60
C. Besaran kejadian pemicu bencana: (E) erg	62
D. Kerentanan dan Indeks kerentanan	63
1. Indeks kerentanan fisik ($IV_{vul,f}$)	65
2. Kerentanan lingkungan (Bio-Kimia) ($IV_{vul,b}$)	66
3. Kerentanan sosio-demografi ($IV_{vul,s}$)	67
4. Kerentanan ekonomi-prasarana: ($IV_{vul,p}$)	69
E. Konsep besaran kejadian ekstrem	70
1. Besaran bahaya: $M_{H,e1}$	71
2. Besaran bencana: $M_{D,e1}$	72
3. Besaran kerugian: $M_{L,e1}$	73
F. Risiko dan Analisis Risiko	75
G. Contoh kejadian ekstrem dan penerapan rumusan	80
1. Ketinggian muka laut dan jangkauan genangan	80
2. Kejadian pemicu bencana	89
3. Kerentanan dan indeks kerentanan	92
4. Besaran bahaya, bencana dan kerugian	94
5. Risiko dan kemampuan menghadapi bahaya	99

BAB IV. ADAPTASI-MITIGASI DAN KETAHANAN

A. Konsep Adaptasi, rehabilitasi, dan peningkatan ketahanan	107
B. Rumusan rehabilitasi, adaptasi, dan peningkatan ketahanan	115
1. Rehabilitasi: (Rhb)	116
2. Adaptasi: (Adp)	118
3. Penguatan Ketahanan: ($E.res$)	119
C. Strategi mitigasi dan adaptasi	121
D. Strategi peningkatan ketahanan, ketangguhan dan kelenturan	124
E. Pembuatan ekosistem pelindung pantai	126
F. Data dan informasi yang diperlukan	131
G. Batasan dan kendala	135

**BAB V. PESISIR LANDAI DAN PULAU KECIL BUSUR KEPULAUAN IN-
DONESIA**

A. Dinamika alam dan kerentanan-ketahanan	137
B. Mitigasi-adaptasi terhadap ancaman bahaya kejadian ekstrem	138
DAFTAR PUSTAKA	141
INDEKS	147

Buku ini tidak diperjualbelikan.



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Peta Fisiografi Wilayah Indonesia dan Sekitarnya	4
Gambar 2.	Pembagian Mintakat Hujan di Benua Maritim Indonesia	7
Gambar 3.	Peta Lokasi Perbedaan Curah Hujan di Beberapa Tempat di Indonesia	9
Gambar 4.	Peta Sebaran Lintasan Badai Tropis di Dunia dan Peta Cuaca Saat Terjadi Badai Tropis di Asia-Australia	10
Gambar 5.	Peta Arah dan Kecepatan Lintasan Gerakan Massa Udara dengan Dua Pusat Badai Tropis	10
Gambar 6.	Animasi Citra 6 Jam Terakhir Cuaca Sebaran Awan di Indonesia	11
Gambar 7.	Peta Sebaran Kepadatan Relatif dan Gerakan Massa Awan Ekuatorial di Kawasan Indonesia dan Pasifik Barat	12
Gambar 8.	Tinggi Gelombang Signifikan Rata-rata dalam Meter dari data ERA Interim Reanalisis Selama 21 Tahun (data dari tahun 1989–2009)	14
Gambar 9.	Model Ketinggian Gelombang Maksimum di Perairan Benua Maritim Indonesia	16
Gambar 10.	Kurva Kecenderungan Kenaikan Muka Laut Akibat Pemanasan Global	17
Gambar 11.	Model Kecenderungan Kenaikan Muka Laut Eustatik Dampak Pemanasan Global	18
Gambar 12.	Indeks Kerentanan Pulau Kecil dan Pesisir Landai Dampak Kenaikan Muka Laut Eustatik Global	19
Gambar 13.	Peta Geotektonik Indonesia dengan Gambaran Jalur Gunung Api Aktif serta Penunjaman	20
Gambar 14.	Peta Sebaran <i>Focal Point</i> Gempa dari Pelepasan Energi yang Diikuti oleh <i>Deformasi</i> yang dapat Memicu Gelombang Tsunami	22

Gambar 15. Peta sebaran pusat gempa bumi di Indonesia berikut lokasi <i>seismic gap</i>	23
Gambar 16. Peta model propagasi gelombang tsunami di perairan Maluku.	24
Gambar 17. Peta model propagasi gelombang tsunami di perairan Jawa Barat bagian selatan.	25
Gambar 18. Peran terumbu karang, mangrove, dan tumbuhan pelindung pesisir dalam bahaya kejadian ekstrem muka laut tinggi	39
Gambar 19. Siklus di antara dua kejadian bencana dengan tiap tahap tindakan.	48
Gambar 20. Tabulasi sintesa kerentanan dan ketahanan pulau kecil pada perspektif kebencanaan	50
Gambar 21. Perbandingan potensi pemicu dan tinggi gelombang muka laut ekstrem.	52
Gambar 22. Peta sebaran pemicu bahaya ekstrem geologi dan cuaca/iklim di Indonesia	56
Gambar 23. Diagram ketinggian muka laut dari berbagai kejadian alam yang berpotensi ancaman bahaya. SLR = <i>sea level rise</i> (kenaikan muka laut).	57
Gambar 24. Diagram potensi ekosistem alamiah dan buatan pada peredaman gelombang tsunami	77
Gambar 25. Peta risiko bahaya gelombang tsunami pesisir di Indonesia	78
Gambar 26. Peta jangkauan muka laut tinggi maksimum dari seluruh kejadian ekstrem di pesisir di Indonesia	79
Gambar 27. Peta citra satelit gambaran rupa dasar laut bagian barat Pulau Jawa dan lokasi untuk model muka laut tinggi.	81
Gambar 28. Peta kerentanan pesisir utara Jawa Barat	82
Gambar 29. Peta jangkauan rendaman pantai utara Jawa Barat akibat kenaikan muka laut 1m laut (eustatik)	85
Gambar 30. Peta jangkauan rendaman pantai utara Jawa barat akibat kenaikan muka laut (eustatik) 2 m	85
Gambar 31. Peta jangkauan rendaman pantai utara Jawa barat akibat kenaikan muka laut (eustatik) 2 dan 4 m	86
Gambar 32. Peta jangkauan rendaman pantai utara Jawa barat akibat kenaikan muka laut (eustatik) 2, 4 dan 5 m	86
Gambar 33. Peta (animasi) model penjalaran gelombang tsunami dampak letusan Krakatau 1883 (menit ke-40)	87
Gambar 34 a. Peta jangkauan rendaman pantai (15m) di Selat Sunda kawasan Banten akibat tsunami letusan Krakatau 1883	88
Gambar 34 b. Peta jangkauan rendaman pantai (20 m) di Selat Sunda kawasan Banten akibat tsunami letusan Krakatau 1883	89
Gambar 35 a dan b. Simulasi penjalaran gelombang tsunami di barat Sumatra pada menit ke-8 dan ke-13	90
Gambar 35 c dan d. Simulasi penjalaran gelombang tsunami di barat Sumatra pada menit ke-21 dan 36	91

Gambar 35	e dan f. Simulasi penjalaran gelombang tsunami di barat Sumatra pada menit ke-61 dan 82	92
Gambar 36	a dan b. Model simulasi gelombang yang melanda Pelabuhan Ratu dari tsunami di selatan Jawa.	95
Gambar 37.	Peta citra Landsat ETM sebelum dan setelah tsunami Aceh 2004 di kawasan sekitar Calang	96
Gambar 38.	Peta kerusakan dampak tsunami tahun 2004 di kawasan sekitar Lho Nga	97
Gambar 39	a dan b. Peta kecepatan penurunan beberapa pesisir pantai timur Sumatra dan utara Jawa (kiri) dan di Pekalongan (kanan)	98
Gambar 40	a dan b. Simulasi tsunami dari model gempa di selatan Banten (kiri) dan simulasi tsunami model gempa di Laut Banda (kanan)	100
Gambar 40	c dan d. Simulasi tsunami dari model gempa di Serawak (kiri) dan di Aceh (kanan) yang penjalaran gelombangnya menjangkau daerah luas memberi risiko tinggi bencana.	101
Gambar 41.	Model simulasi penjalaran gelombang yang dibangkitkan gempa di selatan Bali	102
Gambar 42	a dan b. Model simulasi penjalaran gelombang yang dibangkitkan gempa di selatan Bali ketika menerjang pesisir Kuta dan Sanur	103
Gambar 43.	Peta sebaran ketinggian gelombang di Indonesia selama bulan Januari, Agustus, dan ketika gelombang maksimum	104
Gambar 44.	Hubungan antara besaran-tinggi gelombang dengan waktu pembuatan penahan gelombang.	112
Gambar 45.	Hubungan antara besaran biaya rekayasa dengan waktu fungsi penahan gelombang	114
Gambar 46.	Penampang ideal ekosistem pantai di pesisir utara Pulau Panaitan (Oktober 2005)	128
Gambar 47.	Penampang ideal ekosistem pesisir Tanjungkarang ke Teluk Betung. Bangunan permukiman padat terdapat sepanjang pantai, terutama di Teluk Betung. Empasan gelombang mencapai 22 m.	129
Gambar 48.	Penampang ideal ekosistem pantai sepanjang pantai barat Teluk Lampung dari Kunjir hingga Canti	129
Gambar 49.	Penampang ideal ekosistem ruas pantai Merak-Pulau Rida dan sekitarnya (Oktober 2015) dan <i>run up</i> tsunami pada 1883 (>25 m)	130
Gambar 50.	Penampang ideal ekosistem pantai Anyer dan sekitarnya (kondisi Oktober 2005) dan <i>run up</i> tsunami pada 1883 (>25 m)	130
Gambar 51.	Penampang ideal ekosistem perairan pesisir kawasan Panimbang yang diwakili oleh mangrove di lahan basah dan sebagian di pantai	131



PENGANTAR PENERBIT

Sebagai penerbit ilmiah, LIPI Press mempunyai tanggung jawab untuk menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas LIPI Press untuk ikut serta dalam mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Buku *Kerentanan-Ketahanan Kawasan Landai Pesisir dan Pulau Kecil: Mitigasi dan Adaptasinya* ini menjawab tantangan akan berbagai potensi ancaman bencana yang mengintai kawasan landai pesisir dan pulau-pulau kecil Indonesia. Berbagai upaya atau tindakan penanggulangan dampak bencana yang disandang pulau kecil dan wilayah pesisir, misalnya tanggap darurat, pemulihan, penguatan dan penyiapan agar masyarakat tangguh menerima dampak kejadian ekstrem, telah dijelaskan secara rinci oleh penulis dalam buku ini,

Semoga buku ini dapat menjadi referensi bagi pemerintah, pemangku kepentingan, pembuat kebijakan sekaligus masyarakat dalam menghadapi perubahan iklim dan dalam menyiapkan strategi adaptasi sebagai upaya pengurangan tingkat kerentanan.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

LIPI Press

Buku ini tidak diperjualbelikan.



KATA PENGANTAR

Buku Kerentanan-Ketahanan Kawasan Landai Pesisir dan Pulau Kecil: Mitigasi dan Adaptasinya ini bermanfaat bagi pemerintah daerah yang kawasannya meliputi kawasan pantai landai dan pulau-pulau kecil atau bagi masyarakat yang bertempat tinggal atau berusaha di kawasan tersebut. Dalam konteks kekinian, buku ini hadir sangat tepat di tengah ancaman bencana alam geologi dan bencana hidrometeorologi.

Buku ini disusun dengan tujuan meningkatkan daya lentur dan daya tahan masyarakat kawasan landai pesisir dan pulau kecil. Di-harapkan buku ini dapat menjadi pegangan dalam upaya menurunkan tingkat kerentanan. Walaupun demikian, dinamika perubahan iklim atau hidrometeorologi pun perlu dicermati karena parameter-parameter yang sudah diketahui dapat berubah setiap saat dan berdampak pada model.

Terbitnya buku ini diharapkan dapat menyumbangkan pemikiran dan meningkatkan peran ilmu pengetahuan dalam membantu pemerintah dan masyarakat terkait dengan perubahan iklim, strategi adaptasi, dan penurunan tingkat kerentanan.

Haryadi Permana

Buku ini tidak diperjualbelikan.



PRAKATA

Gugusan pulau pembangun busur Kepulauan Indonesia terbentuk oleh proses dinamika bumi yang telah berlangsung lama dan menghasilkan keseimbangan pada gejala iklim-cuaca, laut, dan unsur astronomis memberi sumbangan. Keanekaragaman unsur yang membentuk pulau menghasilkan lingkungan dan sumber daya alam yang beragam pula. Ketika terjadi perubahan pada jenis dan besaran pemicu gangguan keseimbangan, tanggapan dari ekosistem pulau (daratan, pesisir, dan perairannya) juga beraneka ragam. Keberagaman kondisi fisik dan kemasyarakatan serta respons terhadap kejadian ekstrem dan keterbatasan jangkauan dari kawasan pusat pengelolannya, mendorong perlunya disiapkan nomenklatur dan formulasi unsur-unsur yang berkaitan dengan kebencanaan dan penanganannya.

Naskah ini merupakan hasil dari upaya mengenali dan memahami apa saja yang menjadi unsur perbedaan tanggap atau respons ekosistem, khususnya pesisir landai dan pulau kecil di Indonesia ketika terpapar gangguan yang terkait dengan cuaca, iklim, dan pemicu bencana laut tinggi lainnya. Pada kenyataannya, terdapat gejala lain di luar cuaca dan iklim yang dapat memicu bahaya dan membuat ekosistem tersebut rentan. Berdasarkan pengenalan dan pemahaman, formulasi dapat diajukan menjadi pendekatan kuantitatif yang akan membantu upaya atau tindakan menanggulangi dampak bencana yang disandang pulau kecil dan wilayah pesisir, misalnya tanggap darurat, pemulihan, penguatan dan penyiapan agar tangguh menerima dampak kejadian ekstrem.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Berdasarkan formulasi tersebut, dapat diusulkan berbagai cara pengurangan ancaman bahaya dan risiko kerusakan akibat bencana. Upaya pengurangan tersebut dapat berupa rekayasa teknis penguatan lingkungan. Upaya rekayasa penguatan lingkungan sebagai usaha pengurangan ancaman bahaya antara lain dengan pemulihan ekosistem yang telah ada atau membangun yang sesuai dengan lingkungannya. Selain menjadi pelindung, ekosistem tersebut dapat memberi nilai tambah ekonomi bagi masyarakat, misalnya sebagai penguat lingkungan wisata dan penghasil biota pesisir.

Buku ini disusun berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan terkait masalah dan penyelesaiannya di lingkungan pulau kecil dan pesisir landai di Indonesia. Penelitian tersebut adalah program tematik dan unggulan yang dibiayai oleh DIPA satuan kerja dan Program Kompetitif serta Unggulan LIPI. Luaran dari kegiatan-kegiatan tersebut telah disampaikan dalam bentuk laporan, jurnal, dan diterbitkan dalam bentuk buku. Terima kasih kepada Dr. Hamzah Latief dan Tjoek Aziz Soeprapto M.Sc. yang telah memberikan bahan berupa gambar. Terima kasih kepada Dr. Haryadi Permana atas saran dan dorongannya dalam penulisan buku ini.

Terima kasih juga kepada semua sahabat yang tidak disebutkan semua dalam naskah ini atas sumbangan data, kerja sama serta sarannya selama penelitian hingga penulisan buku ini. Terima kasih kepada pimpinan Puslit Geoteknologi LIPI yang selalu mendorong dan memfasilitasi penulis sehingga naskah ini dapat diterbitkan oleh LIPI Press. Kepada LIPI Press dan para pemeriksa yang telah bekerja keras melalui beberapa tahap perbaikan naskah, saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya. Selain itu, terima kasih kepada rekan sejawat peneliti, teknisi, dan narasumber atas kerja samanya sehingga terkumpul bahan untuk buku ini. Semoga kebaikan yang telah dilakukan rekan-rekan semua mendapat berkah dari Allah Swt.

Penulis

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Perkembangan teknologi memungkinkan dilakukannya penelitian yang didukung peralatan canggih dalam pengukuran berbagai unsur dinamika alam. Analisis data hasil penelitian dapat digunakan untuk mengenali dan mengungkapkan kejadian yang selama ini gejalanya hanya dideskripsikan berdasarkan pengamatan kualitatif atau kuantitatif sederhana. Semakin banyak dan lengkap data mewakili berbagai disiplin ilmu, semakin banyak teori dan metode yang mendukung pemahaman lebih baik terhadap gejala alam. Keadaan ini menambah wawasan manusia dalam mengenali dan memahami suatu kejadian dan kejadian lainnya yang ternyata saling berkaitan.

Walaupun telah banyak data dan informasi yang diperoleh serta berbagai macam gejala alam telah diungkapkan, masih banyak dinamika alam yang belum dapat dijelaskan dengan baik. Apakah gejala gangguan cuaca dan iklim sekarang ini hanya sebagian dari perjalanan dinamikanya yang telah berlangsung sejak lama? Apakah gejala tersebut sekadar simpangan ketika alam menerima dari dampak kegiatan manusia? Simpangan kejadian alam, yang adakalanya besarnya kuat dan dapat menghadirkan bahaya yang dirasakan sebagai dampak perubahan iklim skala global. Kejadian ekstrem tersebut, sejauh pengamatan data kondisi alam, masih pada tataran suatu gangguan. Kejadian ekstrem, khususnya yang berkaitan dengan cuacalah yang lebih sering muncul. Kejadian ekstrem ini sesungguhnya merupakan

ancaman yang dianggap sebagai kerentanan kawasan yang terpapar. Kejadian ekstrem tersebut—yang karena sering terjadi—telah menyebabkan pembiasaan pada masyarakat terpapar. Keadaan demikian seharusnya segera dimaknai dan ditangani sebagai suatu anomali (simpangan) yang memberikan dampak merugikan. Bila unsur penyebab hingga dampak kejadian ekstrem dapat dinyatakan besarnya, besar kerugian yang diakibatkan dapat diketahui.

Kegiatan manusia telah dituding berperan dalam memicu kejadian ekstrem yang berkaitan dengan cuaca dan iklim secara global. Namun, perlu dikenali dan dipahami lebih baik lagi tentang hal yang berkaitan dengan seluruh kawasan busur kepulauan Indonesia yang tersusun dari gugusan pulau besar dan kecil yang memiliki pesisir landai dan perairan terbatas. Pemahaman tersebut berkaitan dengan beberapa hal, yakni kepadatan penduduk yang tinggi dan kegiatan yang padat dengan segala dampak negatifnya menekan ekosistem pesisir landai, pulau kecil, dan perairan di sekitarnya.

Pulau kecil dan pesisir landai diperkirakan akan semakin menerima tekanan dari meningkatnya permukiman dan kegiatan manusia. Daya dukung sumber daya alam dan ekosistem bagi kegiatan setempat sudah jauh terlampaui. Oleh karena itu, diperlukan substitusi yang semakin tidak mudah diperoleh, mengingat hal sama juga telah dialami oleh kawasan lainnya. Tekanan beban fisik memicu penurunan tanah yang akan berpacu dengan kecepatan kenaikan muka laut eustatik sebagai dampak pemanasan global. Kerentanan terhadap ancaman bahaya alamiah diperkirakan meningkat seiring peningkatan jumlah penduduk yang terpapar. Tanpa harus mengaitkan semua kerentanan tersebut dengan isu perubahan iklim yang masih menjadi perdebatan, sesungguhnya pulau kecil dan pesisir landai sudah cukup berat memikul beban dari dampak peningkatan tekanan dampak kegiatan manusia (*anthropogen*).

Salah satu upaya mengurangi risiko bencana kawasan adalah dengan menyiapkan model skenario secermat mungkin untuk menghadapi setiap perubahan yang berdampak negatif. Skenario ini harus didasarkan pada pemahaman dinamika lingkungan kawasan dalam berbagai kondisi yang dianggap sebagai kejadian ekstrem alamiah

ataupun yang dipicu oleh tekanan manusia. Alam dan manusia harus saling berbagi peran dalam kemampuannya memberi tekanan, namun juga harus dianggap sebagai suatu kesatuan ketika disiapkan untuk menerima tekanan kejadian ekstrem.

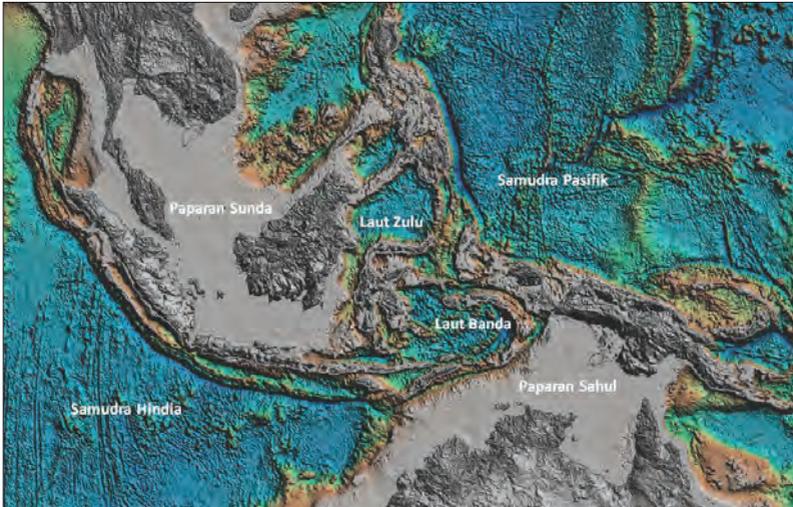
A. LATAR BELAKANG UMUM

Batasan latar belakang fisik yang dimaksud adalah yang berkaitan dengan kondisi fisik kawasan tersebut yang berubah dari waktu ke waktu dan dari daerah ke daerah lain. Gambaran spasial dapat disajikan lebih mudah, walau dalam resolusi terbatas, dibandingkan dalam bentuk kurva atau dalam bentuk narasi.

1. Fisiografi busur kepulauan Indonesia

Fisiografi kawasan kedaulatan Republik Indonesia berupa suatu untaian kepulauan yang sering disebut busur kepulauan. Seluruh gugusan pulau menempati atau di pinggiran perairan laut dangkal dan laut dalam (Gambar 1). Luas perairan mencapai $\frac{2}{3}$ luas wilayah negara kepulauan, sisanya berupa daratan yang terbentuk dari beberapa pulau utama (besar) dan ribuan pulau berukuran kecil hingga sangat kecil kurang dari 1 km^2 . Ketika zaman susut laut pada puncak zaman es terakhir, luas daratan busur kepulauan ini lebih dari $\frac{3}{5}$ luas lautan dan sebagian besar perairan dangkal menjadi daratan (Hantoro dkk. 2006; Hantoro 2016). Keadaan ini juga besar pengaruhnya pada keadaan alam di kawasan Asia Tenggara dan menjadi penentu pembentukan ekosistem yang diturunkan hingga sekarang. Luasnya daratan pada masa itu juga menjadi bagian dari terbentuknya keanekaragaman flora dan fauna serta manusia Indonesia. (Hantoro 2016).

Rasio antara daratan dan lautan serta tata letaknya di antara dua benua Asia dan Australia, membuat kawasan ini disebut sebagai Benua Maritim Indonesia. Gambar 1 menjelaskan fisiografi wilayah Indonesia dan sekitarnya. Indonesia terdiri atas daratan pulau dan bagian perairan yang berupa laut dangkal paparan tepi benua Sunda dan Sahul serta laut dalam Laut Banda, juga perairan Samudra Pasifik



Sumber: NASA-SRTM (2007)

Gambar 1. Peta Fisiografi Wilayah Indonesia dan Sekitarnya

dan Hindia yang membatasi sisi barat daya dan timur laut wilayah Indonesia. Pinggir luar beberapa pulau besar (Sumatra dan Jawa) di Indonesia bagian barat menghadap laut dalam Samudra Hindia, namun bagian pinggir dalam menghadap perairan dangkal yang menjadi pemisah dengan pulau Kalimantan. Pulau Sulawesi menempati bagian tengah wilayah Indonesia. Pulau ini terbentuk dari keratan-keratan, semula suatu mandala cekungan geologi yang terdorong ke arah barat akibat desakan kerak Australia yang bergerak ke arah utara dan barat, mendekati ke lempeng benua Asia. Laut Banda merupakan perairan laut dalam yang dikelilingi oleh busur gunung api. Busur yang tersusun dari pulau-pulau yang seolah mengapung di lautan ini di sekelilingnya dibatasi lautan luas dengan palung dalam (Samudra Hindia dan Pasifik) serta dangkalan paparan tepi benua Sahul sebagai bagian dari lempeng Benua Australia (Gambar 1). Fisiografi demikian menghasilkan dinamika laut dan dinamika atmosfer yang rumit, yang dipengaruhi tata letak pulau, selat, laut, dan gerakan bumi yang diikuti oleh bergesernya *Inter Tropical Convergent Zone (ITCZ)* di sekitar ekuator. Fisiografi benua maritim dan letaknya di antara samudra dan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

kontinen luas menyebabkan Indonesia memiliki dinamika cuaca dan lautan yang tidak lepas dari kondisi atmosferik, lautan, dan kebumihan kawasan lebih luas. Hubungan antara kondisi atmosfer, laut, dan bumi menyebabkan kondisi pesisir, pulau kecil, dan perairan di Indonesia menjadi beragam. Fisiografi demikian dapat memicu gejala alam yang meluas ke seluruh bagian bumi. Beberapa kawasan di pesisir, pulau kecil, dan perairan boleh jadi terpapar langsung dan tinggi perulangannya pada kejadian ekstrem alam; sementara beberapa tempat sebagai kawasan relatif terlindung. Dinamika alam menghasilkan jumlah dan jenis keanekaragaman yang tinggi, sementara bagian lain sebaliknya.

Berdasarkan fisiografi ini, pesisir dan pulau kecil dapat dibedakan menjadi yang berada di tepian, menghadap lautan dalam, dan pesisir dan pulau kecil yang luas. Kawasan ini berada di perairan di barat Sumatra, selatan Jawa, utara Papua, dan di sekeliling Laut Banda (Pusat Survei Geologi 2007). Di bagian ini, pesisir umumnya berupa dataran sempit dengan latar belakang tebing relatif terjal. Sebagai perairan terbuka, pantai kawasan ini memiliki perairan jernih yang memungkinkan tumbuh berkembangnya terumbu karang. Kehadiran ekosistem ini menghasilkan remah yang terendapkan di pantai dan membentuk hamparan putih. Pesisir yang menghadap ke perairan sisi dalam, dicirikan oleh pesisir landai dengan endapan alluvial serta ekosistem lahan basah. Misalnya, kawasan di pesisir timur Sumatra, utara Jawa, Kalimantan, dan Papua bagian selatan. Ciri pesisirnya adalah estuari lebar dan pulau delta lebar serta perairan tepi yang keruh karena tingginya muatan sedimen. Keadaan ini menghalangi tumbuh kembangnya terumbu karang, namun baik bagi perkembangan ekosistem mangrove. Alur sungai dari DAS luas semakin sarat beban muatan sedimen dengan luah yang semakin kuat perubahannya ketika kawasan hulu semakin rusak. Akresi pantai terjadi ketika sedimen kasar diendapkan di pantai, sementara sedimen halus terangkut dan diendapkan di perairan litoral sehingga menyebabkan pendangkalan. Di kawasan landai ini, pasang surut mendorong massa air laut masuk jauh. Hal ini kemudian berpengaruh pada kualitas air tawar di estuari. Pasang tinggi mengirim air laut ke darat

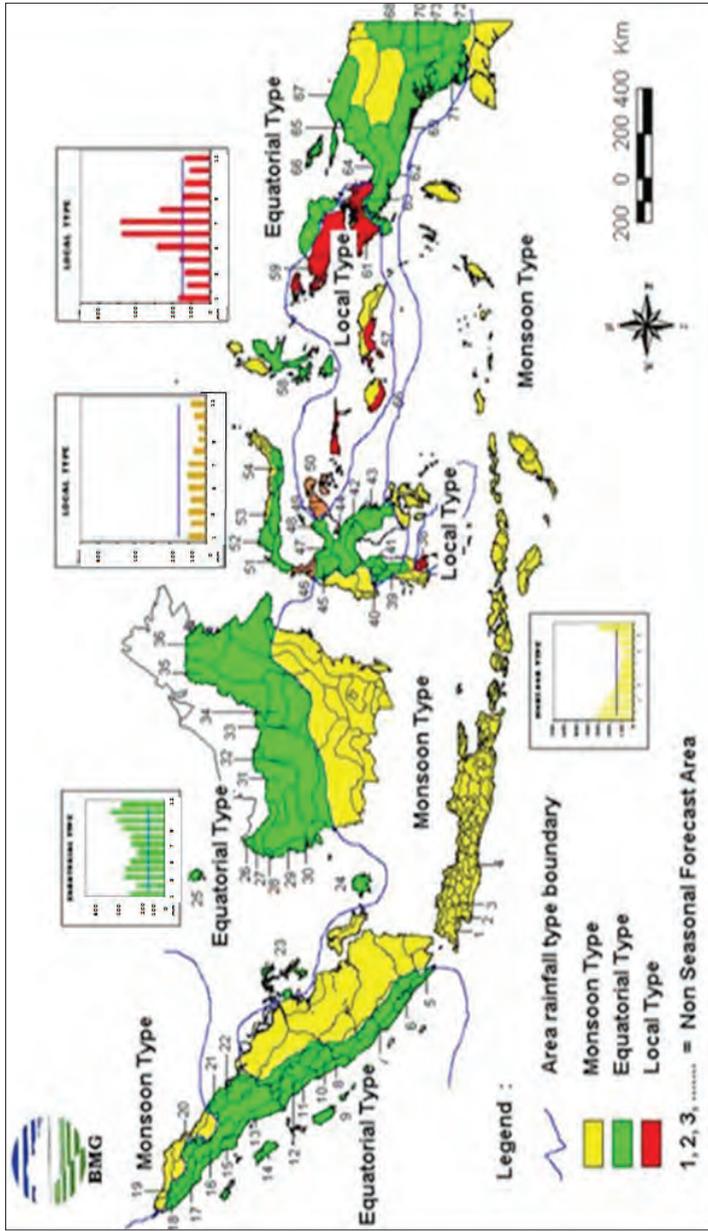
dan menyebabkan lingkungan rawa pantai menjadi payau. Hal demikian tidak ditemukan di kawasan yang tinggi gradien lerengnya.

2. Cuaca dan iklim

Benua maritim busur kepulauan Indonesia terletak di antara Benua Asia dan Australia. Letak inilah yang menyebabkan busur kepulauan memiliki sistem iklim monsun. Sistem iklim monsun dipicu oleh beda tekanan udara di antara dua benua dan menyebabkan aliran udara yang melintas Indonesia. Indonesia terletak pada sabuk ekuator dan menempati rentang lintang yang tersapu oleh sabuk ITCZ sehingga memicu perbedaan aliran udara lintas ekuator (Hastenrath 1994). Dua gejala alam atmosferis tersebut menempatkan Indonesia sebagai kawasan yang memiliki dinamika cuaca dan iklim yang ditandai oleh putaran musim basah dan kering.

Dinamika ini dapat dipetakan pada salah satu unsurnya, yaitu hujan. Sebaran hujan di Indonesia memperlihatkan ada tiga kecenderungan pemintakatan (zonasi) utama, yaitu curah hujan monsun, ekuatorial, dan lokal (Gambar 2) (BMKG 2011). Berbeda tempat, berbeda pula curah hujannya. Di Indonesia, hujan di kawasan dekat garis khatulistiwa umumnya berciri hujan ekuatorial (Gambar 2). Bagian selatan ekuator umumnya bercirikan monsun. Hujan di kawasan sekitar Maluku bersifat monsun, sedangkan sebagian Maluku dan Papua Barat memiliki ciri hujan lokal dengan curah maksimum di pertengahan tahun. Ciri curah hujan ini diduga sebagai pengaruh dinamika perairan Laut Banda. Sementara itu, hujan di kawasan sekitar Laut Natuna bercirikan ekuatorial.

Sebaran curah hujan adalah salah satu ciri keragaman kondisi fisik kawasan pulau kecil dan pesisir landai. Curah hujan yang berbeda dari satu tempat ke tempat lain (Gambar 3) menghasilkan ekosistem yang berbeda. Perbedaan curah hujan menjadi salah satu unsur yang membedakan neraca hidrologi sehingga suatu daerah memiliki siklus hidrologi yang berbeda dengan daerah lainnya. Keadaan demikian berpengaruh pada aliran permukaan yang mengendalikan luah sungai berikut sedimen yang diangkutnya menuju



Sumber: Aldrian, Karmini, dan Budiman (2011)

Gambar 2. Pembagian Mintakat Hujan di Benua Maritim Indonesia

Buku ini tidak diperjualbelikan.

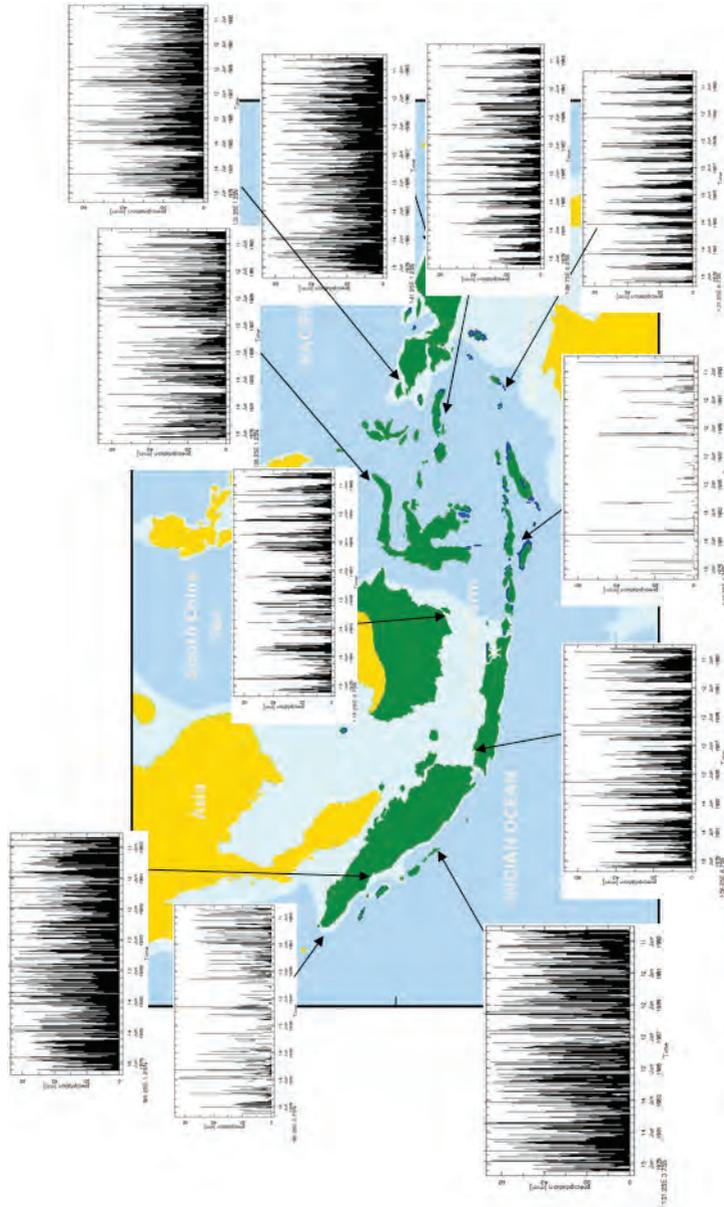


Diagram curah hujan beberapa tempat di Indonesia (1979 - 1994, CDIAC-IGOSS)

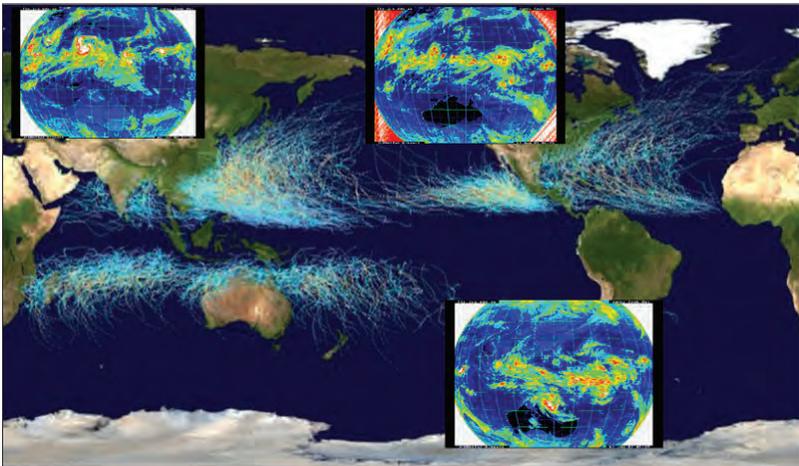
Sumber: Diolah dari data IRI/LDEO (2019)

Gambar 3. Peta Lokasi Perbedaan Curah Hujan di Beberapa Tempat di Indonesia
Buku ini tidak diperjualbelikan.

laut. Neraca dan siklus hidrologi juga sangat berpengaruh pada ketersediaan air tawar, terutama di pulau kecil dan pesisir landai.

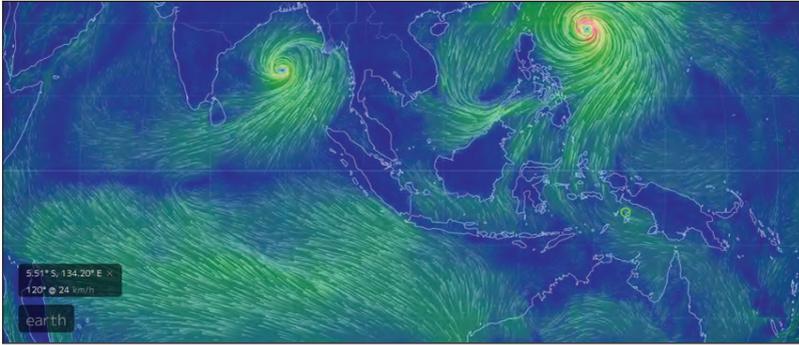
Dalam hal cuaca, kondisinya tergantung fisiografi pesisir dan pulau kecil serta tata letaknya di benua maritim. Unsur meteorologi berubah secara berkala dalam hitungan tengah tahunan berdasarkan dinamika monsun. Unsur cuaca disebut sebagai unsur yang paling dinamis perubahannya, bahkan dalam hitungan jam (Prawiwardoyo 1996). Selain menyangkut waktu, perubahan cuaca juga menyangkut suatu lokasi spesifik. Karena perubahan cuaca memiliki keteraturan dalam hal waktu dan ruang, gejalanya menghasilkan keseimbangan yang membentuk kawasan tersebut menjadi seperti sekarang ini.

Perubahan fisik yang diakibatkan oleh dinamika cuaca dan iklim biasanya baru terlihat dan dirasakan ketika muncul dampak kejadian ekstrem. Lintasan badai tropis memang tidak masuk ke ekuator, namun dampak dari semakin sering dan kuatnya badai tropis berpengaruh negatif terhadap pulau kecil dan pesisir landai di Indonesia (Gambar 4 dan 5).



Sumber: Nilfanion (2006)

Gambar 4. Peta Sebaran Lintasan Badai Tropis di Dunia dan Peta Cuaca Saat Terjadi Badai Tropis di Asia-Australia

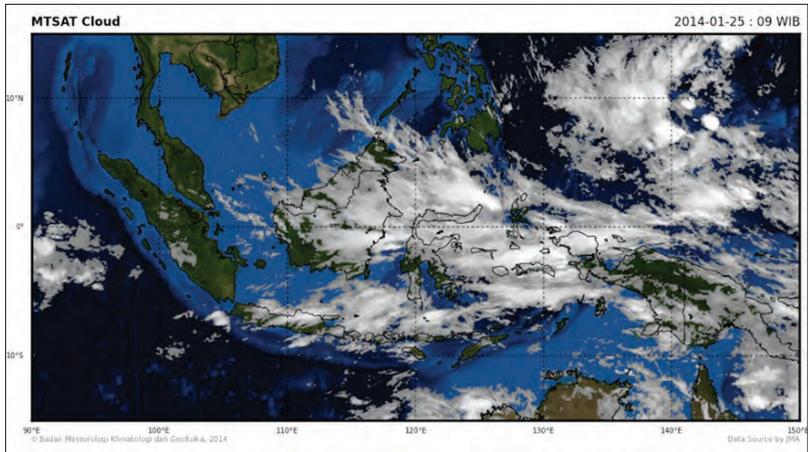


Sumber: Nullschool (2014)

Gambar 5. Peta arah dan kecepatan lintasan gerakan masa udara dengan dua pusat badai tropis

Arah, kecepatan, dan lama angin bertiup memicu gelombang laut setempat. Besaran, arah, dan lama berlangsungnya gelombang tersebut sangat kuat pengaruhnya terhadap kondisi perairan dan fisik pulau kecil pesisir landai. Gambaran kondisi cuaca dan iklim di Indonesia saat ini didapatkan dengan mudah dan lengkap melalui beberapa situs lembaga nasional, seperti BMKG dan LAPAN, atau situs internasional (WMO, IGOSS, dan sebagainya) (Gambar 6 dan 7). Kedua gambar tersebut memperlihatkan pertumbuhan dan pergerakan awan. Pada citra ini, awan yang ditampilkan adalah awan dengan suhu puncak lebih kecil dari 0°C . Semakin dingin suhu puncak awannya (ditunjukkan dengan warna yang semakin putih) maka semakin tinggi pula potensi terjadinya hujan. Informasi berkala menyajikan berbagai unsur kondisi cuaca-iklim dalam bentuk peta atau perubahannya di kawasan atau titik yang dikehendaki. Sensor pada satelit semakin peka dan menghasilkan pencitraan yang semakin rinci, akurat, dan beragam parameternya.

Berdasarkan data ini, dapat dibuat model kecenderungannya. Model kecenderungan ini diturunkan sebagai dasar pembuatan rancangan pengelolaan sumber daya alam-lingkungan, pengurangan risiko bencana, dan peningkatan ketahanan daya dukung dan atau daya saing kawasan.



Sumber: BMKG (2014)

Gambar 6. Animasi Citra 6 Jam Terakhir Cuaca Sebaran Awan di Indonesia



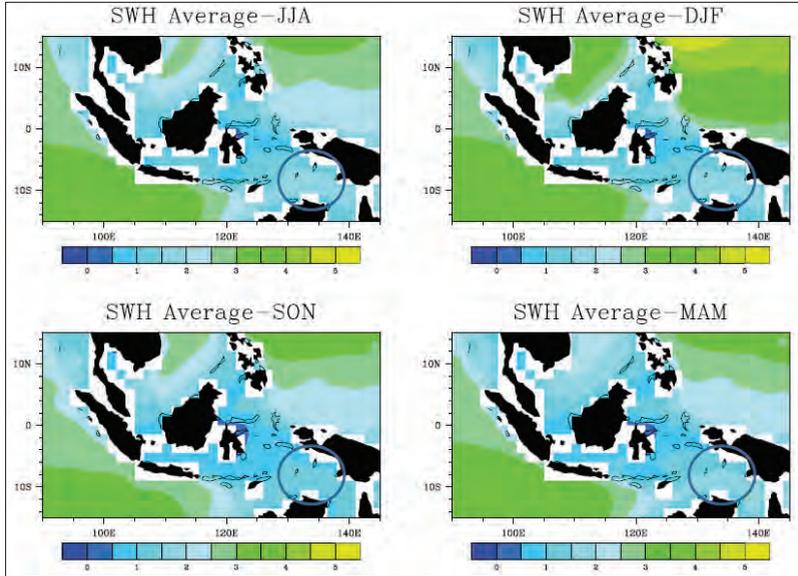
Sumber: The Weather Channel (2014)

Gambar 7. Peta Sebaran Kepadatan Relatif dan Gerakan Massa Awan Ekuatorial di Kawasan Indonesia dan Pasifik Barat

Buku ini tidak diperjualbelikan.

3. Kelautan

Wilayah Indonesia berada di antara dua benua (Asia dan Australia) serta di antara dua samudra luas (Samudra Hindia dan Pasifik). Konsekuensinya, lintasan massa air laut dari kedua samudra ketika terjadi perbedaan massa jenis (salinitas, dll) mendorong aliran massa air laut untuk menjaga keseimbangannya. Perairan busur kepulauan juga menjadi lintasan perputaran massa air samudra global (*Global Conveyor Belt*) yang ketika melalui perairan Indonesia disebut Arus Lintas Indonesia (Arlindo). Dinamika laut benua maritim juga dipengaruhi oleh kedalaman perairan dan tata letak pulau. Kedalaman perairan dan tata letak pulau berpengaruh terhadap gerakan massa air. Hal ini dipicu oleh perbedaan kondisi fisika-kimia yang dipengaruhi kondisi daratan. Sebaliknya, kondisi pesisir dan pulau kecil sangat peka terhadap pengaruh kondisi perairan. Gerakan kuat massa (gelombang, arus, dan lain-lain) di perairan berpengaruh pada keadaan fisik pesisir dan pulau kecil. Selain itu, kimiawi pesisir juga dapat merusak biota dan batuan atau tanah penyusunnya. Ketinggian gelombang di kawasan benua maritim berubah dari waktu ke waktu tergantung kondisi cuaca dan iklim (monsun, anomali cuaca, dan lain-lain) (Gambar 8). Demikian halnya dengan ketinggian gelombang maksimum yang mencapai puncaknya di perairan yang menghadap lautan lepas, seperti Samudra Hindia dan Samudra Pasifik (Gambar 9). Sebagaimana disampaikan pada bagian sebelumnya, dinamika perairan sangat peka terhadap dinamika cuaca dan iklim. Cuaca dan iklim yang kondisi dan kejadiannya beragam melahirkan kejadian ekstrem, perairan pun dengan cepat terpengaruh dan merespons dengan kondisi yang melahirkan kejadian ekstrem pula. Respons ini beragam dari satu tempat ke tempat lain. Keragaman ini tergantung dari keadaan geologi pantai dan pesisir pulau tersebut. Keadaan yang sangat beragam pada dinamika perairan menghasilkan perbedaan ekosistem antara satu tempat dan tempat lainnya. Ekosistem yang berkembang menjadi ciri dan potensi sumber daya alam sekaligus ketahanan dan kerentanan kawasan di sekelilingnya. Kejadian ekstrem cuaca di hulu atau di bagian tinggi, seperti gunung dan pegunungan, memicu keadaan ekstrem di bagian lain, misalnya gerakan massa



Sumber: Hantoro dkk. (2014)

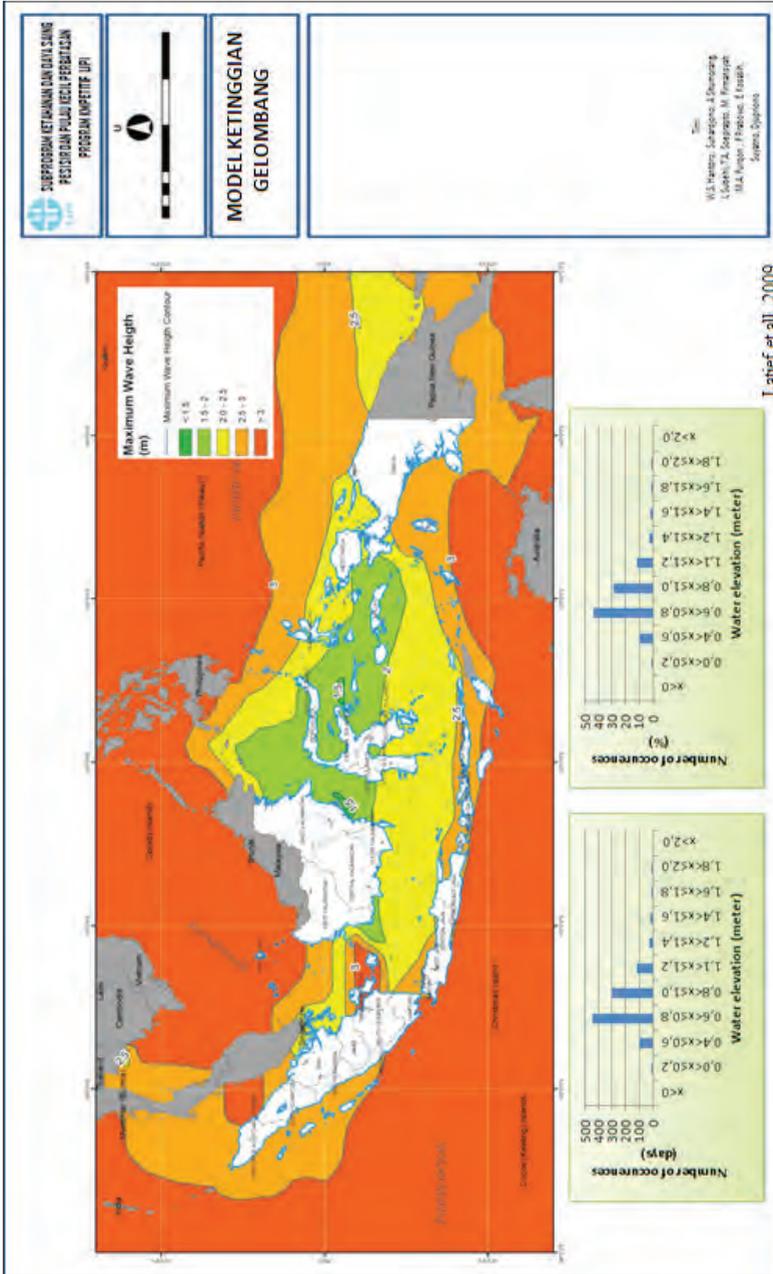
Gambar 8. Tinggi gelombang signifikan rata-rata dalam meter diambil dari data ERA interim reanalisis selama 21 tahun (data dari tahun 1989–2009)

udara yang membawa hujan yang jatuh berlebihan. Bila massa air yang tumpah melebihi kemampuan resapan atau daya alir permukaan bumi, terjadilah kejadian ekstrem yang menyebabkan kerusakan akibat sapuan air bah atau genangan banjir.

Penyimpangan gejala di atmosfer dapat memicu keadaan tanpa terbentuknya hujan dalam waktu lama. Ketika mencapai pesisir, massa air membentuk genangan rawa di mana sedimen halus diendapkan, sementara sedimen kasar yang terangkut arus sungai hingga laut diendapkan sebagai endapan pantai.

Muara sungai besar acap kali membentuk alur baru dari limpasan sungai utama, menyebarkan sedimen ke segala arah, mengendapkan membentuk dangkalan dan daratan delta. Kawasan yang terbentuk ini masih belum stabil geologinya, ditandai dengan pemampatan endapan yang terlihat sebagai penurunan permukaan tanah.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Latief (2009)

Gambar 9. Model Ketinggian Gelombang Maksimum di Perairan Benua Maritim Indonesia

Buku ini tidak diperjualbelikan.

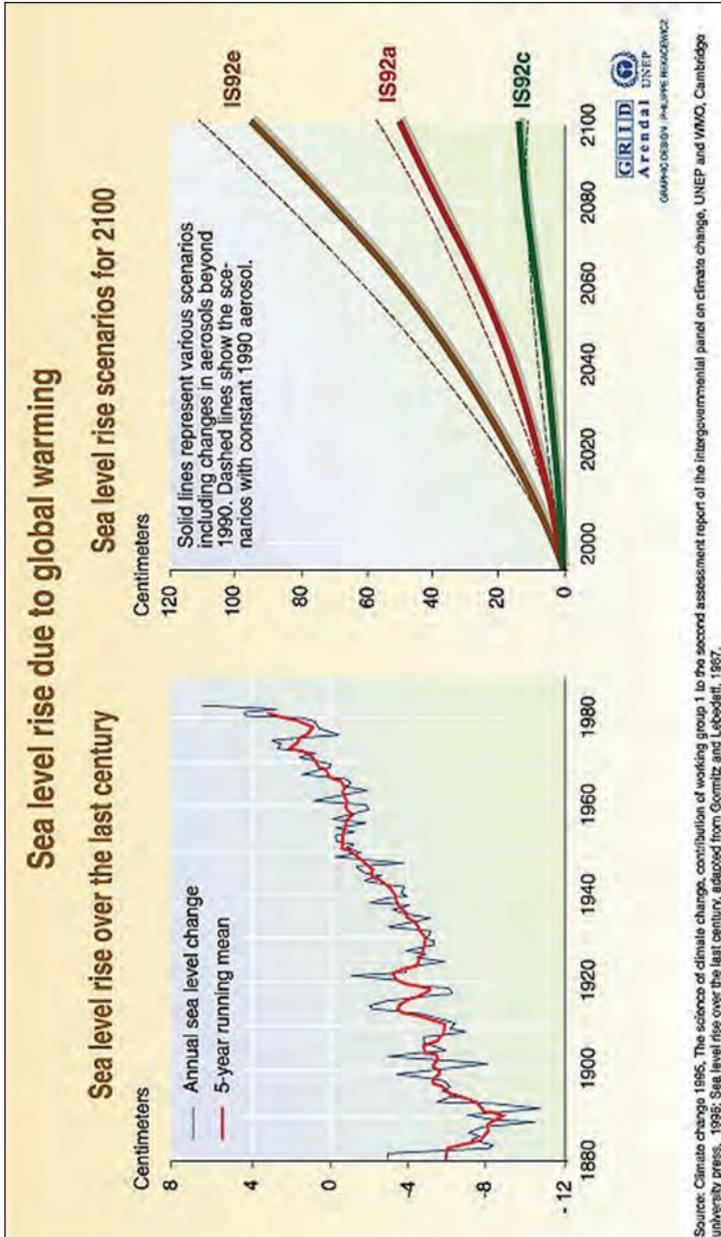
Ancaman bahaya yang dipicu berbagai kejadian alam (dalam hal ini muka laut tinggi) dapat berlangsung cepat, misalnya gelombang tsunami atau gelombang badai. Ancaman dari kejadian gelombang yang datang dengan cepat dipicu oleh kejadian geologi dan dinamika cuaca-iklim. Gelombang tsunami dipicu oleh deformasi (perubahan) kerak bumi berupa patahan akibat pelepasan energi dari proses geologi tertunjамnya kerak samudra di bawah lempeng benua. Penjelasan mengenai hal ini akan disampaikan pada bagian berikutnya.

Muka laut tinggi yang dipicu oleh penyimpangan keadaan cuaca dan iklim, dapat berupa gelombang kuat dan penggenangan daratan oleh limpasan massa air laut yang terdorong masuk ke arah daratan. Beberapa ancaman bahaya tersebut dapat digambarkan kejadiannya dengan persamaan matematis. Berbagai unsur dapat dinyatakan besarnya, mulai dari unsur dasar hingga unsur yang berkaitan dengan besaran kejadian. Hal ini terkait dengan besaran dampak kerugiannya (Hantoro 2012).

Kenaikan muka laut dapat berlangsung cepat, berupa gerakan massa yang datang menerjang daratan. Namun, juga dapat berlangsung perlahan, berupa penggenangan dengan kecepatan kenaikan yang tidak teramati oleh mata. Kenaikan ini disebabkan oleh pemanasan global akibat penambahan volume air laut dari pencairan tudung es atau pemuaiian (Bailey 2010). Kecenderungan kenaikan muka laut global eustatik ini berkisar antara 3–10 mm/tahun (IPCC 2007) (Gambar 10). Dalam tulisan ini, kecenderungan kenaikan muka laut eustatik global mengacu pada skenario dengan kecepatan 5mm/tahun.

Pemanasan global memicu peningkatan suhu air laut, diikuti pemuaiian yang meningkatkan volume air laut dan kenaikan muka laut eustatik. Kecenderungan kenaikan muka laut eustatik ini berbeda antara satu perairan dan perairan lain di Indonesia. Keragaman ini bergantung pada kondisi meteorologi dan kelautannya (Gambar 11). Respons pesisir di Indonesia terhadap gejala ini pun beragam, tergantung kondisi alamnya (cuaca-laut dan geologi) (Gambar 12). Kenaikan muka laut global memberi dampak serius terhadap kawasan landai pesisir dunia yang saat ini telah padat dengan kawasan pusat

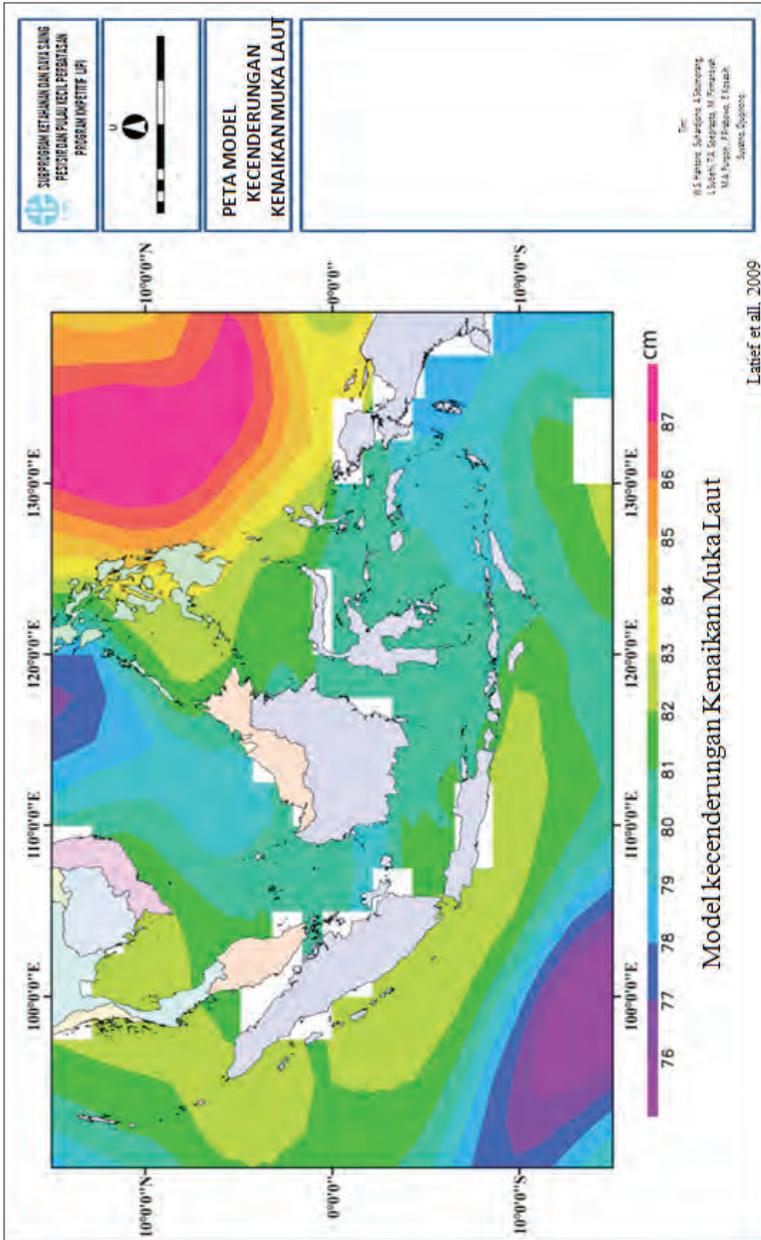
Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: IPCC (2007)

Gambar 10. Kurva Kecenderungan Kenaikan Muka Laut Akibat Pemanasan Global

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Latief (2014)

Gambar 11. Model Kecenderungan Kenaikan Muka Laut Eustatik Dampak Pemanasan Global
buku ini tidak diperjualbelikan.

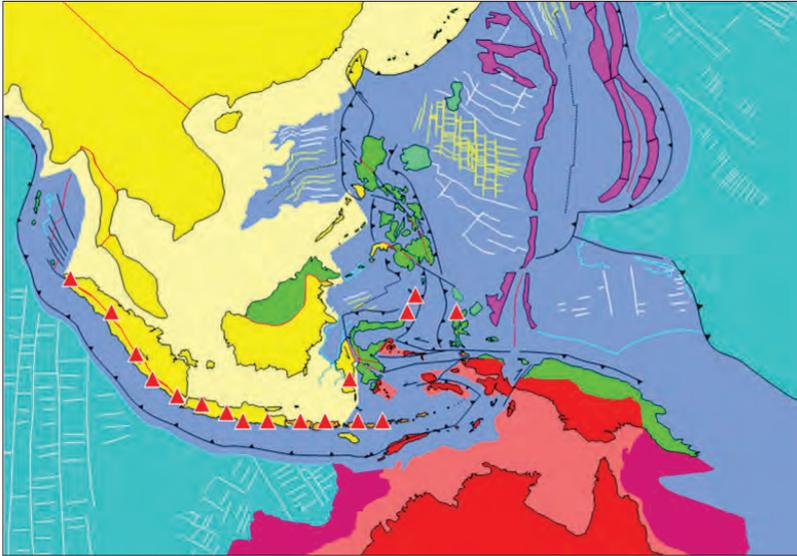
kegiatan manusia (Fahrenthold 2007), antara lain seperti yang dihadapi Kota Maputo di Mozambique (Mc Geown 2009).

4. Geologi

Evolusi geologi yang berlangsung sejak ratusan juta lampau melibatkan gerakan lempeng benua, khususnya Benua Australia, yang bergerak relatif ke arah utara terhadap Lempeng Asia dan kerak samudra lain. Evolusi geologi menghasilkan kondisi geologi busur kepulauan seperti sekarang. Mandala geologi secara umum terdiri atas busur luar non aktif yang terbentuk dan menjadi bagian dari proses penunjaman akibat pertemuan lempeng dan kerak samudra (Gambar 13). Mandala geologi pertemuan kerak dan lempeng menghasilkan beragam gerakan relatif mendatar atau tegak, seperti pengangkatan dan penurunan. Pemintakatan gerakan ini menghasilkan gambaran mengenai kawasan mana dan dengan arah maupun kecepatan gerakannya. Misalnya, 6–7 cm/tahun untuk gerak penunjaman selatan Jawa atau pengangkatan 0,5 cm/tahun di Sumba, dan 2 mm/tahun untuk Pegunungan Jayawijaya.

Pada kasus pengangkatan daratan di busur luar non-vulkanik, seperti di Sumba, Sabu, dan Timor, kecepatan 0,2 mm–2 mm/tahun sudah cukup memberi imbangan pada kenaikan muka laut eustatik (dampak pemanasan global). Sementara itu, penurunan di cekungan bagian dalam (*inner basin*), seperti di Sumatra bagian timur, mempercepat antara dua hingga empat kali kecepatan kenaikan muka laut eustatik (skenario pesimistis).

Kejadian terkait dengan kebumihan yang memicu bencana dapat dibedakan dari asal pemicu gejala, yaitu endogen dan eksogen. Kejadian yang pemicunya berkaitan dengan keadaan dalam bumi yang menghasilkan kegiatan vulkanik tergolong kejadian yang dipicu gejala endogen. Letusan gunung api yang terjadi di laut memicu pemindahan massa air akibat runtuhnya kaldera atau tekanan termal ledakan (Hantoro 2006). Misalnya, letusan Krakatau dan Tambora yang memicu tsunami.

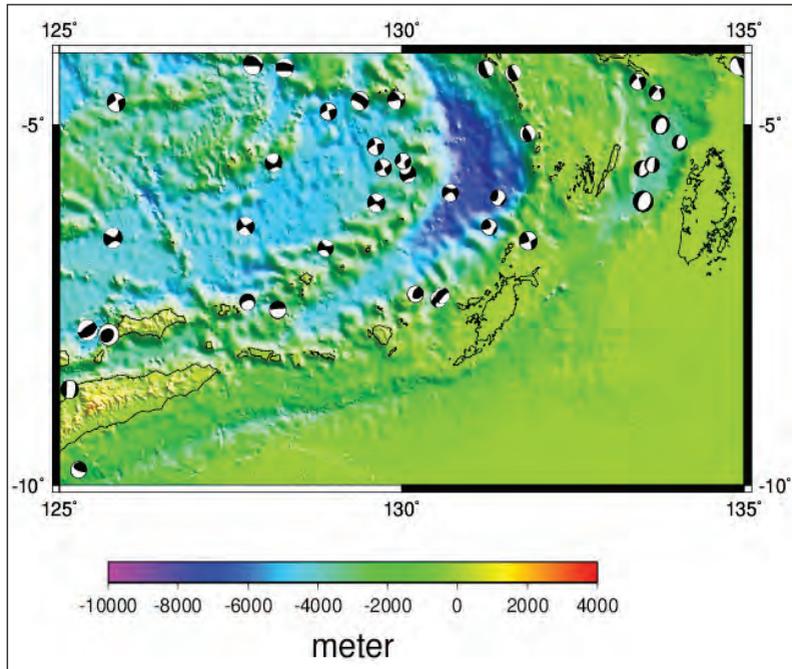


Sumber: Hall (2009)

Gambar 13. Peta geotektonik Indonesia dengan gambaran jalur gunung api aktif serta penunjaman

Gelombang tsunami juga dapat dipicu oleh gejala geologi lain. Misalnya, gerak relatif kerak dan lempeng diikuti penumpukan energi di suatu tempat yang pelepasannya memicu kejadian perubahan kulit bumi. Perubahan kulit bumi ini diikuti perpindahan massa air dan menjadi awal dari gelombang tsunami. Gelombang tsunami yang dipicu gempa bumi hingga saat ini belum dapat diprediksi kejadiannya. Tidak semua pelepasan energi konvergensi menghasilkan dislokasi kulit kerak bumi atau gerakan massa batuan yang memicu perpindahan sejumlah besar massa air yang membangkitkan gelombang tsunami. Catatan sejarah menyajikan peta potensi gempa bumi besar, namun penyusunan informasi ini belum lama dilakukan, hanya sejak jejaring pencatat gempa bumi mulai dioperasikan. Beberapa tempat dikenali sebagai kawasan yang mengalami dislokasi yang berpotensi memicu tsunami bila besaran gempanya lebih besar dari 7 SR (Skala Richter) (Gambar 14) (Handayani 2012; Hananto 2012).

Buku ini tidak diperjualbelikan.



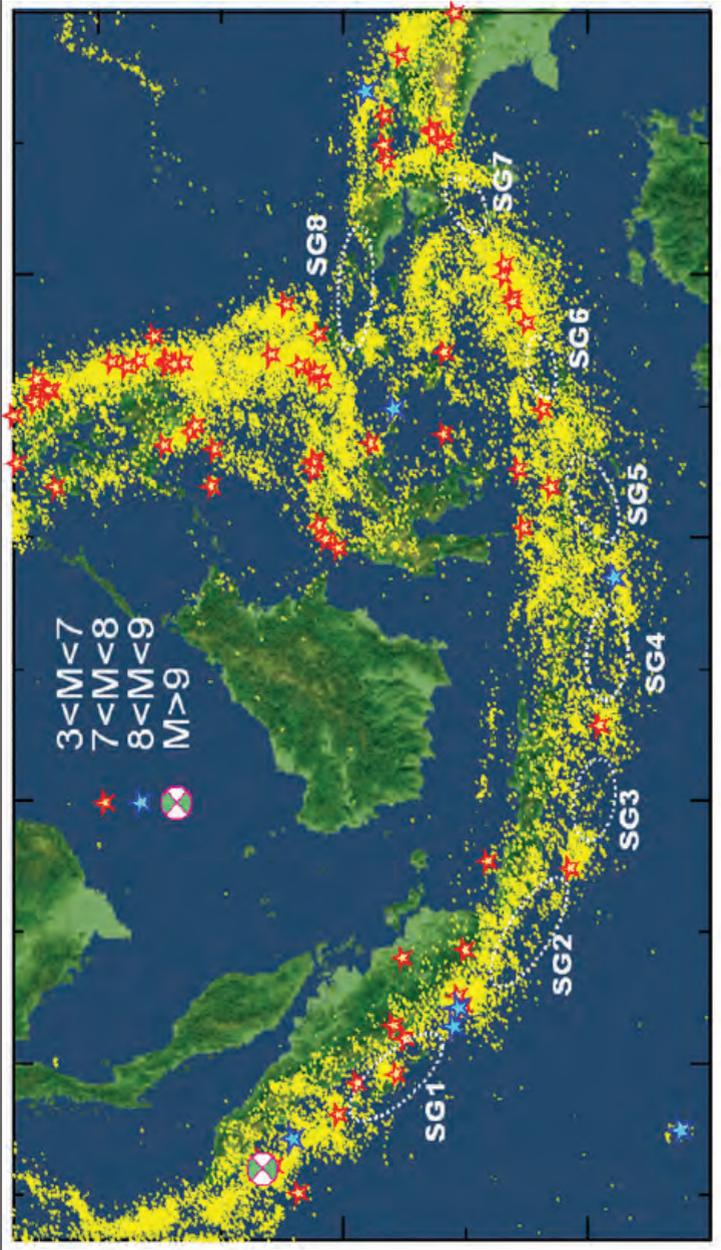
Sumber: Handayani (2014)

Gambar 14. Peta sebaran *focal point* gempa dari pelepasan energi diikuti oleh *deformasi* yang dapat memicu gelombang tsunami

Usaha peramalan kejadian tsunami pada dasarnya memperkirakan kapan terjadi dan berapa besaran gempa yang berpotensi memicu tsunami. Peta distribusi kejadian gempa memperlihatkan beberapa kawasan ditandai sebagai *seismic gap area* (Gambar 15), yaitu daerah yang distribusi titik pusat gempanya relatif kurang dibandingkan kawasan lain (Latief dalam Hantoro dkk. 2014). Hal ini dapat ditafsirkan sebagai belum terlepasnya akumulasi energi tumbukan. Bila suatu saat energi tumbukan ini terlepas, dapat menghasilkan gempa dengan deformasi kuat yang berpotensi memicu tsunami.

Berdasarkan sejarah kegempaan, dapat dibuat model pembangkitan dan penjalaran tsunami. Model ini sangat membantu dalam memperkirakan bagian mana dari pesisir dan pulau kecil mana yang

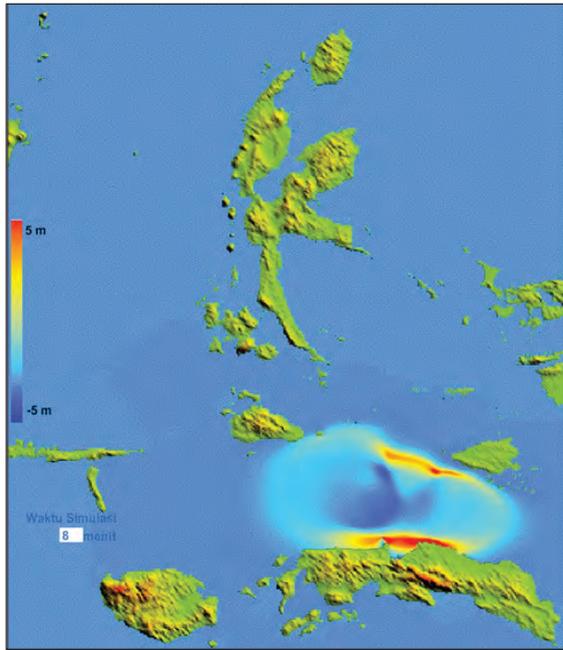
Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Latief (2014)

Gambar 15. Peta Sebaran Pusat Gempa Bumi di Indonesia dan Lokasi Seismic Gap

Buku ini tidak diperjualbelikan.



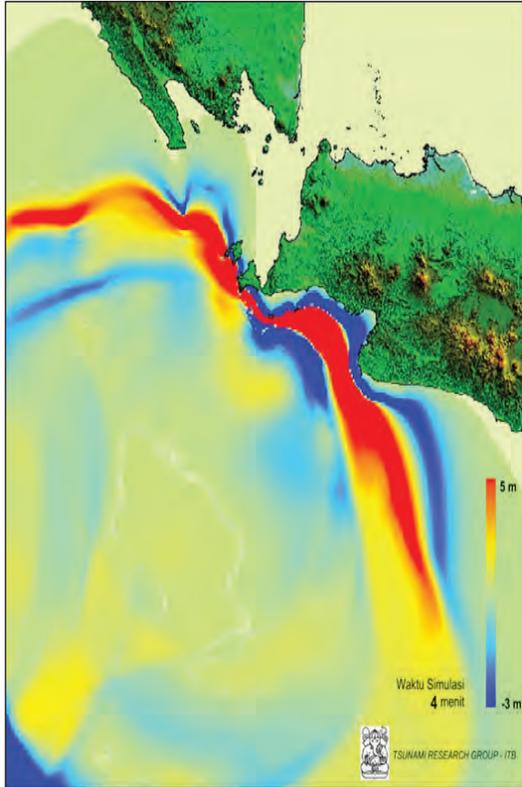
Sumber: Hantoro dkk. (2014)

Gambar 16. Peta Model Propagasi Gelombang Tsunami di Perairan Maluku

terpapar ancaman bahaya gelombang tsunami. Perkiraan berapa ketinggian serta jangkauan limpasan gelombang ke arah darat pun dapat diketahui (Gambar 16 dan 17).

Proses geologi di benua maritim Indonesia selama ini menghasilkan fisiografi dan geologi pesisir dan pulau kecil yang beragam. Jenis pulau kecil yang terbentuk oleh pengangkatan terumbu karang, sedimentasi delta, batuan vulkanik, dan malihan atau batuan sedimen alluvial sangat landai dan dekat dengan permukaan laut. Proses geologi selanjutnya, erosi, dan sedimentasi menghasilkan daratan landai semakin luas. Morfologi dan jenis batuan pulau kecil dan pesisir seperti itu rentan terhadap ancaman bahaya kejadian ekstrem berupa tinggi muka laut yang naik dan menggenangi pesisir serta genangan air dari hujan berlebih di hulu. Tinggi muka laut relatif berkaitan dengan relatif turunnya daratan terhadap muka laut akibat proses

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Latief (2014)

Gambar 17. Peta Model Propagasi Gelombang Tsunami di Perairan Jawa Barat Bagian Selatan

geologi penurunan tektonik atau proses yang lazim di bagian pesisir yang terbentuk oleh cekungan geologi.

Sebagian besar kawasan pesisir merupakan cekungan aktif yang menerima sedimentasi. Sedimentasi ini membentuk endapan tebal yang masih mengalami pemampatan dan penurunan. Abstraksi air atau hidrokarbon pada sedimen di cekungan ini menambah percepatan pemampatan yang diikuti penurunan. Dengan kata lain, abstraksi air atau hidrokarbon meningkatkan kerentanan kawasan terhadap bahaya muka laut tinggi. Di bagian lain, proses penunjaman atau tumbukan antarlempeng diikuti gejala pengangkatan yang kecepatannya di

Buku ini tidak diperjualbelikan.

beberapa tempat dapat mencapai 2–4 mm/tahun. Pada kecepatan ini, kawasan pesisir berada pada keseimbangan antara kenaikan laut berkecepatan sedang, yakni 2–5 mm/tahun (IPCC 2007).

B. LATAR BELAKANG NON FISIK

Kondisi non fisik kawasan pesisir dan pulau kecil merupakan unsur yang harus diketahui dan dipahami ketika memperhitungkan masalah kerentanan dan ketahanan. Kondisi non fisik adalah berbagai hal yang berkaitan dengan aspek kemanusiaan yang ada, baik dampak dari kegiatan langsung maupun tidak langsung yang dapat memberi pengaruh pada kondisi fisik lingkungan (Hantoro dkk. 2014). Kondisi non fisik berkaitan langsung dengan tingkat kerentanan, kemampuan adaptasi, hingga pemulihan dan peningkatan ketahanan. Bila kondisi ini lemah maka kerentanan akan tinggi nilainya. Sebaliknya, bila kondisi sosial kemasyarakatan baik maka akan meningkatkan ketahanan untuk menghadapi ancaman serta kemampuan rehabilitasi dan adaptasi terhadap dampak bencana.

1. Sosial budaya kependudukan

Unsur manusia dalam suatu ekosistem tidak dapat dilepaskan dari usaha mengetahui dinamika perubahan dalam ekosistem tersebut. Oleh karena itu, kondisi masyarakat kawasan penelitian perlu disampaikan. Bagian ini hanya menyampaikan hal umum yang berkaitan dengan kondisi masyarakat di pesisir dan pulau kecil. Pada umumnya, masyarakat pesisir dan pulau kecil mengandalkan lingkungan dan ketersediaan biota laut sebagai mata pencaharian. Adapula yang menyediakan jasa kehidupan kawasan serta tata niaga hasil laut.

Pesisir juga dihuni dan berkembang sebagai tumpuan kegiatan antardaerah di dalam atau antarpulau (Hantoro 2006; Hantoro dkk. 2012). Pesisir bukan sekadar basis masyarakat yang perekonomiannya bergantung pada usaha penangkapan biota laut berikut jasanya, namun juga berkembang menjadi jalur transportasi antardaerah dan pusat distribusi barang ke pedalaman. Perkembangan berikutnya adalah tumbuhnya pusat wilayah di beberapa titik di suatu pulau

sehingga masyarakatnya lebih dominan sebagai masyarakat urban. Bagi pulau kecil yang posisinya tidak penting, permukiman yang ada tetap bertahan dan masyarakatnya bekerja sebagai nelayan. Kawasan pesisir juga mendukung budi daya tanaman. Itulah sebabnya masyarakat di sebagian pesisir juga berprofesi sebagai petani. Dengan demikian, kegiatan mata pencaharian masyarakat pesisir tergantung pada fungsi kawasan tersebut. Jika akses transportasi lebih murah, kawasan itu akan menjadi kawasan yang masyarakatnya bekerja di sektor industri atau menjadi bagian dari suatu industri. Hasil industrinya dengan mudah didistribusikan melalui pelabuhan ke pelabuhan yang lebih kecil atau sebaliknya.

Seiring perkembangan teknologi dan peningkatan kesejahteraan, kawasan pulau kecil dan pesisir landai menjadi tujuan wisata favorit. Hal ini dapat terjadi karena kemudahan akses informasi mengenai kawasan pesisir yang dikenal memiliki potensi, kondisi alam, dan kehidupan masyarakat yang turut menunjang pariwisata. Dengan demikian, sektor pariwisata dapat menjadi alternatif sumber pendapatan masyarakat. Namun, tingginya tingkat kunjungan wisatawan menuntut peningkatan sarana wisata. Untuk itu, diperlukan tambahan lahan. Kebutuhan akan lahan sering kali mengorbankan ekosistem yang sesungguhnya melindungi dari kejadian ekstrem cuaca maupun laut. Misalnya, ekosistem terumbu karang yang menjadi tujuan wisata rentan mengalami kerusakan ketika terganggu dan bahkan rusak oleh pengunjung. Dalam banyak hal, daya dukung sumber daya alam dan lingkungan sering kali terlampaui sehingga meninggalkan kerusakan yang menjadi penyebab meningkatnya kerentanan kawasan. Tingginya kunjungan wisata dalam suatu waktu tertentu seharusnya diikuti pula peningkatan sarana dan sumber daya yang diperlukan. Kawasan yang menjadi tujuan wisata memerlukan bukan hanya fasilitas hunian, namun juga fasilitas penanggulangan ancaman bahaya dan pengurangan risiko bencana, seperti peringatan dini dan rambu-rambu yang mencegah terganggunya ekosistem. Akses evakuasi dan bangunan *shelter* mutlak ada di kawasan wisata, misalnya di kawasan sepanjang pesisir pulau-pulau barat Sumatra. Diperlukan tambahan pemasangan rambu-rambu evakuasi, peta jalur evakuasi, dan instrumen peringatan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dini bahaya tsunami di perairan lepas yang dapat lebih menjamin akurasi informasi awal tsunami.

2. Kesepakatan adat

Masyarakat kawasan pesisir dan pulau kecil mata pencahariannya bergantung pada laut, misalnya nelayan, pedagang, atau penyedia jasa, seperti angkutan. Di bagian tertentu kawasan Indonesia, masyarakat pesisir memiliki kesepakatan adat yang berkaitan dengan masalah penangkapan ikan, pemungutan hasil hutan, kebun di pesisir, dan pemeliharaan lingkungan. Kesepakatan ini mengatur permasalahan-permasalahan tersebut dengan asas pemerataan dan keadilan agar tidak terjadi konflik. Kesepakatan adat dapat dikembangkan sebagai budaya positif untuk pengurangan ancaman bahaya dan penanggulangan kebencanaan. Budaya positif ini dapat digunakan sebagai pendekatan dalam pengurangan kerentanan dan ketahanan, seperti peningkatan kepedulian, pengurangan risiko, pembangunan dan pemeliharaan fasilitas, kondisi lingkungan, dan rehabilitasi dampak negatif (Setiadi 2011). Adaptasi yang memerlukan konsistensi upaya bersama dapat terlaksana dan terjaga melalui pendekatan budaya kesepakatan ini (Hantoro 2012; 2015). Salah satu contohnya adalah pemulihan dan pemeliharaan lingkungan pelindung, seperti hutan pantai, mangrove, dan terumbu karang yang besar perannya dalam mengurangi ancaman bahaya dan risiko bencana, khususnya muka laut ekstrem gelombang tinggi (Hantoro 2012; Hantoro dan Djuwansah 2014; Hantoro dkk. 2014; Hantoro dkk. 2015).

C. POTENSI DAN DAYA DUKUNG

Potensi yang dimaksud dapat berupa pemicu kejadian yang berdampak negatif atau menimbulkan ancaman bahaya. Namun, potensi dapat pula bermakna positif jika memberi dampak menguntungkan, yakni sebagai pelindung dari ancaman bahaya, mengurangi kerusakan, bahkan meniadakan ancaman sama sekali. Daya dukung yang dimaksud adalah yang dapat mengurangi ancaman bahaya atau memberi keuntungan bagi masyarakat saat tidak ada kejadian. Daya dukung juga dapat berupa unsur yang menguatkan pada masa tanggap

darurat atau pemulihan. (Hantoro 2012; Hantoro dan Djuwansah 2014; Hantoro dkk. 2014; Hantoro dkk. 2015).

1. Sumber Daya Alam dan Lingkungan

Perkembangan permukiman di suatu kawasan, khususnya di pesisir landai dan pulau kecil, tergantung pada daya dukung yang dimiliki kawasan ini. Maksudnya, untuk kegiatan apakah kawasan tersebut dibangun. Pesisir landai pulau besar memiliki potensi sumber daya alam dan lingkungan yang lebih baik sehingga dipilih sebagai tempat kegiatan manusia di kawasan tersebut. Beberapa jenis sumber daya, misalnya sumber bahan pangan, tersedia di sekitar kawasan ini. Hal itulah yang menjadi alasan bermukimnya manusia. Bahan pangan protein dapat diperoleh dari perairan laut maupun muara sungai, sementara karbohidrat dapat diperoleh dari hutan di sekitarnya. Landainya kawasan ini juga mempermudah usaha menanam tanaman pangan sebagai sumber karbohidrat. Daya dukung lahan pada awalnya memberi keleluasaan untuk budi daya pertanian dan membangun permukiman. Bahan dari alam, seperti kayu, tersedia dalam jumlah yang cukup ketika belum banyak manusia yang bermukim. (Hantoro 2012; Hantoro dan Djuwansah 2014; Hantoro dkk. 2014).

2. Sumber ancaman bahaya

Kawasan pesisir dan pulau kecil landai terpapar bahaya yang datang dari pedalaman maupun dari laut terbuka. Ancaman tersebut berasal dari kejadian ekstrem yang dipicu gejala alamiah maupun antroposen yang besaran dan perulangannya adakalanya tidak dapat diduga. Ancaman yang dipicu gejala alamiah dapat berasal dari kejadian ekstrem atmosferis, seperti cuaca dan atau iklim ekstrem, kejadian ekstrem perairan, dan kejadian ekstrem geologi. Kejadian ekstrem cuaca memberi ancaman banjir bandang dan genangan pada pesisir serta hilir dan muara yang landai pulau yang memiliki daerah luas tangkapan hujan di hulu. Badai tropis tidak melintas kawasan busur kepulauan, namun seretan masa udara yang bergerak ke arah inti badai menyebabkan angin kencang yang diikuti pembangkitan gelombang tinggi di laut. Pesisir landai berikut ekosistem dan manusianya

Buku ini tidak diperjualbelikan.

terpapar bahaya ini. Pada pulau kecil, bahaya badai ini mengancam dua bagian berbeda, tergantung di bagian mana inti badai berada relatif terhadap pulau.

Kejadian ekstrem perairan berupa gelombang tinggi selain disebabkan oleh kejadian ekstrem cuaca dapat juga sebagai gelombang tinggi tsunami yang dipicu gempa tektonik atau letusan gunung api bawah laut. Kejadian ekstrem geologi dibedakan menjadi dua, yaitu endogen, seperti erupsi gunung api dan gempa; serta eksogen, seperti longsor. Kawasan yang bersisian dengan jalur tektonik aktif Busur Sunda dan Banda merupakan kawasan yang memiliki intensitas dan besaran kegempaan tinggi (Hantoro 2012; Hantoro dkk. 2014; Hantoro dkk. 2015).

3. Komunikasi dan transportasi

Unsur yang berpengaruh dalam penanganan masalah di kawasan pulau kecil dan pesisir landai adalah komunikasi dan transportasi. Masyarakat di kawasan ini dihadapkan pada keadaan lingkungan yang sangat dinamis, keterbatasan sumber daya alam, dan terpapar ancaman yang belum dapat dikenali dengan baik. Dalam keadaan demikian, masyarakat memerlukan jembatan yang menghubungkannya dengan kawasan lain, atau dengan kenyataan yang sebenarnya sedang dihadapi. Hasil kajian dinamika alam kawasan ini perlu disampaikan ke masyarakat dalam kemasan yang dapat menjamin sampainya pesan (Yoganingrum dkk. 2013).

Dalam keseluruhan siklus dari kejadian bencana hingga tahap penyiapan menghadapinya, terdapat muatan informasi yang sarat dengan rincian yang harus disampaikan dan dipahami masyarakat. Oleh karena itu, perlu pengemasan dalam penyampaian informasi kepada masyarakat sehingga mudah diterima dan dipahami. Pemahaman yang baik akan menjamin tumbuhnya kepedulian dan partisipasi masyarakat. Keanekaragaman masyarakat menuntut kemasan informasi yang beragam (Yoganingrum dkk. 2012; 2013). Berbagai produk yang membantu ketepatan penyampaian informasi dan pengetahuan telah dihasilkan. Produk-produk tersebut didasarkan pada

hasil penelitian dengan latar belakang sasaran masyarakat, muatan, dan jenis teknologi yang berbeda.

Dalam banyak hal, kawasan yang rentan bahaya muka laut tinggi, jaringan transportasinya tidak dapat diandalkan jika ada keadaan mendesak, misalnya evakuasi atau pengiriman bahan bantuan secara masif. Kondisi ini bahkan lebih buruk di kawasan yang jauh dari pusat pemerintahan setempat, kawasan perbatasan, dan kawasan terpencil, seperti di Kepulauan Maluku Tenggara, Maluku Barat Daya, Maluku Utara, Papua, Sulawesi Utara, dan Nusa Tenggara. Rendahnya kapasitas transportasi menjadi kendala upaya tanggap darurat dan adaptasi padahal tahap ini memerlukan jaminan kelancaran transportasi.

D. PEMERINTAHAN DAN PENGELOLAAN WILAYAH

Kawasan pesisir dan pulau kecil landai merupakan bagian dari suatu daerah administrasi dengan pusat pemerintahan di pulau utama atau di salah satu gugusan pulau tersebut. Aspek pemerintahan bisa menjadi hal negatif atau positif bila terkait dengan potensi ancaman bahaya, daya dukung sumber dayanya, dan kondisi sosial budaya masyarakat. Namun, unsur pemerintah menjadi salah satu jaminan dalam pembangunan sistem penanggulangan bencana. Hal ini karena institusi yang menangani masalah kerentanan ini menghasilkan sistem terpusat dengan distribusi kewenangan penanganan masalah merata di hampir semua daerah yang memiliki kerentanan bahaya dari berbagai gejala pemicu (Lassa 2011).

Rentang kendali pengelolaan di kawasan gugus kepulauan masih terkendala kondisi alam dan keterbatasan sarana transportasi serta komunikasi. Sebagai contoh, Kabupaten Kepulauan Anambas belum tercukupi dalam hal sarana transportasi cepat dan berdaya angkut besar. Kabupaten ini pun belum memiliki sarana komunikasi yang dapat menyebarkan banyak informasi dengan cepat dan sering dengan kemasan mutakhir (Hantoro dan Djuwansah 2014; Hantoro dkk. 2014).

1. Tata kelola dan ruang

Pemekaran wilayah melahirkan kawasan satuan pemerintahan baru yang terdiri atas gabungan beberapa pulau. Misalnya, gugusan pulau di Provinsi Kepulauan Riau membentuk satuan daerah tingkat dua yang baru. Kawasan Provinsi Kepulauan Riau mencakup perairan luas yang dasar lautnya relatif dangkal di bagian tepi kontinen Paparan Sunda. Satuan pemerintah daerah tingkat kabupaten atau kota dibagi berdasarkan pengelompokan gugusan pulau terdekat dan berdasarkan aspek sejarahnya. Sebagian wilayah Provinsi Kepulauan Riau merupakan daerah perbatasan negara yang terpencil dan sulit dijangkau. Transportasi hanya mengandalkan angkutan laut yang terbatas kecepatan, daya angkut, dan jadwal akibat gelombang kuat di laut pada musim tertentu. Angkutan udara masih mengandalkan penerbangan yang memanfaatkan pangkalan udara militer yang kapasitasnya terbatas. Cuaca dan asap kebakaran hutan sering menjadi hambatan terhentinya penerbangan. Sebagai salah satu kawasan depan yang berbatasan dengan beberapa negara, Natuna menyandang nilai strategis dari sisi keamanan, penjagaan kedaulatan, dan pengelolaan sumber daya alam. Kawasan ini memerlukan berbagai sarana penunjang kawasan strategis, misalnya sarana pertahanan, sarana transportasi, sarana komunikasi, sarana pengelolaan sumber daya (migas dan kelautan), dan sarana kesejahteraan masyarakat. Letaknya yang dekat dengan pasar membuat kawasan ini berpotensi menjadi pusat ekonomi. Kualitas lingkungan yang relatif utuh dan terjaga menjadikan kawasan ini berpotensi menjadi kawasan wisata alam. Namun, ada ancaman bahaya alam yang dipicu oleh kondisi ekstrem cuaca berupa angin kencang dan kekeringan.

Provinsi Maluku juga mengalami pemekaran dari satu provinsi menjadi dua, yaitu Provinsi Maluku dan Provinsi Maluku Utara. Tujuannya adalah meningkatkan kapasitas rentang kendali dan pengelolaan wilayah yang sangat luas dan sebagian besar terdiri atas lautan. Pembagian wilayah pemerintahan Provinsi Maluku didasarkan pada pengelompokan beberapa pulau. Kawasan-kawasan tersebut memiliki jangkauan rentang kendali administrasi yang tidak selalu sesuai dengan sebaran masalah lingkungan yang dikelolanya. Terobosan

yang muncul adalah membagi kendali pengelolaan berdasarkan gugus pulau yang memiliki ciri kondisi alam yang hampir sama dalam suatu lingkungan agar memudahkan pengelolaannya. Konsep ini menjanjikan karena didasarkan pada beberapa hal yang menjadi pertimbangan, yaitu kondisi sosial masyarakat, budaya, dan kegiatan ekonomi. Selain itu, kondisi fisik wilayah menjadi salah satu pertimbangan, terutama terkait dengan pengendalian dan pengelolaan transportasi dan komunikasi. Pertimbangan lain adalah letak gugus kepulauan di Maluku yang nyaris mengelilingi Laut Banda merupakan satu-satunya kawasan laut dalam di bawah kedaulatan NKRI (Hantoro dkk. 2014). Laut dalam ini, selain mengandung potensi sumber daya, juga mengandung potensi yang memicu kondisi ekstrem cuaca maupun laut. Oleh karena itu, pengelolaan kawasan ini memerlukan pendekatan khusus yang harus memperhitungkan segala potensi Laut Banda (Hantoro dkk. 2014).

2. RTRW, RPJM/P, PERPRES dan PERMEN

Produk hukum sebagai acuan dalam upaya peningkatan ketahanan kawasan pesisir landai dan pulau kecil adalah dokumen Rencana Umum Tata Ruang (RUTR) dan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) (Sahala dan Bisri 2011). Pada saat ini, beberapa daerah tingkat provinsi maupun kota dan kabupaten memiliki kelengkapan produk hukum yang lebih menjamin akselerasi upaya, mulai dari tanggap bencana hingga peningkatan ketahanan. Semua rancangan upaya penanggulangan bencana hingga peningkatan ketahanan dapat disertakan sebagai bagian dari kebijakan (Birkmann 2007) dalam bentuk rencana penataan ruang. Dengan demikian, semua upaya tersebut telah terjamin alokasi penataan ruangnya.

Produk hukum lain yang diperlukan untuk menjamin terlaksananya upaya menghadapi ancaman bahaya adalah Rencana Pembangunan Jangka Menengah dan Panjang. Semua rancangan kegiatan harus dialokasikan pembiayaannya dalam dokumen yang juga harus disiapkan dengan cermat. Penyiapan rancangan upaya penanggulangan bahaya dalam dokumen ini harus didasarkan pada kajian menyeluruh yang mengacu pada pemahaman dinamika kebencanaan.

Produk hukum lain yang dapat diacu sebagai konsep tata ruang kelautan juga perlu diperkuat. Hal ini mengingat produk hukum yang telah diterbitkan sebelumnya, fokusnya baru pada perspektif kebumiharian (Pusat Survei Geologi 2007).

E. DASAR PEMIKIRAN DAN PENDEKATAN

Seiring dengan kemajuan teknologi, kebutuhan manusia akan sumber daya semakin meningkat sehingga mengancam daya dukung dan ketersediaan sumber daya tersebut serta menghasilkan dampak negatif terhadap alam. Akibatnya, terjadi perubahan pada dinamika alam yang selama ini telah memperoleh keseimbangan. Gejala penyimpangan pada (proses) dinamika alam ditandai dengan kejadian ekstrem yang mengakibatkan bencana. Kawasan benua maritim Indonesia yang terbentuk oleh berbagai proses alam, menghasilkan sumber daya alam dan lingkungan yang beragam jenis dan potensinya. Selain menghasilkan sumber daya alam yang bermanfaat, proses alam juga memunculkan kejadian alam yang berpotensi memicu ancaman bahaya. Oleh karena itu, pengelolaan sumber daya alam dan lingkungan harus diiringi upaya mengetahui dan mengendalikan ancaman bahaya sehingga dampak bencana dapat dikurangi. Potensi sumber daya dan ancaman bahaya juga berbeda antara satu kawasan dan kawasan lainnya. Oleh karena itu, perlu pemahaman tentang dinamika alam yang menghasilkan perbedaan tersebut guna memperoleh data untuk pembuatan model pengelolaan yang aman dan memberi hasil maksimal.

Pendekatan yang dilakukan adalah melakukan analisis kondisi alam yang beragam dan memahami dinamika alam yang memicu kejadian ekstrem pemicu bencana. Untuk mengidentifikasi kejadian ekstrem pemicu bencana, diperlukan beragam data dan informasi yang mewakili berbagai gejala alam. Penggambaran kejadian dilakukan dengan model spasial berisi informasi perubahan ruang dan berdasarkan perubahan waktu. Guna memperoleh model tersebut, perlu gambaran besaran berbagai unsur yang terkait dengan kejadian dan penanggulangannya, dampak dan upaya pemulihan serta penguatan kawasan terdampak. Hal ini untuk menghadapi ancaman bahaya yang akan berulang pada masa mendatang.

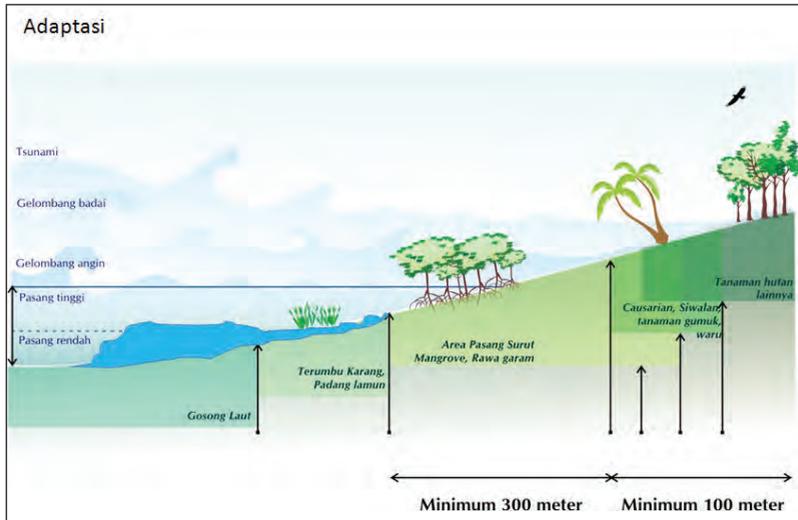
Pesisir landai dan pulau kecil merupakan bagian dari wilayah strategis Indonesia karena menyanggah beberapa status, seperti kawasan berpenduduk padat, kawasan perbatasan, kawasan terisolasi, dan kawasan penyanggah kerentanan dalam berbagai aspek. Kawasan ini mudah dicapai, baik dari darat maupun laut. Selain itu, tempat ini juga menjadi tumpuan atau sebagai pusat pemerintahan yang diikuti oleh perkembangan yang pesat.

A. DAYA DUKUNG SUMBER DAYA ALAM-LINGKUNGAN: KETERBATASAN DAN DAMPAK NEGATIF PENGELOLAAN

Kawasan pulau kecil dan pesisir landai, sebagaimana kawasan lain, memiliki sumber daya alam dan lingkungan yang potensi, jenis, dan besarnya berbeda dari satu ke tempat lain. Sebagai pulau kecil, di beberapa bagian dari busur kepulauan pada kawasan ini, menyimpan potensi sumber daya mineral. Bila dilakukan eksploitasi berdasarkan potensi sumber dayanya maka memerlukan ruang luas dan dipastikan akan mengambil kawasan perairan sebagai kawasan eksploitasinya. Ketika kawasan yang rentan terhadap kerusakan terjamah, kerusakan ekosistem seluruh kawasan tidak terhindarkan. Kerusakan pun semakin tidak mudah dikendalikan lagi (Hantoro dkk. 2012; 2013). Sumber daya lain yang terdapat di atau sekitar kawasan yang tidak terbarukan, misalnya batuan dan hidrokarbon/batubara. Sumber daya ini

terdapat dalam jumlah sangat besar, namun dampak eksplotasinya sering kali melampaui kemampuan pemulihan kawasan tersebut. Misalnya, sumber daya air potensi pemanfaatannya terbatas hanya untuk mendukung kegiatan di tempat atau pulau tersebut. Namun, eksplotasinya sudah melampaui daya dukung sumber daya tersebut karena terpakai untuk kegiatan di luar kawasan itu. Keadaan ini menjadi penyebab berkurangnya ketahanan kawasan tersebut. Sumber daya terbarukan dari suatu kawasan sering dieksplotasi berlebihan hanya untuk dipergunakan di kawasan tersebut. Eksploitasi semacam ini dapat melampaui kapasitas sumber daya ketika pemakaiannya bukan sekadar untuk kawasan tersebut (misalnya untuk ekspor), namun juga untuk dibawa ke luar kawasan. Dengan demikian, kerentanan kawasan ini berupa ancaman bahaya akibat rusaknya ekosistem sebagai dampak eksploitasi berlebihan.

Terlampauinya daya dukung sumber daya menimbulkan ancaman langsung terhadap ketahanan suatu kawasan. Oleh karena itu, harus dikaji seberapa jauh dampaknya terhadap kawasan yang tereksploitasi tersebut. Bila dilihat dari letaknya terhadap mintakat pemicu bencana, selain ketahanan kawasan mengalami penggerusan, daya dukung sumber daya yang melemah pun dapat meningkatkan kerentanan kawasan. Dampak negatif terlampauinya daya dukung alamiah di suatu kawasan tereksploitasi lanjut adalah hilangnya kapasitas alamiah sebagai pelindung atau pengurang ancaman bahaya sejak lama (Gambar 18). Misalnya, perambahan mangrove dan penambangan koral pada terumbu karang di hampir semua pesisir kawasan yang kekurangan bahan bangunan menghilangkan daya lindung bagian tubir terumbu karang dan laguna yang berperan sebagai pemecah gelombang. Contoh lainnya, penambangan pasir di pantai dengan pengerukan berlebihan meninggalkan lubang galian yang menyebabkan longsor dan penggerusan lanjut oleh gelombang (Hantoro dkk. 2015).



Sumber: Modifikasi dari Latief (2014)

Gambar 18. Peran Terumbu Karang, Mangrove, dan Tumbuhan Pelindung Pesisir dalam Bahaya Kejadian Ekstrem Muka Laut Tinggi

B. KERENTANAN PADA KEJADIAN EKSTREM ALAMIAH

Secara fisiografi, kawasan pulau kecil dan pesisir landai menempati bagian yang terpapar kejadian alam yang kerap berlangsung ekstrem atau melampaui keadaan biasanya. Beberapa peta mengenai keadaan cuaca-iklim dan dinamikanya memperlihatkan bahwa sebagian besar kawasan ini menempati mintakat dengan kerentanan yang tinggi. Keadaan cuaca buruk berpengaruh langsung terhadap keadaan laut setempat. Terpaan angin kuat saat hujan badai lazimnya diikuti gelombang kuat. Arah datang angin dan gelombang yang berubah seiring putaran iklim, menyebabkan lebih dari 50% pesisir di suatu pulau kecil mengalami terpaan bahaya cuaca ekstrem dengan ikutan bahaya yang datang dari kondisi fisik laut yang ekstrem pula. Perulangan kejadian yang relatif sering—hingga setidaknya dua kali dalam satu tahun dengan arah berbeda—menghasilkan semacam penyesuaian atau adaptasi masyarakat. Adaptasi yang selama ini dilakukan masyarakat adalah menghindari lokasi yang terpapar bahaya atau menang-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

gulangi ancaman bahaya. Namun, masyarakat kurang menyadari bahwa pemanfaatan dan pengelolaan sumber daya dapat berdampak negatif, yakni memperlemah kemampuan lingkungan dalam menerima ancaman bahaya.

Pada umumnya, kawasan pulau kecil memiliki pesisir landai, jauh ke arah hulu, atau hanya sepotong daratan sempit, namun landai dan rendah permukaannya dekat dengan paras muka laut. Keadaan ini menambah kerentanan terhadap ancaman tinggi muka laut ekstrem. Ancaman tinggi muka laut ekstrem terjadi bila ekosistem alamiahnya mengalami kerusakan akibat perambahan demi memenuhi kehidupan masyarakat atau eksploitasi untuk kepentingan wilayah lain. Ketiadaan sumber daya tertentu memaksa masyarakat merambah ekosistem guna memperoleh alternatif bahan. Misalnya, masyarakat di beberapa daerah yang tidak memiliki bahan bangunan, seperti batu dan pasir, membongkar pasir atau terumbu karang pantai yang secara alamiah berperan sebagai penahan gempuran gelombang (Hantoro dkk. 2012; Pemda Kab. Aru 2012). Contoh lainnya, kekurangan bahan kayu untuk bangunan dan energi mendorong masyarakat merambah hutan mangrove yang sesungguhnya berperan sebagai pelindung gelombang dan penangkap sedimen. Perambahan berlebihan yang merusak ekosistem pelindung ini sering kali terjadi akibat adanya permintaan berlebih dari daerah di luar kawasan (daerah lain yang tinggi kepadatan penduduk dan kegiatannya).

1. Pemanasan global gangguan cuaca dan iklim

Isu pemanasan global dan dampak emisi berlebihan gas rumah kaca menjadi pembahasan dalam tulisan ini, juga beberapa ancaman lain yang disandang pulau kecil dan pesisir landai. Gejala pemanasan global tidak hanya dilihat dari sisi cuaca dan keikliman, namun juga harus dilihat dampaknya terhadap perubahan muka laut (Keim 2011).

Pada bagian sebelumnya, telah disampaikan bahwa kawasan benua maritim sangat rentan terhadap kejadian ekstrem yang disebabkan oleh kondisi cuaca-iklim. Beberapa kawasan sebenarnya telah berada dalam kondisi cuaca-iklim yang tidak cukup mendukung kehidupan manusia jika memperhitungkan kecukupan sumber daya

pangan dan air. Akibatnya, lahan tidak memberi hasil yang cukup bagi kehidupan. Kawasan ini akan berada pada kerentanan tinggi ketika populasi penduduk juga tinggi. Kerentanan meningkat, terutama di kawasan pesisir landai atau pulau kecil, ketika kejadian ekstrem dampak anomali kuat cuaca dan iklim berlangsung (Happ 2011). Hujan berlebih atau kekeringan berkepanjangan adalah contoh bencana iklim yang terjadi di Nusa Tenggara Timur dan Maluku Tenggara. Simpangan kuat cuaca iklim juga menghasilkan kejadian ekstrem, seperti badai yang diikuti gelombang kuat yang mengancam langsung fisik pantai. Tingginya muka laut mengirim genangan air asin yang merusak simpanan air tawar di akifer dangkal. Kejadian lain sebagai dampak gangguan cuaca dan pemanasan global adalah naiknya suhu atmosfer dan air laut yang mendorong pelelehan massa es di kedua kawasan kutub bumi. Lelehan massa es menjadi air yang menambah volume dan diikuti oleh naiknya muka air laut. Thiruvananthapuram (2011) dan IPCC (1997) mengajukan skenario kecenderungan kenaikan ini dengan beberapa kemungkinan (Gambar 10). Pada tulisan ini, kecepatan kenaikan muka laut pada 0,5 cm/tahun atau kurang lebih 50 cm lebih tinggi pada akhir abad ini. Angka tersebut menyebabkan perubahan fisik yang berarti pada pantai dan bahkan pesisir landai. Perubahan fisik tersebut mempermudah air laut menjangkau ke pesisir bagian belakang (hulu) melalui alur sungai atau rawa serta daratan landai (Bishop 2011). Gelombang yang terpicu angin kencang semakin meningkatkan intensitas dan ketinggiannya sehingga energi maksimum gelombang jatuh pada titik lebih tinggi di pantai yang sebenarnya tebing yang lemah dan mudah hancur karena abrasi pantai. Keadaan ini diperparah dengan hilangnya pelindung pantai, seperti mangrove atau terumbu karang yang berperan sebagai pemecah gelombang alam.

2. Bahaya kejadian ekstrem geologi

Busur kepulauan yang terbentuk dari proses geologi menghadirkan bagian-bagian atau mintakat yang juga beragam dinamikanya. Gejala geologi endogen yang berkaitan dengan gerak lempeng samudra dan kerak benua ditandai oleh gempa dan kegiatan gunung api. Gempa

dan kegiatan gunung api memberi ancaman langsung maupun tidak langsung pada lingkungan pesisir dan pulau kecil di sepanjang dan dekat mintakat penunjaman serta jalur gunung api. Selain mengakibatkan kerusakan fisik, gempa juga dapat memicu gelombang tsunami dari kejadian deformasi kulit kerak bumi. Misalnya, pulau dan pesisir di perairan sebelah barat Sumatra terpapar langsung dampak gempa kuat yang berpotensi menimbulkan tsunami. Ancaman ini juga berpotensi terjadi di pesisir bagian selatan Jawa serta seluruh pulau di sepanjang busur Sunda, Banda, Maluku, dan Sulawesi Utara. Pesisir kawasan ini umumnya memiliki morfologi berbukit langsung yang membentuk tebing terjal, namun sebagian memiliki pesisir sempit dengan pantai landai. Sebagian pulau kecil terbentuk dari pengangkatan terumbu karang yang sebelumnya tumbuh menumpang di atas dangkalan. Bagian ini menyandang kerentanan tinggi terhadap ancaman bahaya gelombang tsunami. Di Sumatra dan Jawa, gunung api terletak jauh dari pantai sehingga bahan hasil letusannya tidak sampai menjangkau pesisir. Gunung api Krakatau merupakan pengecualian karena berada di tengah Selat Sunda, sebagai pusat erupsi baru pasca-letusan tahun 1883 yang menghancurkan Pulau Rakata dan pesisir pulau kecil di dekatnya, pesisir Sumatra, dan Banten. Di jalur Sunda bagian timur sejak Bali menerus ke jalur Banda di Maluku, pulau gunung api relatif kecil sehingga hasil letusan gunung apinya yang berupa lahar maupun lava dapat menjangkau pesisir dan masuk ke dalam laut. Beberapa titik kegiatan vulkanik ditemukan di perairan laut dalam Laut Banda (misalnya Emperor of China, dan lain-lain) dan di jalur tektonik dari Sulawesi Utara hingga Kepulauan Sangir. Kawasan ini terpapar ancaman bahaya dampak erupsi yang dapat memicu gelombang kuat.

C. KAWASAN PERBATASAN DAN DAERAH TERTINGGAL

Beberapa gugusan pulau kecil menghadapi permasalahan pengelolaan kawasan perbatasan. Dalam banyak hal, kawasan ini tergolong sebagai kawasan tertinggal akibat sulit terjangkau transportasi dan sumber daya alam yang terbatas. Akibatnya, kawasan ini kurang memiliki daya tarik bagi tumbuhnya kegiatan ekonomi. Kurangnya sarana

transportasi dan rendahnya tingkat sosial ekonomi masyarakat menempatkan kawasan ini (dalam hal fisik dan penduduknya) pada tingkat yang sangat tinggi kerentanannya. Akses terbatas ke kawasan ini dan jarak yang jauh dari pusat kegiatan ekonomi menempatkan masyarakatnya pada tingkat kesejahteraan yang rendah. Dengan tingkat kesejahteraan yang rendah, masyarakat berada pada kerentanan tinggi ketika dilanda bencana. Daya dukung sumber daya terbatas juga menyebabkan masyarakat kawasan ini tidak mampu bertahan jika kejadian ekstrem terjadi berulang kali.

D. KEPENDUDUKAN, SOSIAL EKONOMI, DAN BUDAYA

Pulau kecil dan beberapa titik kawasan pesisir memiliki letak strategis sehingga mengalami perkembangan pesat sebagai kawasan ekonomi maupun pemerintahan. Perkembangan ini diikuti tingginya populasi dan berimbas pada meningkatnya jumlah kawasan padat permukiman. Tingginya populasi juga diikuti tingginya kebutuhan sumber daya yang tidak hanya berasal dari kawasan tersebut, tetapi juga dari kawasan di sekitarnya. Tingginya populasi menyebabkan munculnya berbagai masalah sosial ekonomi, terutama pada kawasan yang rendah tingkat kesejahteraan masyarakatnya. Konflik lateral maupun vertikal antara masyarakat dan pengelola kawasan menyebabkan rendahnya perhatian dan partisipasi masyarakat pada isu kerentanan kawasan terhadap berbagai macam ancaman (Lassa 2011). Rendahnya kepedulian ini semakin menutup kesadaran masyarakat terhadap ancaman yang sifatnya datang perlahan (*slow onset*), seperti kenaikan muka laut eustatik sebagai dampak pemanasan global. Ancaman lain yang datang perlahan adalah meningkatnya pencemaran akibat berbagai limbah yang dihasilkan dari tekanan kependudukan. Rendahnya kohesi sosial menyebabkan sulitnya mobilisasi upaya pengurangan kerentanan yang harus dibangun atas dasar kebersamaan di antara masyarakat. Ongkos upaya ini menjadi semakin mahal ketika partisipasi masyarakat juga rendah, terlebih bila diperlukan pengaturan fisik permukiman. Misalnya, penyediaan ruang di permukiman padat untuk jalur evakuasi atau pembangunan peredam ancaman bahaya.

E. TEKANAN EKSPLOITASI BERLEBIH DAN LIMBAH

Masalah lain yang dihadapi pesisir dan pulau kecil adalah eksploitasi dan limbah. Keduanya merupakan masalah turunan dari berlebihnya penduduk. Tingginya kepadatan penduduk dengan kerapatan hunian mendorong eksploitasi berlebih pada sumber daya lahan dan air. Tingginya populasi dan kepadatan hunian menimbulkan masalah sanitasi akibat rendahnya kapasitas pengelolaan limbah domestik (Hantoro dkk. 2008). Misalnya, limbah meresap menjadi bagian dari air tanah dangkal dan mengalir menjadi penekan pada kualitas air perairan sekitar pantai atau estuari. Masalah limbah juga terjadi di kawasan pesisir yang ada kegiatan industri dan limbahnya tidak terkelola dengan baik. Akhirnya, limbah menjadi bagian dari air tanah dangkal maupun cemaran di perairan. Limbah plastik yang hancur menjadi bagian halus (mikroplastik), namun tidak terurai dan menyebar hingga perairan lepas. Hal ini tentunya berdampak pada kualitas perairan. Kualitas buruk perairan meningkatkan ancaman bahaya ketika muka laut tinggi. Tingginya muka laut akan mengirim limbah ini ke daratan sehingga menutup daratan dan meningkatkan pencemaran di permukiman.

Bentuk lain tekanan berlebih adalah eksploitasi air tanah dalam maupun dangkal yang mengakibatkan intrusi air asin dari laut dan penurunan tanah karena kosongnya ruang antarpori yang ditinggalkan air (Hantoro dkk. 2008). Penurunan kawasan ini berakibat pada naiknya percepatan relatif muka laut.

Dalam banyak hal, suatu kawasan pesisir—walaupun tidak berada pada tekanan tingginya populasi, dapat saja mengalami tekanan berlebih akibat sumber daya yang terkuras untuk pemenuhan kebutuhan kawasan di luarnya. Dengan demikian, dampak berupa kerusakan lingkungan akan menurunkan ketahanan kawasan terhadap ancaman bahaya. Sebagai contoh, hancurnya ekosistem terumbu karang dan mangrove atau sedimen akan mempercepat kerusakan kawasan sehingga meningkatkan kerentanan terhadap bahaya muka laut tinggi.

Kerentanan dan ketahanan kawasan dalam menghadapi ancaman bahaya tidak terlepas dari bagaimana suatu bencana terjadi dengan besaran dan intensitasnya. Hal yang tak kalah penting adalah respons masyarakat terhadap ancaman kejadian ekstrem yang boleh jadi memiliki intensitas tinggi pada perulangannya.

A. SIKLUS DAN TAHAP RESPONS KEBENCANAAN

Jenis pemicu bahaya dan kejadian bencana berbeda dari satu tempat ke tempat lain. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang tepat. Pendekatan ini dilakukan saat mempersiapkan segala tindakan, mulai dari tanggap darurat, penguatan, dan penyiapan menghadapi bencana (Bollin dkk. 2003).

Selain memperhitungkan waktu perulangan kejadian yang berbeda temponya dari satu tempat ke tempat lain, perlu juga memperhitungkan intensitas frekuensi dan besaran suatu kejadian ekstrem dalam suatu putaran perulangan. Secara garis besar, tahap-tahap yang dilalui dari satu kejadian bencana ke bencana berikutnya di suatu kawasan terdampak disampaikan pada Gambar 19.



Sumber: Visualisasi konsep OCHA (2011) dalam Hantoro (2012)

Gambar 19. Siklus di antara Dua Kejadian Bencana dengan Tiap Tahap Tindakan

Untuk menghadapi ancaman bahaya muka laut tinggi yang dipicu kejadian ekstrem cuaca-iklim yang sangat cepat perulangan kejadiannya, diperlukan upaya mitigasi, adaptasi, dan tindakan tanggap darurat. Tentunya upaya-upaya tersebut harus didasarkan pada data terkait seberapa besar kejadian dan kerusakan yang diakibatkan. Data besaran bahaya dan kemungkinan bencana ini diperlukan dalam pengajuan usulan pembangunan sarana untuk adaptasi dan mitigasi serta penanggulangan bencana pada tahap tanggap darurat. Besaran tersebut juga diperlukan untuk memperkirakan seberapa besar kerugian yang terjadi atau yang akan dihadapi. Dari perhitungan tersebut, upaya dan kisaran biaya tanggap darurat pasca-kejadian bencana dapat dipersiapkan.

Dengan mengetahui angka besaran bencana yang diperkirakan terjadi pada kondisi yang ada, dapat membantu perencanaan pem-

bangunan sarana atau tiap tahap kegiatan mitigasi-adaptasi dan pemulihan. Pada saat bersamaan, penyediaan sarana peringatan dini juga dilaksanakan sebagai tindakan pengurangan dampak bencana dan adaptasi. Dalam menghadapi jenis bencana seperti itu, diperlukan kecermatan agar dapat dicapai hasil maksimal. Jadi, setiap muncul ancaman bahaya, kawasan, dan masyarakatnya telah siap dan berada pada lindungan lebih aman serta mampu bertahan dengan lebih baik.

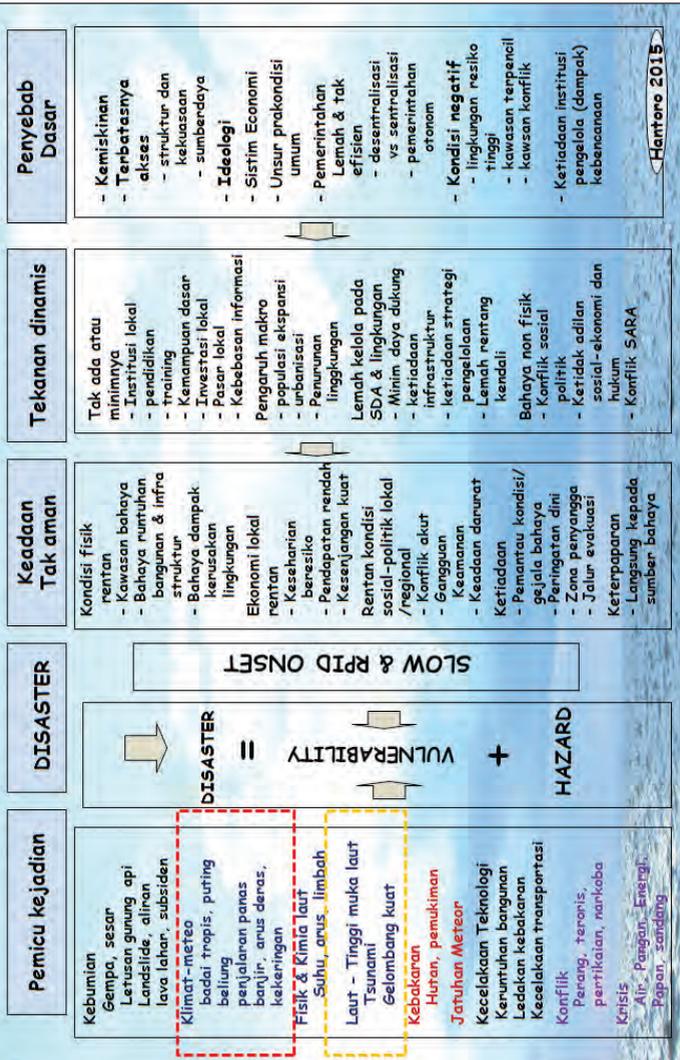
Adakalanya sarana pengurangan risiko bencana mengalami kerusakan dan harus segera diperbaiki. Ekosistem alamiah sebenarnya lebih mampu melindungi pantai dari ancaman bahaya, hanya saja memerlukan waktu lama untuk membangun atau memulihkannya jika telah mengalami kerusakan. Bencana tertentu sering terjadi berulang di tempat yang sama. Oleh karena itu, sarana pengurangan risiko bencana harus terus diperbaiki dan diperkuat agar selalu siap berfungsi. Sarana mitigasi dan pelindung di suatu tempat cepat mengalami kerusakan bila tidak dirawat dengan baik atau jika bencana sering kali berulang. Sarana yang mengandalkan bentukan alamiah ini memerlukan waktu lebih lama untuk pulih dan berfungsi maksimal kembali menjadi pengurang bahaya. Pada bencana yang frekuensi kejadian ulangnya memerlukan waktu sangat lama, sarana pengurangan risiko bencana harus selalu terjaga dan diperkuat agar tetap berfungsi dengan baik. Sarana cepat mengalami kerusakan jika bencana tersebut tinggi tingkat perulangan kejadiannya.

1. Bencana, Kerentanan, dan Pulau Kecil

Pemahaman mengenai bencana, kerentanan, dan pulau diperlukan untuk membahas kerentanan dan ketahanan pulau kecil, khususnya terhadap kejadian ekstrem gangguan cuaca. Konsep letak dan status pulau kecil dalam masalah bencana dan kerentanan digambarkan secara ringkas pada gambar 20.

Diagram ini terdiri atas kolom yang memuat unsur-unsur pemicu kejadian, jenis bencana, deskripsi keadaan tidak aman, tekanan dinamis, dan penyebab dasar bencana. Pemicu kejadian dapat berupa gejala geologi (endogen dan eksogen). Pemicu lain yang menjadi fokus kebencanaan pulau kecil berasal dari kejadian meteorologi (cuaca-

KONSEP BENCANA DAN KERENTANAN



Hantoro 2015

Sumber: Hantoro dan Ijuwansah (2014)

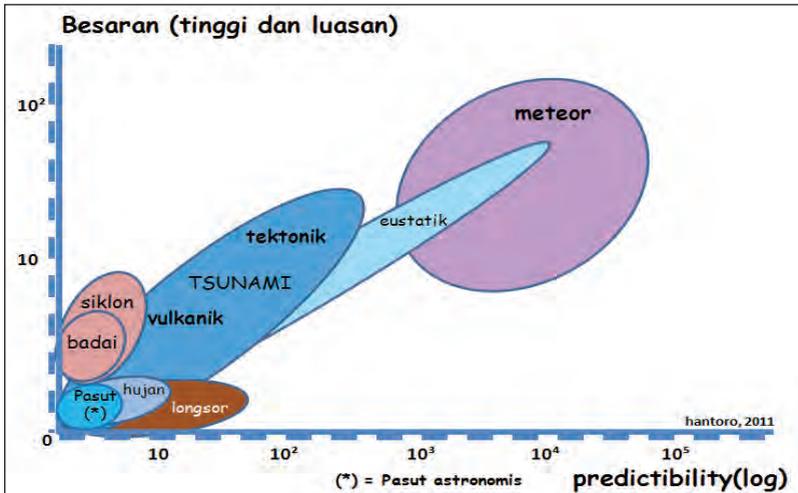
Gambar 20. Tabulasi Sintesa Kerentanan dan Ketahanan Pulau Kecil pada Perspektif Kebencanaan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

keikliman). Dua pemicu tersebut mengakibatkan tinggi muka laut ekstrem, gelombang kuat, dan tsunami. Pemicu kejadian cuaca keikliman dapat menyumbang perubahan kondisi fisik dan kimiawi laut. Perubahan kondisi fisik dan kimiawi berpengaruh pada gejala yang memicu bahaya lain yang datang perlahan, misalnya kenaikan muka laut eustatik global. Kejadian yang dipicu gejala geologi dan keikliman dapat muncul dalam waktu singkat sehingga tidak banyak waktu untuk menghindar. Pada keadaan demikian, upaya pengurangan bencana harus dilakukan sehingga ancaman bahaya dapat dikurangi semaksimal mungkin. Diagram juga memberi penjelasan mengenai bagaimana unsur kerentanan non fisik dapat meningkatkan kerentanan dan risiko. Kerentanan ini dapat terjadi karena pemerintah lemah dalam memenuhi hajat hidup masyarakat. Diagram juga dengan jelas menggambarkan bagaimana suatu bencana bisa sangat besar dampaknya bagi kehidupan sosial masyarakat yang mengalami kejadian secara langsung. Dampak yang dimaksud bukan hanya berupa kerusakan fisik, namun juga mencederai mental dan sosial masyarakat. Unsur masyarakat yang berbeda dari satu kawasan ke kawasan lain juga meninggalkan cedera yang berbeda, tergantung bentuk kekerabatan, tingkat pendidikan, sosial ekonomi, budaya, birokrasi pemerintahan, dan keterbukaan terhadap informasi. Dengan demikian, kerentanan dan ketahanan masyarakat dalam menghadapi bencana tidak lepas dari keadaan lingkungan dan kejadian ekstrem yang memicunya. Namun, kemampuan pemerintah mengelola keadaan sebelum, sesaat, dan setelah bencana terjadi pun tak kalah besar pengaruhnya.

Berdasarkan gejala alam pemicu ancaman bahaya muka laut tinggi, dapat digambarkan perbandingan besaran di antara gejala tersebut dalam hal potensi pemicu dan ketinggian muka laut yang dihasilkan (Gambar 21). Kejadian ekstrem cuaca dan kelautan (pasut maksimum, hujan, badai, dan sebagainya) memiliki potensi ancaman bahaya dan ketinggian muka laut yang lebih rendah dibandingkan kejadian tsunami yang dipicu berbagai kejadian alam, contohnya vulkanik, tektonik, bahkan jatuhnya meteor.

Perbandingan pada Gambar 21 menjelaskan bahwa perulangan kejadian dan kemampuan prakiraan kejadian lebih sulit dikenali pada



Sumber: Hantoro dan Djuwansah (2014)

Gambar 21. Perbandingan Potensi Pemicu dan Tinggi Gelombang Muka Laut Ekstrem

kejadian tsunami dibandingkan kejadian akibat gejala cuaca-ke-ikliman. Sintesis ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan penjelasan hubungan antara satu unsur kebencanaan dan unsur lain yang terkait. Hubungan di antaranya bahkan dapat digambarkan dan diberi besaran nilai.

2. Siklus kejadian bencana dan responsnya

Sebagai negara kepulauan yang terbentuk dan berkembang seiring dinamika alam yang sangat rumit, wajar bila Indonesia menghadapi ancaman berbagai kejadian ekstrem yang perulangannya berbeda, tergantung gejala yang bekerja. Jenis kejadian alam dan besaran ancaman masih perlu dipelajari agar suatu kejadian dan hubungannya dengan kejadian lain, penyebab, dan dampaknya dapat lebih dipahami. Pemahaman ini juga diperlukan untuk pengelolaan sumber daya alam dan lingkungan pulau kecil dan pesisir landai.

Kejadian ekstrem berlangsung dan berulang di suatu tempat dan muncul pula di tempat lain. Misalnya, kejadian ekstrem meteorologi sering terjadi baik di lokasi yang sama maupun lokasi berbeda dengan

besaran yang berbeda pula. Intensitas kejadian bencana meteorologi yang relatif tinggi ini menyebabkan masyarakat dan ekosistemnya seolah telah beradaptasi dan memiliki ketahanan menerima risiko bencana. Walaupun bencana ini menyebabkan kerugian tidak kecil dan terjadi berulang, masyarakat tetap bertahan tinggal dan melanjutkan kegiatannya dengan berbagai alasan. Bahaya lain yang dipicu oleh gejala geologi—yang kemudian menyebabkan kejadian ekstrem muka laut tinggi—adalah tsunami. Kejadian ini merupakan konsekuensi dari kondisi geologi Indonesia yang merupakan jalur tektonik aktif konvergensi kerak bumi. Jalur ini ditandai oleh kegempaan kuat dari Aceh ujung utara pulau Sumatra, menerus dan berbelok di kawasan sekitar Laut Banda (Gambar 22). Mintakat aktif ini membentuk jalur paralel di Laut Halmahera sebagai jalur penunjaman ganda. Rapatnya kegempaan dan panjangnya jalur aktif dapat menyebabkan gempa kuat yang berpotensi sebagai pembangkit gelombang tsunami. Gelombang yang dibangkitkan oleh satu titik atau jalur deformasi memiliki penjaralan yang melebar (Gambar 16 dan 17) dan dapat menjangkau kawasan sangat luas, tergantung ketinggian gelombang yang dibangkitkan. Gelombang dapat terpantul oleh gugusan pulau, menuju lintasan lain sehingga menambah luas kawasan terdampak. Walaupun statistik kejadian suatu gempa kuat di suatu daerah memperlihatkan perulangan hingga lebih dari 200 tahun, titik pelepasan gempa yang tidak jauh dari titik semula dapat menimbulkan bahaya tsunami di suatu kawasan tertentu. Dengan demikian, risiko yang disandang oleh suatu kawasan bisa lebih tinggi tingkat perulangan kejadiannya.

Pada bencana muka laut tinggi yang dipicu gejala kebumihan, yaitu gelombang tsunami yang perulangan kejadiannya mencapai puluhan tahun, setiap tahap kegiatan tanggap darurat dapat dilakukan dengan perencanaan dan persiapan lebih matang karena rentang waktu yang tersedia cukup panjang. Usaha pengurangan bahaya pun dapat dilakukan dengan mengandalkan kondisi alam, tentunya dengan perencanaan matang dan waktu yang cukup. Contohnya, menumbuhkan ekosistem alam. Tegakan di pantai, seperti hutan mangrove, cemara laut (*Cassuarina equisetifolia*), dan terumbu karang—yang pertumbuhannya memerlukan waktu lama—dapat ditanam pada mintakat yang sesuai dengan ekosistemnya. Oleh karena itu, perlu

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dilakukan studi pemilihan mintakat yang sesuai bagi tiap ekosistem tersebut. Terlebih lagi, tsunami yang merusak ekosistem semula dan membawa bahan yang diendapkan kemudian. Akibatnya, hal ini menghalangi usaha rehabilitasi dengan tanaman sejenis atau semula.

Bencana tsunami yang menghancurkan lingkungan dengan korban sangat banyak meninggalkan trauma berat bagi masyarakatnya. Pemulihan trauma ini memerlukan waktu lama. Hal ini karena pemulihan dan perbaikan yang bersifat fisik tidak cukup untuk menghapus trauma kejiwaan. Lain halnya dengan bencana kejadian ekstrem yang sering berulang dan dipicu anomali cuaca-iklim. Trauma yang timbul berulang kali dalam kejadian ekstrem seperti ini dapat menyebabkan apatisme masyarakat.

B. KONSEP BAHAYA DAN BENCANA MUKA LAUT TINGGI

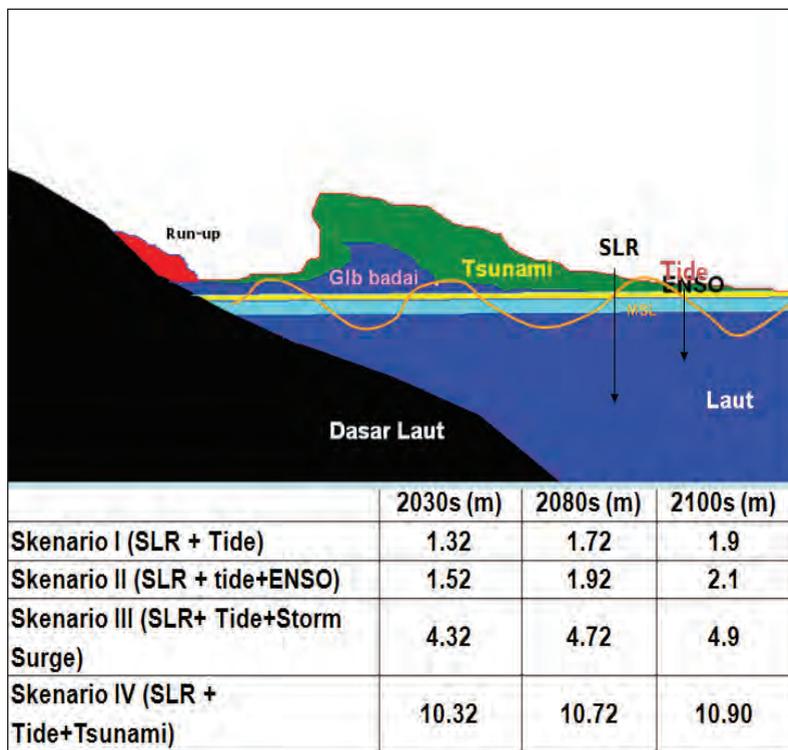
Ancaman bahaya pada pesisir landai dan pulau kecil yang paling sering terjadi adalah kejadian muka laut tinggi. Kejadian ini berasal dari berbagai kejadian ekstrem lain yang dipicu anomali cuaca iklim dan kejadian ekstrem geologi. Kejadian ini dapat berlangsung cepat, seperti gelombang badai dan tsunami, namun juga dapat berlangsung perlahan, berupa kenaikan muka laut karena pemanasan global.

Seluruh potensi bahaya tersebut dapat digambarkan penyebaran (Gambar 22) maupun besarnya. Untuk menyatakan besaran potensi bahaya, perlu dijelaskan mengenai beberapa unsur yang bekerja menghasilkannya. Oleh karena itu, diusulkan rumusan-rumusan dengan notasi singkatan dari bahasa Inggris yang disampaikan pada bagian berikutnya (Persamaan 1) (Hantoro 2012). Rumusan dibuat sesederhana mungkin sehingga dapat dengan mudah dan cepat diterapkan oleh pemangku kepentingan. Berdasarkan pendekatan sistem informasi geografi, rumusan ditetapkan untuk menghitung luasan di suatu kawasan. Citra satelit optik dan radar dapat digunakan untuk peta pada bagian selanjutnya.

1. Tinggi Muka Air Laut: (H_{total}) dalam meter

Berkaitan dengan tinggi paras muka laut, sebagaimana telah disampaikan pada bagian sebelumnya, formulasi dari keseluruhan unsur pe-

nyebab kejadian memiliki dinamika dan besaran yang sifatnya global namun juga berbeda dari waktu dan tempat. Ketinggian yang disebabkan oleh beberapa kejadian tersebut suatu ketika dapat terjadi dan mencapai besaran maksimum. Satu dengan kejadian lain atau beberapa hingga sebanyak mungkin kejadian, dapat berlangsung (Gambar 23) pada besaran maksimum dan bersamaan waktunya. Ketinggian maksimum total dapat diformulasikan sebagai penjumlahan dari semua kejadian dari semua unsur penyebab. Kejadian muka laut tinggi tersebut tidak hanya datang dan berlangsung secara perlahan, namun juga dapat datang dalam waktu singkat dengan kecepatan tinggi.



Sumber: Latief (2014)

SLR = sea level rise (kenaikan muka laut)

Gambar 23. Diagram Ketinggian Muka Laut dari Berbagai Kejadian Alam yang Berpotensi Ancaman

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Secara garis besar, unsur penyebab terjadinya muka laut tinggi berkaitan dengan gejala astronomis, cuaca-iklim, kelautan, geologi, dan dampak kegiatan manusia. Gejala astronomis yang menyumbang pada ketinggian muka laut adalah perubahan volume massa samudra akibat perubahan gaya tarik benda angkasa atau disebut gejala pasang surut. Perubahan harian letak sisi tertentu bumi relatif menghadap matahari dan bulan menghasilkan perubahan muka laut yang beragam polanya, tergantung morfologi perairan dan pesisir. Perubahan letak relatif bumi terhadap benda angkasa pada suatu saat dapat menghasilkan gaya tarik maksimum yang menghasilkan pasang surut paling besar perubahannya hingga beberapa persen dari perubahan harian atau bulanan. Gejala astronomis lain yang mungkin terjadi dan menghasilkan tinggi muka laut ekstrem adalah gelombang tsunami akibat jatuhnya benda angkasa. Sifatnya dapat lokal, namun dapat juga luas, tergantung berapa besar dan di bagian mana jatuhnya terjadi.

Unsur cuaca-iklim juga dapat menyumbang pada ketinggian kejadian muka laut dan ketinggiannya berdasarkan besaran kejadian ekstremnya. Cuaca ekstrem menghasilkan berbagai gejala yang berujung pada perubahan air laut. Perubahan pola iklim, seperti ENSO, *Dipole Mode (IOD)*, hingga osilasi anomali cuaca regional (*MJO = Madden Julian Oscillation*) menghasilkan perubahan tinggi muka laut yang cepat datang dan singkat durasinya. Gelombang tinggi akibat angin kencang badai maupun siklon tropis merupakan contoh kejadian ekstrem cuaca. Muka air laut juga dapat berubah ketika tekanan udara di suatu tempat mengalami perubahan ekstrem. Perubahan jumlah energi yang diterima oleh bumi memiliki perulangan dalam waktu panjang. Gejala ini dikenal sebagai gejala Milankovitch, yakni perubahan letak dan luasan bagian sisi bumi yang menghadap matahari. Perubahan berkala ini menghasilkan perubahan pola iklim global yang melibatkan neraca hidrologi, misalnya penumpukan massa es di bagian lintang tinggi dekat kutub. Perubahan ini akan diikuti perubahan neraca dan siklus hidrologi jika volume air laut menjadi timbunan es. Gejala ini dapat diikuti perubahan turun dan naiknya muka laut hingga mencapai sekitar 150 m. Kejadian ini dikenal dan terjadi seiring perubahan zaman es global. Jangkauan pe-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

rubahan muka laut akibat gejala ini mencakup seluruh muka laut (global). Peristiwanya berlangsung sangat perlahan, bahkan perulangan kejadiannya hingga ribuan tahun, mulai dari 12.000 tahun yang diikuti perubahan muka laut dengan besaran hingga 25 m, hingga 125.000 tahun dengan perubahan hingga > 100 m, seiring dengan perubahan posisi bumi atau gejala Milankovitch.

Unsur kelautan tidak berdiri sendiri, tetapi terkait erat dengan cuaca dan iklim. Perubahan ekstrem yang terjadi dalam skala luas, seperti suhu air laut, diikuti oleh gejala pemanasan. Gejala pemanasan dapat menyumbang perubahan volume. Dengan demikian, tinggi muka laut ketika volume cekungan tidak mengalami perubahan. Menurut Hantoro (2012), unsur tinggi muka laut yang harus diperhitungkan terkait dengan beberapa hal sebagai berikut.

$$h_{\text{ex(tot)}} = h_{\text{as}} + h_{\text{cl}} + h_{\text{oc}} + h_{\text{gl}} + h_{\text{ant}} \text{ (m) } \dots\dots\dots 1)$$

$h_{\text{ex(tot)}}$ = Tinggi muka laut relatif saat kejadian ekstrem

h_{as} = Tinggi muka laut relatif unsur atmosferis

h_{cl} = Tinggi muka laut relatif unsur cuaca-iklim

h_{oc} = Tinggi muka laut relatif unsur kelautan

h_{gl} = Tinggi muka laut relatif unsur geologi

h_{ant} = Tinggi muka laut relatif unsur antropogenik

Sumbangan gejala geologi terhadap perubahan muka laut cukup banyak ragamnya dan hal ini telah lama dipahami. Gejala tersebut dapat bersifat lokal ataupun global. Pada gejala pengapungan kerak, perubahan luas cekungan samudra akibat pemekaran lantai samudra berperan sangat penting dalam perubahan volume cekungan. Namun, gejala tersebut berjalan sangat perlahan dalam skala geologi. Perubahan volume cekungan secara lokal terjadi akibat perubahan neraca sedimentasi ataupun penunjaman sedimen ke bawah kerak benua. Pengangkatan atau penurunan, baik daratan maupun dasar perairan juga menghasilkan perubahan relatif muka laut yang teramati pada perubahan garis pantai setempat. Dampak kegiatan manusia pada perubahan muka laut relatif terhadap daratan antara lain adalah, pada

Buku ini tidak diperjualbelikan.

skala lokal dapat berupa penurunan daratan akibat eksplotasi air tanah atau hidrokarbon berlebih, beban konstruksi kota di atas cekungan serta pada skala global adalah dampak pemanasan global emisi gas rumah kaca berupa pelelehan tudung es kutup dan pemuaiian air laut.

2. Jangkauan air laut: (C_{total} atau C_{e1}) dalam km^2

Penggenangan atau penenggelaman suatu pesisir dan pulau kecil terjadi dengan besaran waktu dan ketinggian yang juga berbeda. Jauh jangkauan tergantung unsur penyebab laut tinggi yang sifatnya global atau lokal dalam waktu singkat atau berangsur perlahan. Pada perubahan yang diakibatkan oleh gejala yang berlangsung perlahan, rayapan dan jangkauan air laut dapat mencapai jarak maksimal karena kecepatan rendah ini meniadakan perlambatan oleh unsur hambatan. Rumusan yang diajukan bersifat umum berlaku untuk berbagai ketinggian dan gejala yang menghasilkan tinggi muka laut (Hantoro 2012).

$$C_{e1} = h_{e1} \cdot v_{e1(x0-x1)} \cdot k[\pm f(L_{s1})](km^2) \dots\dots\dots 2)$$

bila

$$L_{s1} = G_{s1} + B_{s1} + O_{s1} + P_{s1}$$

$$C_{e1} = h_{e1} \cdot v_{e1(x0-x1)} \cdot k[\pm f(G_{s1} + B_{s1} + O_{s1} + P_{s1})](km^2)$$

bila beberapa kali kejadian maka

$$C_{tot} = h_{tot} \cdot v_{tot(x0-x1)} \cdot k[\pm f(G_{s1} + B_{s1} + O_{s1} + P_{s1})](km^2)$$

L_{s1} = lingkungan kejadian ke-1

C_{e1} = jangkauan penggenangan kejadian ke-1

f = unsur hambatan atau pelancar (+/-)

C_{tot} = Jangkauan penggenangan kejadian ke-1, 2, 3, dan seterusnya

v_{e1} = kecepatan datangnya massa air (km/det)

h_{e1} = tinggi dari massa muka air (m)

m = berat dari massa air laut dan muatan aliran

k = konstanta

- Gs_1 = Geologi tempat kejadian 1 (f_g = hambatan)
- Bs_1 = Biota tempat kejadian 1 (f_b = hambatan)
- Os_1 = Perairan/Laut tempat kejadian 1 (f_o = hambatan)
- Ps_1 = Prasarana/ fisik terbangun tempat kejadian 1

Rumusan umum tersebut juga dapat dipakai untuk menghitung jauhnya jangkauan air laut ke darat pada berbagai keadaan tempat dan kecepatan gerakan air laut. Hal yang perlu diperhatikan adalah batasan luasan kawasan di wilayah mana rumusan ini diterapkan. Beberapa unsur dalam rumusan ini mempunyai jangkauan luasan berbeda tergantung lingkungannya. Batasan ini bisa diacu pada morfologi ekosistem, seperti teluk, delta, pantai lurus dan terbuka, ekosistem mangrove atau terumbu karang, pulau kecil atau pesisir landai, dan lain-lain.

Besaran jangkauan (C) adalah seberapa jauh air laut, sebagai akibat ketinggian mukanya (H) yang berubah karena berbagai gejala ekstrem, masuk ke arah bagian dalam daratan secara perlahan atau dalam kecepatan tinggi (v). Sebagai model dinamis, menghitung jangkauan ini adalah dengan memasukkan unsur kecepatan dari laju dan volume air laut (V) ketika masuk. Massa air yang masuk (M) dapat berupa air laut dengan massa (m) yang sering telah mengangkut bahan yang tergerus (pasir, batuan, kayu, hancuran bangunan, dan lain-lain). Parameter hambatan oleh kekasaran lintasan (f) merupakan konstanta yang tergantung dari parameter unsur lingkungan, seperti adanya terumbu karang, mangrove, bangunan, saluran, dan lain-lain. Sementara itu, unsur-unsur yang membangun rumus hanya berupa bentuk fisik pantai dan pesisir (G , B , O , dan P). Unsur-unsur ini dapat mempermudah atau menghambat gerak masuk air laut. Nilainya positif karena berperan sebagai penahan, misalnya terumbu karang, mangrove, hutan pesisir atau tanggul buatan. Namun, bila berupa perairan dalam, gelombang (E) yang tiba dan menerjang pantai masih besar. Besaran ini dapat dibuat skala sebagaimana bencana dengan derajat kerusakan tertentu. Pada kejadian tsunami, unsur penahan ini sangat penting karena berperan sebagai peredam. Nilai masing-masing unsur harus ditentukan dan berlaku sama untuk semua

keadaan lingkungan. Ketepatan penentuan nilai dapat diberlakukan dalam berbagai keadaan ekosistem yang berbeda, ditentukan oleh seberapa banyak keragaman setiap unsur yang telah dikenali. Ketepatan dan kesesuaian nilai ini akan semakin baik bila semakin banyak keragaman unsur yang dikenali dari tiap-tiap ekosistem yang berbeda keadaannya.

C. BESARAN KEJADIAN PEMICU BENCANA: (E) ERG

Suatu kejadian memiliki besaran yang mengandung unsur volume, massa, dan bila memiliki unsur gerak (kecepatan) maka dapat menghasilkan tenaga. Besaran kejadian ini nantinya sebagai dasar menghitung besaran bahaya bila suatu kejadian mengandung risiko bahaya bagi komunitas di kawasan kejadian. Rumusan besaran kejadian tersebut adalah sebagai berikut.

$$E_{\text{tot}} = M_{\text{tot}} \cdot (v(v_{\text{tot}}))^2 \text{ton.m} \dots\dots\dots 3)$$

$$M_{\text{tot}} = m_{\text{tot}} / V_{\text{tot}} \cdot (10^3 \text{ ton})$$

$$V_{\text{tot}} = L_{e1} \cdot h_{e1} (\text{m}^3)$$

$$m_{\text{tot}} = m_1 + m_2 + m_3$$

$$E_{\text{tot}} = (m_{\text{tot}} / L_{e1} \cdot h_{e1}) \cdot vv_{\text{tot}}^2$$

E_{tot} = besaran kejadian 1

M_{tot} = berat massa air dengan muatan

V_{tot} = volume air dengan muatan (m^3)

m_1 = berat air laut

$m_{2,3}$ = berat benda yang terangkut air laut

m_{tot} = berat total air laut + yang terangkut

h_{e1} = tinggi massa muka air (m).

L_{e1} = luasan kejadian 1

V_{e1} = volume air laut kejadian 1

vv_{e1} = kecepatan datangnya massa air (km/det)
(Hantoro 2012)

Hal yang menyulitkan penghitungan besaran kejadian ini adalah menentukan nilai benda yang terseret menjadi bagian dari massa yang bergerak dalam suatu gelombang pasang tsunami. Besaran ini juga berubah dari titik ke titik seiring pergerakan massa air ketika mengalami hambatan, misalnya terumbu karang, mangrove, hutan pantai, atau bangunan. Massa yang bergerak masih memiliki momentum dorongan dari bagian belakang massa walaupun bagian depannya telah mengalami hambatan. Volume massa juga tidak homogen tergantung pembangkit tsunami dan morfologi yang dilewati.

D. KERENTANAN DAN INDEKS KERENTANAN

Keadaan ekstrem yang terjadi dan berlangsung dengan cepat maupun secara berangsur dapat membawa muatan bahaya. Keadaan ekstrem ini pun membawa konsekuensi kerusakan lingkungan. Dengan demikian, lingkungan menghadapi ancaman dan menyanggah kerentanan. Bahaya dan kerentanan ini dapat diperkirakan dan diperhitungkan bila diperoleh informasi mengenai besaran bahaya dan nilai lingkungan yang terancam. Pendekatan untuk menyatakan besaran bahaya telah diupayakan secara bertingkat pada bagian sebelumnya. Sementara itu, upaya mengetahui nilai kerentanan lingkungan dilakukan dengan merumuskannya dalam bentuk indeks kerentanan. Selanjutnya, dari dua hal yang telah diketahui ini, dicoba merumuskan menghitung risiko, besar kerugian, dan besar biaya yang diperlukan untuk rehabilitasi akibat bencana. Berdasarkan angka-angka tersebut, dapat diperkirakan besaran upaya peningkatan ketahanan yang diperlukan suatu lingkungan untuk menghadapi bencana.

Bila suatu lingkungan memiliki kemungkinan dilanda bencana maka lingkungan tersebut memiliki kerentanan. Suatu lingkungan terdiri atas berbagai unsur yang hadir secara alamiah maupun yang muncul kemudian sebagai sarana pemenuhan kebutuhan manusia. Beberapa unsur yang menjadi parameter perumusan indeks kerentanan adalah parameter fisik, lingkungan (bio-kimia), sosio-demografi, dan ekonomi-sarana fisik. Semua parameter dinyatakan dalam angka yang berkisar dari nilai (negatif) -10 hingga (positif) +10. Suatu parameter bernilai negatif bila kondisinya memberi pengaruh nega-

tif bagi ketahanan. Sebagai contoh, kondisi ekosistem (mangrove, terumbu karang, dan lain lain) yang rusak dinyatakan dalam angka negatif karena perannya sebagai pelindung tidak terpenuhi. Besarnya ditentukan berdasarkan tingkat kemampuan sebagai sarana atau tingkat sumbangannya pada kerusakan. Contoh lain yang terkait dengan lingkungan adalah kondisi muara sungai yang tercemar limbah cair dan tertutup timbunan sampah. Keadaan parameternya negatif karena menambah beban kerusakan saat gelombang pantai menerjang dan membawa material cemaran menjadi satu dengan massa air yang menerjang ke darat. Contoh lain adalah yang terkait dengan sosial kemasyarakatan suatu kawasan permukiman pantai. Kawasan dengan populasi masyarakat sejahtera menjadi parameter dengan nilai positif karena perannya dalam upaya penyelamatan. Namun, ini bisa bernilai negatif ketika dihitung sebagai aset ekonomi yang mengalami kerusakan. Berdasarkan konsep tersebut, dapat disusun indeks kerentanan dari berbagai unsur dengan beragam parameter.

Untuk menyederhanakan perumusan kerentanan, indeks kerentanan didasarkan pada beberapa hal yang dikelompokkan berdasarkan keadaan fisik alamiah, lingkungan, sosial kependudukan-budaya, ekonomi, dan prasarana yang ada. Unsur-unsur ini dapat memperkuat atau melemahkan besaran kejadian. Unsur-unsur tersebut juga dapat memengaruhi besar atau kecil dampak dan berapa lama dampak suatu kejadian akan berlangsung.

Besaran kerentanan tergantung pada besaran bahaya yang melanda suatu tempat. Besar kecilnya kerentanan tergantung pada jenis dan besaran bahaya, kesiapan, dan ketahanan dari yang menerima bencana. Oleh karena itu, pada pembahasan selanjutnya akan disampaikan formulasi untuk menghitung risiko yang disandang berdasarkan beberapa sisi besaran dalam suatu dinamika bencana.

1. Indeks Kerentanan geo-fisik ($IV_{\text{vul.f}}$)

Keseimbangan beragam ekosistem di pesisir dan pulau kecil telah lama tercapai. Namun, beragamnya kejadian yang membangun ekosistem menyebabkan upaya penanganan masalah pengelolaan kawasan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

tidak mudah dilakukan. Kesulitan ini semakin bertambah karena tidak hanya harus memperhitungkan potensi sumber daya alam lingkungan yang terbatas, tetapi juga harus memperhitungkan potensi ancaman bahaya atau tingginya kerentanan. Guna memahami bagaimana suatu ancaman bekerja di suatu kawasan dan besarnya, analisis kerentanan dilakukan pada beberapa unsur yang menyangang kerentanan, salah satunya adalah kondisi fisik. Bagian dari ekosistem yang dapat dikelompokkan untuk penentuan kerentanan adalah kondisi geo-morfo-fisika lingkungan. Kelompok ini terdiri atas unsur geologi, kelautan, iklim cuaca, biofisik, prasarana, dan sumber daya di sekitarnya.

Indeks kerentanan fisik dapat dinyatakan sebagai berikut: (Hantoro 2012).

$$IV_{\text{vul.f}} = \frac{\pm k \sqrt{Af.Bf.Cf.Df.Ef.Ff. \dots \dots 4a}}{6}$$

Keterangan:

- A. (geo-morfologi): tektonik, penurunan, pantai tebing-undak teras, pantai berbukit, pantai landai, dataran berlumpur, pantai lurus/teluk, rawa pantai, delta/estuari, laguna, parit pantai, pulau pelindung, dan lain-lain.
- B. (laut/perairan): perairan landai-dalam, tinggi pasut, tinggi gelombang, arus, kenaikan muka laut eustatik, pasut astronomis.
- C. (meteo-klimatologi): badai, anomali (ENSO, Dipole Mode, MJO, dan lain-lain).
- D. (biota): terumbu karang, mangrove, rumput laut, hutan pantai, dan lain-lain.
- E. (prasarana): tanggul, pelabuhan, bangunan, pemecah gelombang, parit/kanal, gudang, jalan, jembatan, kolam-tambak, sanitasi, jaringan kabel listrik/komunikasi/BBM, air, dan lain-lain.
- F. sumber daya: air permukaan (danau, sungai, dan sebagainya), air tanah dangkal, mineral, energi, logam mulia, dan lain-lain.

Pada indeks kerentanan fisik, unsur yang menjadi penentu merupakan faktor fisis. Faktor ini berpengaruh pada perubahan fisis lingkungan sebagai dampak kenaikan muka laut dan seberapa besar kerentanan fisik tersebut menerima bahaya. Besaran dinyatakan dalam satuan meter, namun semua nilai dengan pembobotan.

2. Kerentanan Lingkungan (Bio-fisik) ($IV_{vul.b}$)

Ada beberapa hal terkait nilai kerentanan unsur-unsur dalam faktor fisik ini. Pertama, nilainya dapat positif maupun negatif tergantung perannya saat tiap unsur tersebut menerima kejadian bencana. Kedua, respons lingkungan terhadap kecepatan dan besaran tergantung besaran bendanya. Demikian halnya dengan kemampuan pemulihannya (Hantoro 2012).

$$IV_{vul.b} = \frac{\pm k\sqrt{Ab.Bb.Cb.Db.Eb.Fb.Gb.Hb}}{8} \dots\dots 4b)$$

Keterangan:

- A. Dinamika proses alam di kawasan terlanda bencana (neraca sedimentasi-pendangkalan, arus, gelombang, dan lain-lain). Besaran dinyatakan dalam satuan meter.
- B. Kondisi kawasan perairan, intertidal, dan pesisir supratidal menghadapi perubahan fisik maupun kimia (pencemaran, peng-garaman, dan lain-lain).
- C. Kondisi biota infratidal: terumbu karang, lamun, ikan, mamalia, dan lain-lain.
- D. Kondisi biota intertidal: mangrove, nipah, reptil, ikan, dan lain-lain.
- E. Kondisi biota pesisir (supratidal): baringtonia, pepohonan tropis dataran rendah, pandan, kebun kelapa, lontar, dan lain-lain.
- F. Kondisi biota sesil, bentik, dan pelagik.
- G. Kondisi biota *upper delta* (jangkauan terjauh).
- H. Kondisi biota (fauna), khususnya unggas akuatik.

Unsur yang disampaikan dalam rumusan boleh jadi hanya sebagian dari seluruh unsur yang berpengaruh terhadap besaran kerentanan atau menjadi unsur yang sebenarnya rentan menghadapi bencana. Dengan demikian, nilainya bisa negatif maupun positif.

3. Kerentanan Sosio-Demografi ($IV_{vul.s}$)

Besaran kerentanan unsur sosio-demografi dapat dijelaskan dari berbagai sudut pandang. Sebagai contoh, masyarakat dengan keguyuban dan etos kerja tinggi serta jiwa wirausaha yang kuat dianggap memiliki kerentanan rendah. Sebaliknya, masyarakat dengan kepadatan penduduk tinggi, hubungan kekerabatan renggang, dan tingkat pendidikan yang rendah dianggap memiliki kerentanan tinggi (Hantoro 2012).

$$IV_{vul.s} = \frac{+k\sqrt{As.Bs.Cs.Ds.Es.Fs.Gs.Hs.Is}}{9} \dots\dots\dots 4c)$$

Keterangan:

- A. Kepadatan penduduk
- B. Tingkat pendidikan, penguasaan komunikasi
- C. Struktur dan kondisi sosial kelompok (paternalistik, maternalistik, dominasi kelompok, dan lain-lain)
- D. Etos kerja, sifat wirausaha, dan sebagainya
- E. Tahan uji (menerima adanya korban manusia/kerugian harta benda/kehilangan mata pencaharian)
- F. Kemampuan pemulihan traumatik (luka, sakit, kelelahan, dan sebagainya)
- G. Keguyuban, ikatan kekerabatan, kesukuan, agama, dan sebagainya
- H. Sikap optimistis/apatisisme
- I. Sikap perlindungan, penjarahan, permusuhan, dan kerja sama

Sebagian unsur yang teridentifikasi tersebut dapat bernilai positif ataupun negatif. Namun, tidak semua variabel dapat dikuantifikasi dan dihitung besarnya. Diperlukan pendekatan agar kondisi masyarakat yang hanya dapat dideskripsikan secara kualitatif dapat disajikan sebagai data yang selaras dengan data lain. Penentuan besaran untuk tiap unsur sangat tergantung pada kecermatan analisis lingkungan masyarakatnya yang beragam dari satu ke tempat lain. Unsur-unsur tersebut juga masih mungkin bertambah tergantung kompleksitas masyarakatnya. Namun, unsur-unsur tersebut masih belum mewakili keseluruhan kondisi sosial kependudukan di Indonesia. Hal ini karena sikap hidup masyarakat pesisir dengan kepulauan maupun antara masyarakat kota dan pedalaman sangat berbeda. Kecepatan datangnya bencana di suatu kawasan juga menentukan seberapa besar kerentanan kawasan tersebut. Sebagai contoh, naiknya muka laut secara perlahan berbeda besar ancamannya dengan naiknya muka laut dengan kecepatan tinggi. Hal ini karena ada unsur waktu atau kesempatan bagi lingkungan untuk beradaptasi. Selain itu, ketiadaan unsur kecepatan menjadikan besaran kejadian dalam bentuk tenaga dapat diabaikan.

4. Kerentanan Ekonomi-Prasarana: ($IV_{vut,p}$)

Selain memiliki unsur kependudukan, suatu lingkungan yang berpotensi terlanda bencana juga memiliki unsur yang berkaitan dengan kegiatan atau sistem ekonomi berikut sarana pendukungnya. Pengelompokan ini dilakukan dalam upaya mempermudah penghitungan besaran melalui rumusan-rumusan yang diusulkan. Rumusan ini hanya memperhitungkan sebagian dari unsur yang lazim ditemukan pada suatu lingkungan. Semakin kompleks suatu sistem, semakin banyak bagian unsur yang harus diperhitungkan karena tiap objek dan kegiatan memiliki nilai tersendiri (Hantoro 2012).

$$Ive_p = \frac{\pm k \sqrt{Ap.Bp.Cp.Dp.Ep.Fp.Gp.Hp.Ip}}{9} \dots\dots\dots 4d)$$

Dampak dari kejadian dapat berupa kerusakan atau kerugian secara langsung maupun tidak langsung pada beberapa sistem yang ada.

Keterangan:

- A. Kondisi prasarana/jaringan jalan distribusi air
- B. Kondisi sarana/sistem perdagangan/mata pencaharian
- C. Kondisi sarana/sistem transportasi dan komunikasi
- D. Kondisi sarana/sistem pemerintahan
- E. Kondisi sarana/sistem pendidikan
- F. Kondisi sarana/sistem pelayanan dan rehabilitasi kesehatan
- G. Kondisi sarana/sistem pertanian, perikanan, perkebunan
- H. Kondisi sarana/sistem sanitasi
- I. Kondisi jaringan distribusi energi dan pangan

Dalam hal fisik lingkungan, nilai ekonomi merujuk pada sarana yang digunakan dalam kegiatan ekonomi. Namun, kerentanan dapat merujuk pada sistem yang ada di lingkungan tersebut. Pada penjelasan sebelumnya sudah disinggung bahwa suatu ekosistem dapat berperan sebagai unsur yang mengurangi kerentanan, namun juga dapat dianggap sebagai unsur yang menyandang kerentanan. Dalam hal nilai ekonomi, unsur prasarana dapat diperhitungkan tersendiri besarnya.

Dampak bencana terhadap sistem ekonomi dan prasarana sangat beragam besarnya. Keadaan masing-masing unsur dalam kelompok ini menentukan seberapa besar kerentanannya, dan keadaannya berbeda dari satu ke tempat lain, tergantung besaran kejadiannya. Kecepatan datangnya bencana sangat besar pengaruhnya terhadap unsur kerentanan ini, sama halnya terhadap unsur lain, sebagaimana disampaikan pada bagian sebelumnya.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

E. KONSEP BESARAN KEJADIAN EKSTREM

Guna memperoleh gambaran lebih baik secara kuantitatif, diperlukan pendekatan untuk menentukan bagaimana suatu kejadian dapat dinyatakan besarnya. Secara berurutan, sejak dari awal pemerian unsur dalam suatu kejadian, dilakukan penggambaran besaran masing-masing unsur dalam suatu kejadian secara tepat. Deskripsi dan formulasi yang disampaikan dengan pendekatan kuantifikasi sederhana agar tidak mempersulit masyarakat bila melakukan penghitungan sendiri.

1. Besaran bahaya: $M_{H,e1}$

Besaran bahaya adalah seberapa kuat ancaman suatu bahaya terhadap lingkungan yang menerimanya. Pada kejadian penggenangan, bahaya bagi manusia dan lingkungan bukan hanya kerusakan, namun juga kemungkinan terjadinya kecelakaan karena penggenangan. Pada kejadian empasan gelombang, terdapat unsur besaran energi yang meningkatkan ancaman kerusakan lingkungan dan keselamatan manusia yang diterjangnya. Pada kejadian tsunami, besaran bahaya memperhitungkan tinggi dan kecepatan massa limpasan gelombang pasang. Selain itu, muatan massa air yang bertambah karena terseretnya material sepanjang lintasannya semakin meningkatkan besaran bahaya dari kejadian ekstrem tersebut (Hantoro 2012).

Keterangan:

$$M_{H,e1} = E_{e1} \cdot r_{e1} \cdot (Ls) \dots\dots\dots 5)$$

$$r_{e1} = \text{perulangan kejadian, bila } E_{e1} = E_{e2} \text{ dan seterusnya}$$

$$Ls = \text{Kondisi Lingkungan kejadian}$$

Bila

$$Ls = [f_t + b_t + s_t + p_t]$$

$$E_{e1} = m_1 / L_{e1} \cdot h_{e1} \cdot v_{e1}^2$$

maka

$$M_{H,e1} = m_1 / L_{e1} \cdot h_{e1} \cdot v_{e1}^2 \cdot r_{e1} \cdot [f_t + b_t + s_t + p_t]$$

$$M_{H,e1} = \text{Besaran bahaya kejadian 1}$$

- E_{e1} = besaran kejadian 1
- r_{e1} = perulangan bagian pada kejadian 1
- v_{e1} = kecepatan datangnya kejadian 1
- L_{e1} = luasan kejadian
- h_{e1} = ketinggian muka laut
- m_{tot} = massa air laut

$$M_{H.tot} = m_{tot}/L_{e1} \cdot h_{e1} \cdot v_{e1}^2 \cdot r_e \cdot [f_t + b_t + s_t + p_t]$$

Pada rumusan ini, dapat dilihat bahwa unsur besaran kejadian (E_{e1}), perulangan kejadian (R_{e1}), kecepatan kedatangan kejadian (massa air) (v_{e1}), kondisi lingkungan (L_{e1}), ketinggian muka laut (h_{e1}), dan massa total air laut (m_{tot}) merupakan faktor yang harus diperhitungkan.

Jika perulangan melibatkan besaran yang berbeda maka besaran bahaya total adalah penjumlahan dari tiap kejadian:

$$M_{H.tot} = E_{e1} + E_{e2} + E_{e3} + E_{e4} + E_{e1} \dots \text{dan seterusnya}$$

Hasil perhitungan ini menjadi unsur penyusun peta besaran bahaya pada kawasan landai pesisir dan pulau kecil.

2. Besaran bencana: $M_{D.e1}$

Pada rumusan besaran bencana, faktor-faktor yang ada pada besaran bahaya ($M_{H.e1}$) dikalikan unsur besaran waktu (t_{e1}) atau berapa lama suatu bencana berlangsung, dari kedatangannya hingga masa penanggulangan dampak selesai dilakukan. Pada kejadian kenaikan muka laut perlahan, unsur waktu boleh jadi merupakan integral yang percepatan waktunya tidak semata linier. Setiap kejadian berlangsung, besaran bahaya dan bencana merupakan nilai kumulatif setiap perubahan positif dari waktu ke waktu. Unsur kerugian adalah jumlah manusia ($H_{M.e1}$) yang menjadi korban (meninggal atau luka-luka) serta kerusakan lingkungan ($D_{M.e1}$) (Hantoro 2012).

Keterangan:

$$M_{D,e1} = t_{e1} \cdot M_{H,e1} \cdot H_{Me1} \cdot D_{Me1} \dots\dots\dots 6)$$

atau

$$M_{D,tot} = t_e \cdot M_{H,tot} \cdot H_{Mtot} \cdot D_{Mtot}$$

$M_{D,e1}$ = besaran bencana

$M_{H,e1}$ = besaran bahaya

t_{e1} = lama berlangsung kejadian 1 hingga pemulihan

H_{Me1} = jumlah manusia yang tertimpa (meninggal/luka)

D_{Me1} = kerusakan tempat kejadian

$M_{D,tot}$ = kerusakan total tempat kejadian

bila terjadi perulangan kejadian dalam suatu saat

$$M_{H,tot} = m_{tot} / L_{e1} \cdot h_{e1} \cdot v_{e1}^2 \cdot r_e [f_t + b_t + s_t + p_t]$$

maka

$$M_{D,tot} = t_e \cdot m_{tot} / L_{e1} \cdot h_{e1} \cdot v_{e1}^2 \cdot r_e [f_t + b_t + s_t + p_t] \cdot \{H_{Mtot} \cdot D_{Mtot}\}$$

3. Besaran kerugian: $M_{L,e1}$

Perumusan besaran kerugian berkaitan dengan upaya rehabilitasi dan penguatan pasca-kejadian bencana. Unsur besaran bencana ($M_{D,e1}$) menjadi dasar rumusan dikalikan hasil penjumlahan unsur yang mengalami kerusakan dampak bencana (f+b+s+p, dst.) berdasarkan konstanta tertentu (k) (Hantoro 2012).

Keterangan:

$$M_{L,e1} = M_{D,e1} \cdot k(f_{A,B} + b_{A,B} + s_{A,B} + p_{A,B})_{e1} \dots\dots\dots 7)$$

Di mana:

$M_{L,e1}$ = Besaran kerugian

$M_{D,e1}$ = Besaran bencana 1

f_A . Kerusakan fisik lingkungan akibat erosi atau timbunan (pulau, pematang pantai, delta, dan lain-lain)

f_B . Kerusakan alur perairan karena pendangkalan atau hancur (paritan terumbu, alur estuari, dan lain-lain)

f_C . Kerusakan hutan pantai

f_D . Kerusakan fisik terumbu, mangrove, dan lain-lain

f_E . Kerusakan fisik air permukaan/tanah, sumber daya fisik

- f_F. Kerusakan fisik morfologi alam (tanggul, kanal, dan sebagainya)
- b_A. Kerusakan ekosistem pesisir pulau kecil (sedimentasi, erosi, arus, gelombang, dan lain-lain)
- b_B. Kerusakan ekosistem-biota perairan litoral, infratidal, intertidal dan supratidal (sesil, bentik dan pelagik)
- b_C. Kerusakan ekosistem/biota *lower* dan *upper* delta
- b_D. Kerusakan ekosistem/biota fauna unggas akuatik
- s_A. Kerusakan sistem kependudukan (korban)
- s_C. Kerusakan sistem pemerintahan (desa, kota, dan sebagainya)
- s_C. Kerusakan sistem kekerabatan, kesukuan, dan sebagainya
- s_C. Kerusakan struktur dan kondisi sosial
- s_D. Kerusakan sistem pendidikan dan perekonomian
- s_E. Kerusakan etos kerja, wirausaha, optimistik, dan lain-lain.
- p_A. Kerusakan sarana pemerintahan
- p_B. Kerusakan sarana sanitasi dan kesehatan
- p_C. Kerusakan kegiatan ekonomi (perdagangan, industri, wisata, jasa, dan lain-lain)
- p_D. Kerusakan sarana transportasi dan komunikasi
- b_E. Kerusakan sarana pertahanan keamanan
- b_F. Kerusakan sarana pertanian dan budi daya lain
- b_G. Kerusakan sarana pengelolaan SDA lain (tambang, dan lain-lain).

Rumusan tersebut berlaku umum, namun harus disesuaikan untuk beberapa hal yang menyangkut perbedaan lokasi yang berujung pada perbedaan unsur kerentanan. Bila terdapat perbedaan yang tidak dapat didekati, ditawarkan konstanta yang menjadi perata rumusan indeks kerentanan.

F. RISIKO DAN ANALISIS RISIKO

Suatu kejadian yang mengandung bahaya dapat mengakibatkan bencana bagi lingkungan dalam skala yang berbeda (Birkmann 2007). Dengan demikian, lingkungan yang terpapar bahaya menghadapi risiko sebagai dampak dari suatu kejadian. Risiko ini mengandung

beberapa unsur, bila dirumuskan, masing-masing unsur memiliki bagian-bagian yang harus diperhitungkan juga. Bollin dkk. (2003) merumuskan empat unsur risiko bencana, yaitu bahaya, keterbukaan, kerentanan, dan kapasitas atau ukuran. Dalam tulisan ini tidak dibahas lebih lanjut keterkaitan tiap unsur dan peran serta besarnya pada suatu kejadian. Unsur-unsur pada kejadian telah dijelaskan di bagian sebelumnya secara lebih rinci dan dibahas serta dirumuskan keterkaitannya. Sebagai bagian dari suatu kejadian, masing-masing unsur berbeda, tergantung jenis-waktu-tempat, isi (lingkungan), dan besaran kejadiannya. Berbagai unsur tersebut adalah bahaya, bencana, kerugian dan lingkungan berikut isinya. Unsur lingkungan dapat dikelompokkan menjadi unsur alamiah dan antropogenik yang dihasilkan dari dan untuk mendukung kegiatan serta mengandung unsur manusia. Berdasarkan perannya dalam suatu kejadian, bagian dari unsur lingkungan dapat memperbesar risiko bencana (karena menambah besaran kejadian dan bahaya) atau justru mengurangi risiko bencana. Berdasarkan respons lingkungan atas suatu kejadian, unsur atau bagian dari unsur (alamiah maupun antropogen) dapat dikelompokkan apakah cepat memulihkan dan menyesuaikan dengan tekanan bencana atau tidak. Berdasarkan unsur-unsur tersebut, risiko suatu lingkungan menghadapi suatu kejadian dapat dirumuskan dengan lebih rinci sehingga menghasilkan hitungan yang lebih teliti.

Dalam tulisan ini, kejadian ekstrem menjadi perhatian utama karena kejadian ekstrem merupakan penghasil bencana dengan segala risiko dan dampaknya. Walaupun digunakan untuk kejadian ekstrem yang menyebabkan muka laut tinggi, rumusan ini juga berlaku bagi kejadian ekstrem lain berapa pun besaran bahaya dan bencananya, bahkan termasuk kejadian non fisik, misalnya bahaya dari kejadian sosial. Risiko ini sebenarnya telah terlihat ketika analisis besaran bahaya dan besaran kerugian dilakukan. Risiko bencana sebenarnya telah dapat dianalisis ketika telah diketahui jenis, besaran bencana, keadaan kawasan atau tempat kejadian, durasi, dan perulangan kejadiannya. Risiko dapat diformulasikan sebagai berikut: (Hantoro 2012).

$$R = H \times V$$

$$V = A/CC$$

Maka $R = H \times A/CC$ 8)

Keterangan:

- R = risiko
- H = bahaya (*Hazard*)
- V = kerentanan (*Vulnerability*)
- A = jenis bencana
- CC = kemampuan menghadapi (*coping capacity*)

Bahaya pada rumusan ini telah memiliki rumusan besaran, yaitu $M_{H.e1}$ besaran di suatu kejadian ke-1 yang dinyatakan dengan rumusan seperti disampaikan sebelumnya:

$$M_{H.e1} = E_{e1} \cdot r_{e1} \cdot (Lt) \text{9)}$$

Keterangan:

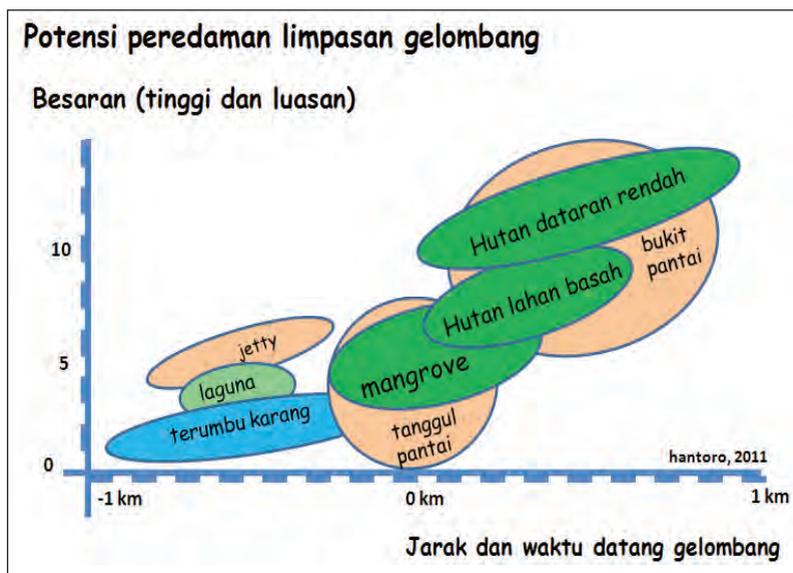
- $M_{H.e1}$ = Besaran bahaya kejadian 1
- E_{e1} = Besaran kejadian 1
- r_{e1} = Perulangan bagian pada kejadian 1
- v_{e1} = Kecepatan datangnya kejadian 1
- L_{e1} = Lingkungan/luasan kejadian
- h_{e1} = ketinggian muka laut
- m_{tot} = massa air laut

$$\text{maka } R = E_{e1} \cdot R_{e1} \cdot (Lt) \times A/CC$$

Sesungguhnya, perumusan analisis risiko harus memperhitungkan perubahan beberapa unsur seiring dengan perubahan waktu. Dengan demikian, rumusan ini memerlukan pendekatan regresi waktu pada setiap unsur. Terkait dengan luasan, model juga dikembangkan dengan regresi jangkauan luasan. Idealnya, penghitungan perspektif risiko dilakukan menurut periode lima tahunan pada unsur yang dinamis, seperti sosial, ekonomi, prasarana, dan bahkan pada prakiraan dinamika unsur lingkungan—yang boleh jadi berpotensi memper-

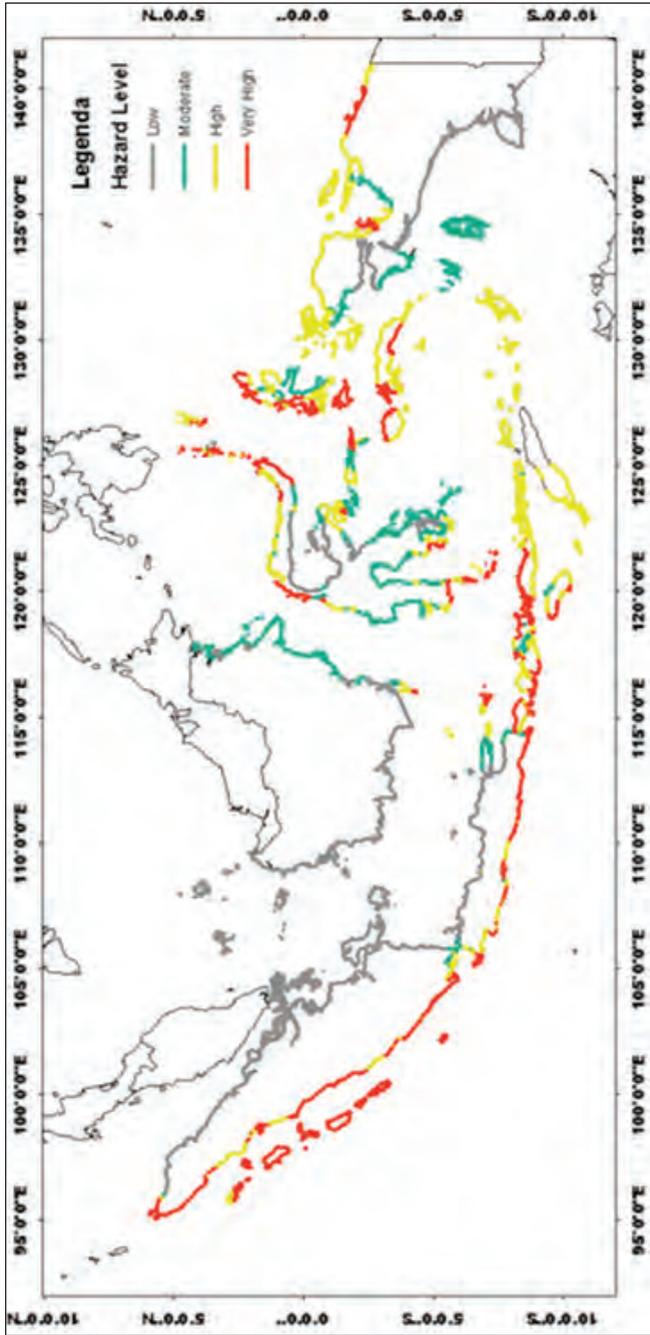
kuat besaran bencana. Dalam beberapa hal, *copping capacity* (CC), yaitu kemampuan menghadapi, menerima dan menanggulangi bencana, merupakan unsur yang dirumuskan sebagai ingkungan (L). Dalam unsur lingkungan terdapat masyarakat berikut sarana kehidupannya. Dari pendekatan tersebut, dapat digambarkan risiko suatu kawasan landai pesisir dan pulau kecil di Indonesia terhadap bencana kejadian ekstrem muka laut tinggi dari ancaman tsunami (tektonik) maupun gabungan dari seluruh pemicu bencana lainnya (Gambar 24 dan 25).

Guna menghitung besaran yang cepat perubahannya, seperti nilai suatu ruang dengan isinya ketika terhenti dinamikanya, diperlukan pemutakhiran data bila dikehendaki hasil perhitungan yang lebih akurat.



Sumber: Hantoro dan Djuwansah (2014)

Gambar 24. Diagram Potensi Ekosistem Alamiah dan Buatan pada Peredaman Gelombang Tsunami



Sumber: Hantoro dkk. (2014)

Gambar 25. Peta Risiko Bahaya Gelombang Tsunami Pesisir di Indonesia

Buku ini tidak diperjualbelikan.

G. CONTOH KEJADIAN EKSTREM DAN PENERAPAN RUMUSAN

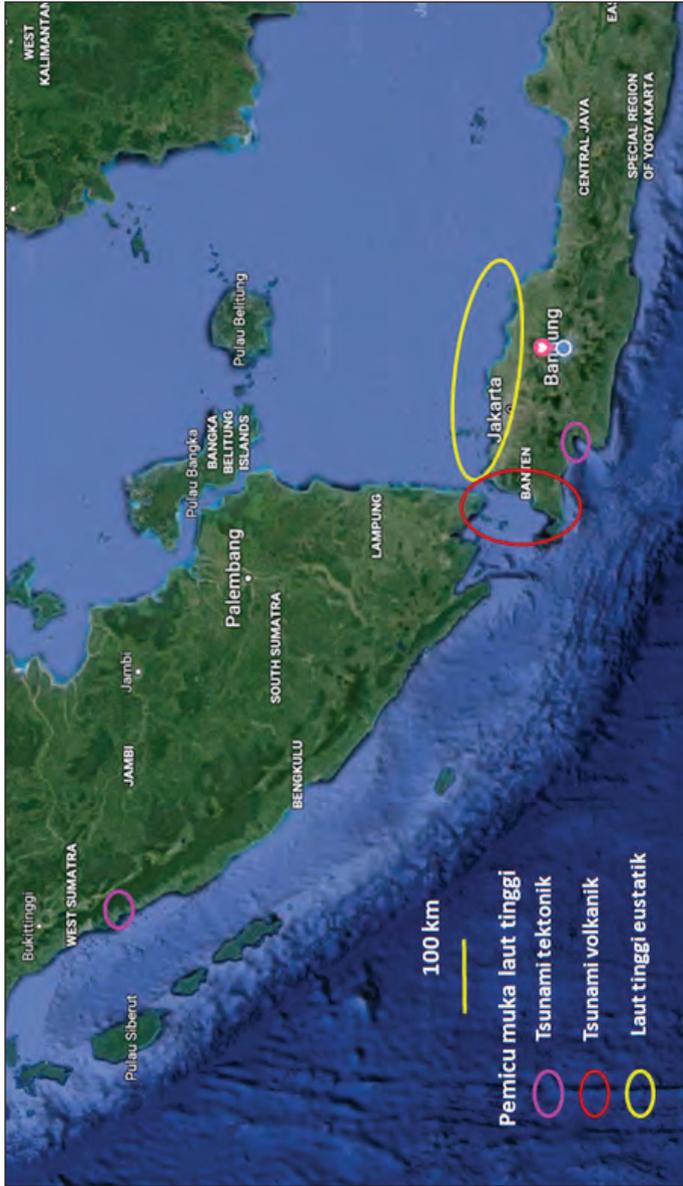
Beberapa contoh disampaikan sebagai ilustrasi pada tiap rumusan dengan mengambil model simulasi peristiwa yang telah dan diperkirakan dapat terjadi lagi di kawasan tertentu. Peristiwa yang digunakan sebagai ilustrasi adalah yang terkait dengan gejala kenaikan muka laut yang berlangsung perlahan (*slow onset*) dan mendadak (*rapid onset*).

1. Ketinggian muka laut dan jangkauan genangan

Sebagai contoh penerapan beberapa formulasi yang disampaikan pada bagian sebelumnya, dipilih beberapa tempat yang mewakili dua kejadian muka laut tinggi, yaitu yang datang secara mendadak (*rapid onset*) dan yang berlangsung perlahan (*slow onset*) (Gambar 26). Salah satu lokasi pilihan adalah Selat Sunda sisi timur wilayah Banten dan pesisir utara Jawa bagian barat yang mencakup wilayah Provinsi Banten dan Provinsi Jawa Barat (Gambar 27).

Sebagai contoh kejadian perlahan, untuk mewakili respons kenaikan muka laut, dipilih pesisir utara Jawa bagian barat yang memiliki lereng sangat landai dan sebagian besarnya lahan basah yang mengalami perubahan menjadi kawasan terbangun. Berdasarkan kriteria fisiko-geologi pesisir, luasan kawasan untuk Jawa Bagian barat (Banten dan Jawa Barat) berbeda dari satu ke tempat lain, dinyatakan dari berapa jauh jaraknya kawasan ini dari garis pantai (Gambar 28 dan 29).

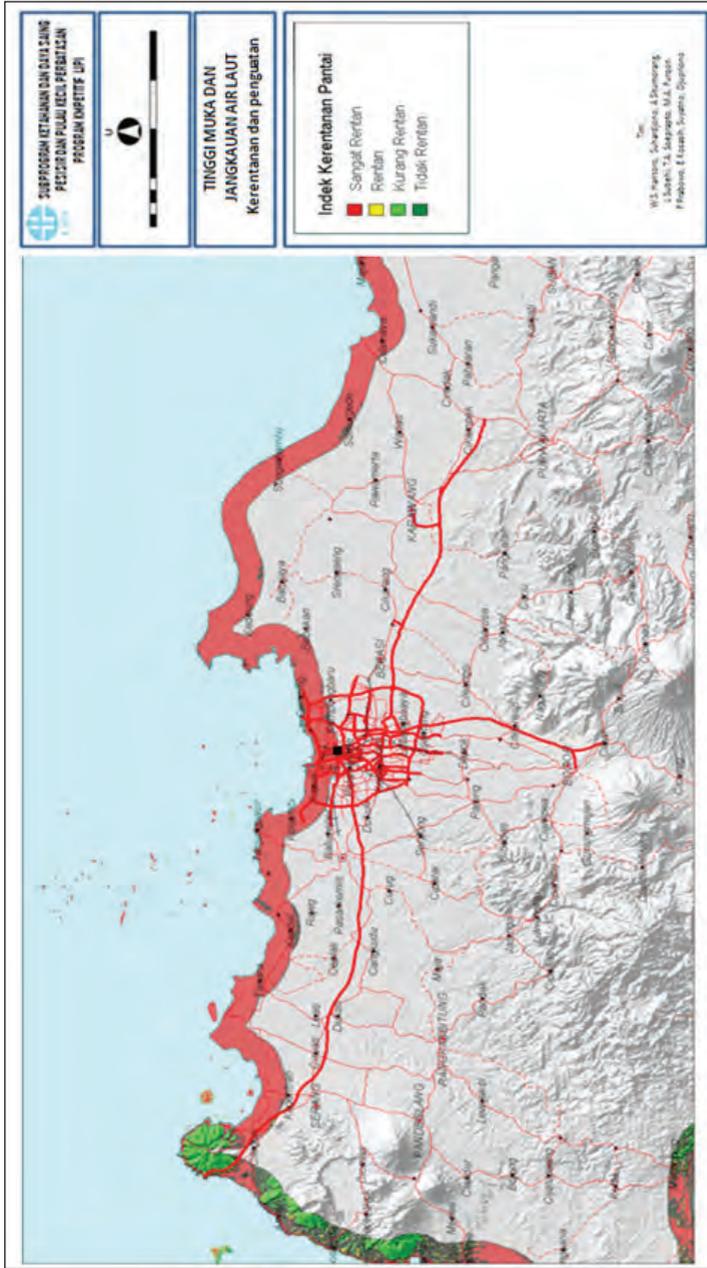
Contoh kejadian yang mendadak adalah tsunami yang dipicu oleh dua peristiwa berbeda, yaitu oleh letusan gunung api (model Krakatau tahun 1883) di kawasan Selat Sunda (gambar 27) dan tsunami tektonik dengan model kejadian di kawasan yang menghadap Samudra Hindia (Pelabuhan Ratu) (Gambar 27). Pesisir utara Jawa bagian barat merupakan kawasan yang menyandang kerentanan tinggi terhadap kenaikan muka laut dari pemicu bahaya apa pun (misalnya gelombang tinggi tsunami, badai, ataupun tinggi muka laut eustatik) (Gambar 28). Pesisir ini menyandang ancaman tinggi muka laut di mana terdapat berbagai unsur yang menyumbang ketinggian



Sumber: Google maps (2017)

Gambar 27. Peta Citra Satelit Gambaran Rupa Dasar Laut Bagian Barat Pulau Jawa dan Lokasi untuk Model Muka Laut Tinggi

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Hantero dkk. (2014)

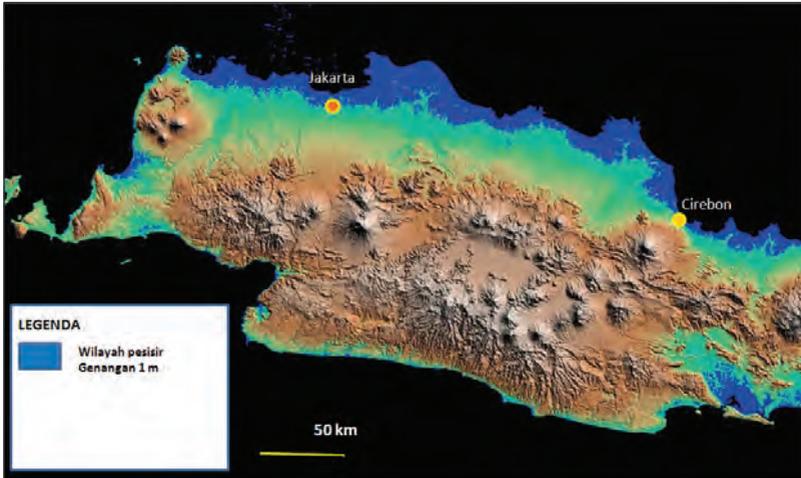
Gambar 28. Peta Kerentanan Pesisir Utara Jawa Barat

Buku ini tidak diperjualbelikan.

muka laut total pada waktu tertentu. Unsur tersebut adalah unsur atmosferis, cuaca dan iklim, kondisi laut, geologi, dan unsur antropogen (manusia). Peningkatan ketinggian muka laut dapat berlangsung perlahan, namun juga bisa berlangsung sangat cepat dan mendadak tanpa memperlihatkan gejala awalnya. Menurut formulasi nomor 1 (F1), permukaan paling tinggi yang dicapai suatu pantai adalah hasil penjumlahan semua nilai maksimal unsur kejadiannya. Kawasan yang kenaikan muka lautnya perlahan akibat pemanasan global dan perubahan iklim global, besaran angkanya jauh lebih kecil dibandingkan kawasan dengan kenaikan muka laut sesaat namun berubah dengan cepat akibat gelombang tinggi yang dipicu cuaca, gempa, atau letusan gunung api bawah laut.

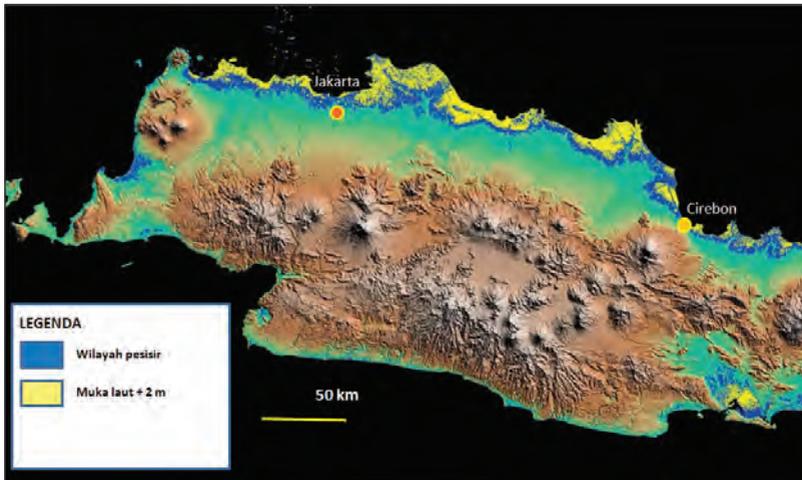
Kenaikan muka laut karena perubahan keadaan atmosfer global dipicu oleh pemanasan global rumah kaca (eustatik). Skenario IPCC paling buruk memberi angka kecepatan kenaikan muka laut 10 mm/tahun. Dengan demikian, pesisir Jawa bagian barat pada 200 tahun dari sekarang akan terjangkau oleh kenaikan muka laut setinggi 2 m. Menurut skenario menengah IPCC, kenaikan ini terjadi pada angka setengahnya atau 1 m untuk waktu 200 tahun mendatang.

Bila dijumlahkan dengan kecenderungan penurunan permukaan daratan yang sedang dialami beberapa daerah, misalnya Jakarta, Cirebon, Tegal, Pekalongan, Semarang, dan Demak, kecepatan kenaikan relatif muka laut akan semakin besar. Selain itu, kedalaman dan luasan penggenangan juga akan semakin meningkat. Penggenangan tidak selalu merata di seluruh pesisir, tergantung kejadian apa yang sedang berlangsung. Salah satu daerah, yakni Pekalongan, terpetakan sejak tahun 2008 hingga 2013, hanya beberapa bagian dari kota tersebut yang mengalami penurunan dengan kecepatan hingga mendekati 7 cm/tahun (Chaussard dkk. 2013; Hantoro dkk. 2017). Penggenangan oleh air laut yang menerobos masuk mengisi beberapa tempat di Pekalongan terjadi di daerah yang telah mengalami penurunan permukaan tanah. Kawasan yang tergenang adalah kawasan yang selama ini mengambil air tanah dalam jumlah tidak terkendali dari akuifer tanah dalam.



Sumber: Hantoro dkk. (2014)

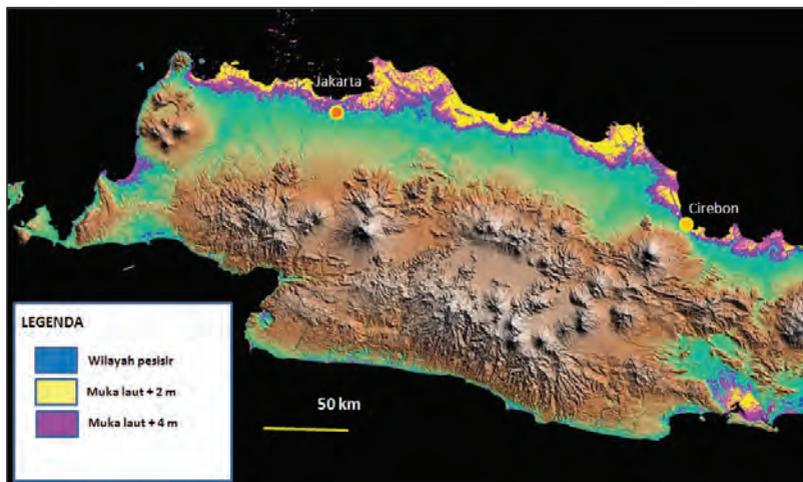
Gambar 29. Peta Jangkauan Rendaman Pantai Utara Jawa Barat Akibat Kenaikan Muka Laut 1 m Laut (Eustatik)



Sumber: Hantoro dkk. (2014)

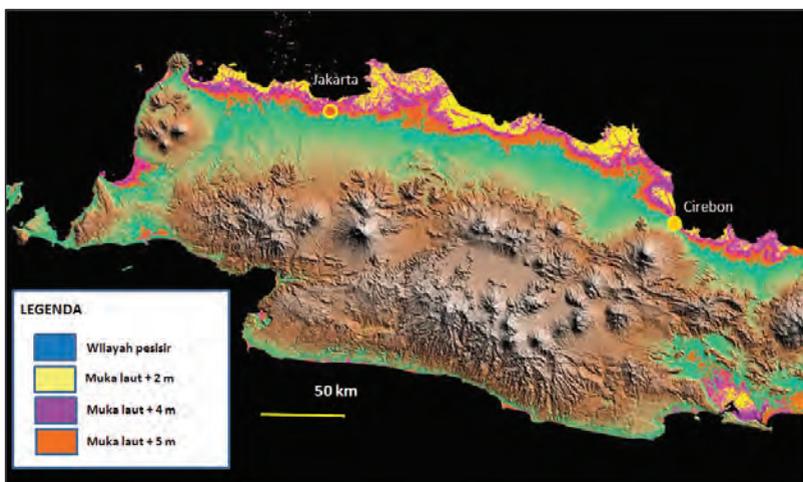
Gambar 30. Peta Jangkauan Rendaman Pantai Utara Jawa Barat Akibat Kenaikan Muka Laut (Eustatik) 2 m

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Hantoro dkk. (2014)

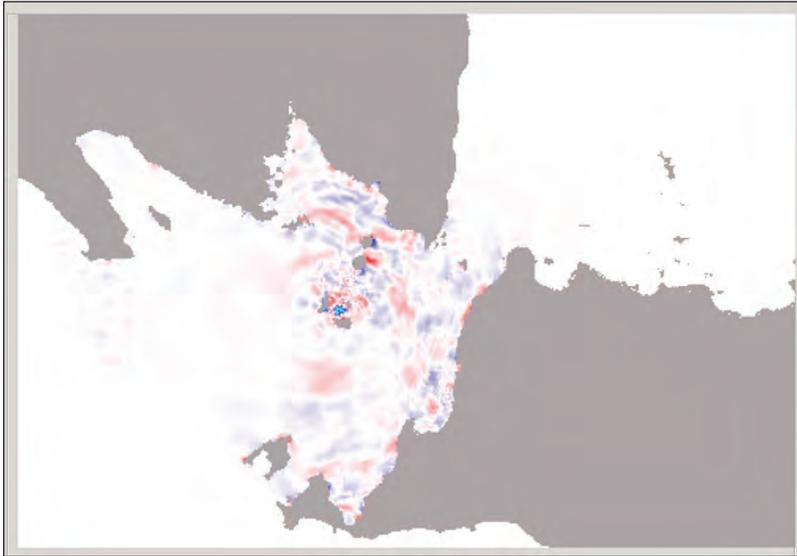
Gambar 31. Peta Jangkauan Rendaman Pantai Utara Jawa Barat Akibat Kenaikan Muka Laut (Eustatik) 2 dan 4 m



Sumber: Hantoro dkk. (2014)

Gambar 32. Peta Jangkauan Rendaman Pantai Utara Jawa Barat Akibat Kenaikan Muka Laut (Eustatik) 2, 4 dan 5 m

Buku ini tidak diperjualbelikan.

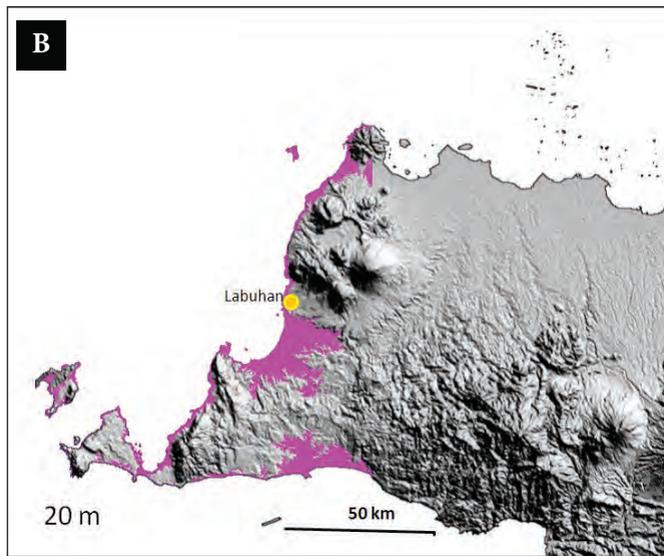
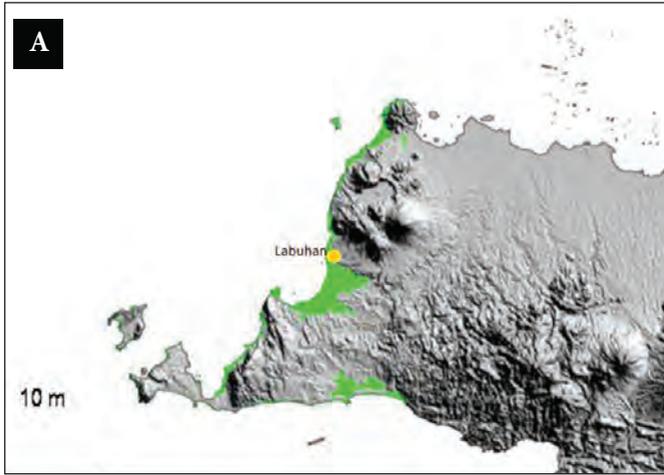


Sumber: Hantoro dkk. (2006)

Gambar 33. Peta (Animasi) Model Penjalaran Gelombang Tsunami Dampak Letusan Krakatau 1883 (menit ke-40)

Jangkauan penenggelaman air laut yang masuk ke pesisir secara perlahan di Jawa bagian barat, menurut skenario IPCC untuk kenaikan 2, 4, dan 5 m, air laut sudah jauh masuk ke arah darat (Gambar 29 sampai dengan Gambar 32). Tanpa adanya upaya penanggulangan, sebagian kota besar di kawasan pesisir utara Jawa Barat akan terhapus dari peta. Jangkauan penggenangan oleh muka laut tinggi eustatik dapat dihitung dengan memakai formulasi 2 (F2), namun tanpa memperhitungkan aliran massa air yang melewati tahanan beberapa unsur lingkungan, seperti tanaman, bangunan, dan lain-lain (f_g , f_o , f_p , dan f_b). Perhitungan tersebut diterapkan pada peristiwa saat aliran massa yang mempunyai kecepatan dan massa menjadi bertambah besar karena benda terbawa aliran yang menerobos masuk pesisir seperti yang terjadi saat gelombang (tsunami) masuk ke darat. Runtuhan kaldera dan tekanan panas ledakan berurutan beberapa kali pada letusan Krakatau tahun 1883, lalu memicu gelombang yang menjalar ke arah pantai sekeliling Selat Sunda (Gambar 33).

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Hantoro dkk. (2006)

Gambar 34 Peta Jangkauan Rendaman Pantai (A) 15 m dan (B) 20 m di Selat Sunda Kawasan Banten Akibat Tsunami Letusan Krakatau 1883

Puncak ledakan saat runtuhnya kaldera memicu gelombang dengan ketinggian 15 hingga 20 m saat mencapai pantai dan masuk jauh ke darat di beberapa tempat (wilayah Kecamatan Panimbang-Labuhan) (Simkin dan Fiske 1983) (Gambar 34). Gelombang yang menjalar ini ketika tiba di perairan dangkal akan memecah dan menghasilkan aliran massa air dengan kecepatan dan ketinggian. Aliran air memiliki momentum sangat besar menerjang dan mengalir deras masuk ke darat. Pada keadaan ini, formulasi F2 dapat diterapkan.

Berdasarkan formulasi yang memperhitungkan hambatan berupa tanaman di pantai, jajaran rumah, dan hambatan geser di lahan kebun atau sawah, jangkauan penjalaran dapat dihitung. Hasil yang diperoleh dari beberapa tempat memperlihatkan nilai berbeda di antara perhitungan untuk beberapa tempat di pesisir di sekeliling Selat Sunda.

Pengamatan dampak tsunami yang pernah ada di beberapa tempat menghasilkan gambaran adanya perbedaan jangkauan limpasan dan genangan di luar perbedaan ketinggian gelombang itu sendiri. Pada kejadian genangan muka laut tinggi yang terjadi perlahan, jangkauannya berubah seiring berubahnya unsur pemicu yang menyebabkan muka laut bergerak naik dan turun, yakni pasang surut dan gerakan penurunan muka tanah. Turunnya permukaan tanah diakibatkan oleh eksploitasi berlebih air tanah dalam dan proses geologi (sesar). Pada genangan akibat terjangan gelombang yang masuk ke darat, air dapat kembali surut ke laut atau tertahan membentuk genangan dalam waktu lama (Aceh dan Biak). Genangan ini mudah dikenali karena adanya kerusakan lahan, misalnya tanggul pohon mati karena tergenang air asin. Pada peta, luasan genangan dapat dihitung, demikian halnya dengan kedalaman genangannya. Luasan dan kedalaman ini menjadi salah unsur yang diperlukan untuk menghitung kerugian.

2. Kejadian pemicu bencana

Pemicu bencana dapat digambarkan besarnya dalam bentuk statis. Pada kejadian muka laut tinggi yang datang perlahan, pemicu bencana digambarkan dalam bentuk luasan dan kedalaman. Contoh genangan pada Gambar 29 sampai dengan Gambar 32 memberi gambaran

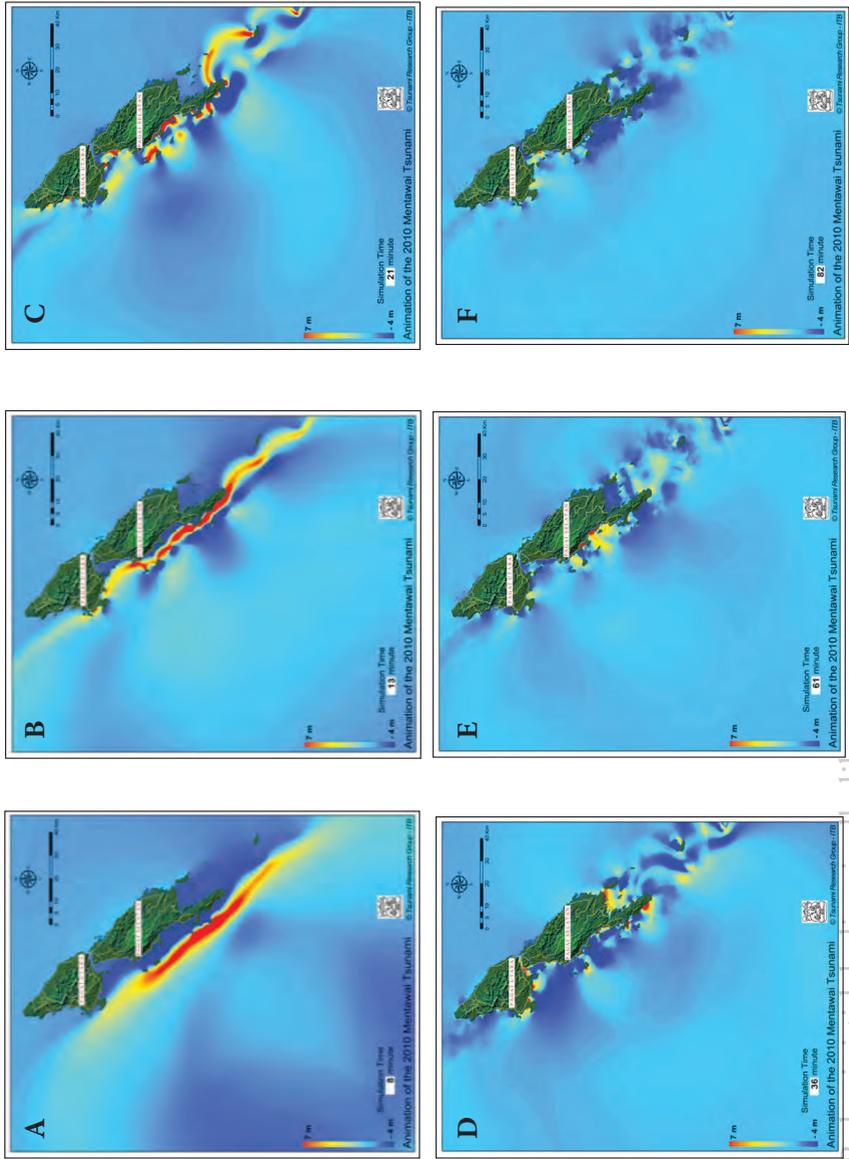
luasan genangan sebagai pemicu dan besaran bencana yang berdampak pada kerusakan lahan dan sarana yang ada. Dalam kejadian muka laut tinggi yang mendadak—seperti pada gelombang dan limpasannya ke darat—unsur kecepatan, volume, dan berat massa air yang menerjang ke darat diperlukan untuk menghitung energi kinetiknya. Penjalaran dan ketinggian gelombang dianggap sebagai pemicu dan besaran bencana. Unsur massa, volume, dan kecepatan air laut yang berubah dari gelombang menjadi bergerak sebagai limpasan yang menerjang pantai mempunyai tenaga kinetik yang dapat dihitung dengan formulasi F3.

$$E_{\text{tot}} = M_{\text{tot}} \cdot (\mathbf{v}(\mathbf{v}_{\text{tot}}))^2 \text{ton.m} \dots \dots \dots (F3)$$

Perpindahan cepat massa air dipicu gerakan dislokasi dasar perairan akibat gempa. Gelombang-gelombang ini memiliki panjang gelombang yang besar dan menjaral dengan kecepatan tinggi ke segala arah, kemudian mencapai pantai dengan energi yang besar pula.

Pada gambar simulasi menit kedelapan (Gambar 35) terlihat gelombang dengan ketinggian 7 m telah mencapai pulau-pulau kecil di lepas barat kepulauan Mentawai (Pagai Utara dan Selatan). Gelombang menjaral dengan sumbu punggung mencapai panjang 60 km. Gelombang terberai tertahan ketika mencapai gugusan pulau kecil, sebagian menerus sebagai gelombang yang kemudian naik menjaral di daratan pulau-pulau Pagai Selatan (Gambar 35). Dengan impanan berketinggian 7 m, volume massa air $7 \times 500/2 \times 100 \text{ m}^3$, dan kecepatan sebesar 100 km/jam, dapat dihitung berapa besar energi dari massa air yang masuk pada suatu ruas tertentu dari pantai. Pada menit ke-21 (Gambar 35), sebagian air yang menerjang masuk ke darat berangsur berhenti ketika momentum air surut dan kembali mengalir turun ke laut. Mengalir kembalinya air ke laut juga memiliki momentum yang menimbulkan kerusakan selain dari kerusakan yang ditimbulkan oleh terjangan massa air yang menjaral sebelumnya. Besarnya kecepatan aliran tergantung pada hambatan dan sudut lereng pantai.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Latief(2014) *tidak diperjualbelikan.*

Gambar 35. Simulasi Penjalaran Gelombang Tsunami di Barat Sumatra secara berturut-turut

Gelombang berikutnya dengan ketinggian hingga 5,5 m bertemu dan mengurangi tenaga massa air yang kembali ke laut (Gambar 35). Gelombang di bagian selatan Pulau Pagai Selatan pada menit ke-36 dapat melanjutkan penjarannya dan mempertahankan momennya, namun volume dan kecepatannya berkurang (Gambar 35). Susulan gelombang dengan ketinggian 5 m menerjang Pulau Pagai bagian utara, sementara pantai Pagai Selatan menerima limpasan gelombang dengan ketinggian 5 m, masing-masing dengan kecepatan dan energi yang lebih rendah. Sesungguhnya penjaran gelombang masih berlanjut hingga mencapai pantai pulau Sumatra.

3. Kerentanan dan indeks kerentanan

Kerentanan merupakan keadaan yang dapat diperkirakan dan diperhitungkan bila informasi besaran bahaya dan nilai lingkungan yang terancam diketahui. Pendekatan untuk menyatakan besaran bahaya telah diupayakan secara bertingkat pada bagian sebelumnya, sementara upaya mengetahui nilai kerentanan lingkungan dilakukan dengan merumuskannya dalam bentuk indeks kerentanan. Selanjutnya, berdasarkan dua hal tersebut, dirumuskan cara menghitung risiko, menghitung besar kerugian bila terjadi bencana, dan menghitung besar biaya yang diperlukan untuk rehabilitasi. Berdasarkan angka-angka tersebut, dapat diperkirakan besaran upaya peningkatan ketahanan suatu lingkungan dalam menghadapi bencana.

Indeks kerentanan sebagaimana disampaikan pada rumusan F4a hingga F4d dimaksudkan untuk menggambarkan kerentanan berdasarkan semua unsur yang terlibat dalam dinamika kawasan pesisir. Contohnya, untuk pembahasan bahaya dan kerentanan dapat diambil dari suatu kejadian yang terkait dengan bencana mendadak dan yang berangsur kedatangannya. Bila kejadian berangsur, genangan menjadi unsur utama pendekatan formulasinya. Pada kejadian mendadak, misalnya tsunami, selain genangan, ada unsur bahaya dari proses fisik benturan massa air dengan benda yang dilandanya. Genangan pada kejadian ini dapat berangsur menghilang, namun juga dapat bertahan sebagai genangan, seperti yang terjadi di beberapa tempat pascagempa (Aceh, Biak, dan sebagainya) (Gambar 19).

Dalam keadaan demikian, kerentanan kawasan ini dinilai berdasarkan perhitungan berapa besar pengaruh genangan air asin terhadap lingkungannya. Keadaan rentan mengacu pada unsur fisik, biologi, sosial, hingga ekonomi kawasan tergenang. Pada kawasan hunian, masyarakat dan kegiatannya menyandang kerentanan rawan penyakit dan terganggu kegiatan usaha serta kenyamanan kehidupan sehari-hari. Keadaan ini dapat disandang oleh semua tempat yang mengalami genangan akibat tinggalan limpasan tsunami (Aceh dan Biak) maupun akibat kenaikan muka laut eustatik atau turunnya permukaan tanah (pantai timur Sumatra dan pantai utara Jawa, dari Serang hingga Pekalongan, Semarang, dan Demak).

4. Besaran bahaya, bencana dan kerugian

Unsur bahaya digambarkan dalam angka untuk menggambarkan besaran bencana (F_5) yang kemudian memberi manfaat dalam menghitung besaran kerugian. Besaran kerugian ini nantinya membantu menafsirkan berapa biaya yang diperlukan untuk menyiapkan tanggap darurat, rehabilitasi, dan adaptasi.

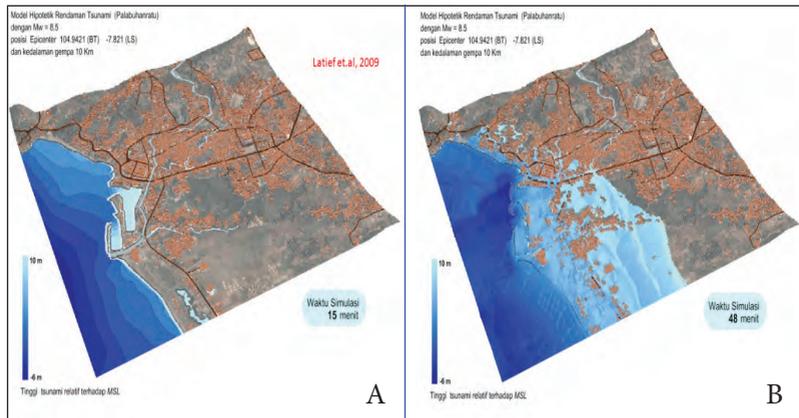
Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, besaran bahaya menggambarkan ancamannya terhadap manusia dan lingkungan yang menerimanya. Dalam penggenangan akibat tinggi muka laut, bahaya bagi manusia dan lingkungan adalah kerusakan dan kerugian yang ditimbulkannya. Kecelakaan (tenggelam, tersengat arus listrik, dan lain-lain) dan kerusakan (korosi, sanitasi buruk, pencemaran, dan lain-lain) dampak genangan merupakan akibat dari bahaya yang disandanginya.

Pada kejadian empasan gelombang kuat (tsunami), rumusan mengandung unsur besaran energi yang meningkatkan ancaman kerusakan fisik lingkungan dan keselamatan manusia yang diterjang. Dua hal terkait muka laut tinggi tersebut dapat dirumuskan untuk mengetahui besarnya (F_{5a}). Pada rumusan, diperhitungkan faktor besaran kejadian (E), Luasan kejadian (L), tinggi muka laut atau genangan (h), dan massa air (m) bila menyangkut sumber ancaman yang bergerak (gelombang). Pada kejadian yang berlangsung dalam

beberapa ulangan, faktor jumlah kejadian juga diperhitungkan sebagai bahaya, seperti halnya pada tsunami letusan Krakatau.

Rumusan besaran bencana mengandung unsur besaran bahaya yang memicunya. Pada bencana yang kelangsungannya menerus, seperti pada genangan rob, besaran bencana bertambah seiring peningkatan perlahan pemicunya. Pada bencana yang berlangsung mendadak dan cepat, seperti tsunami, bencana merupakan perkalian dari besaran bahaya dengan besaran kejadian serta besaran kerusakan dan korban. Besaran kejadian ini merupakan beda antara keadaan laut sebelum kejadian dan keadaan saat berlangsungnya perubahan mendadak muka laut. Rumusan mengandung unsur volume dan kecepatan massa air yang datang melanda, yang kemudian surut kembali ke laut, sebagaimana contoh pada model simulasi tsunami di selatan Jawa yang melanda Pelabuhan Ratu (Gambar 36).

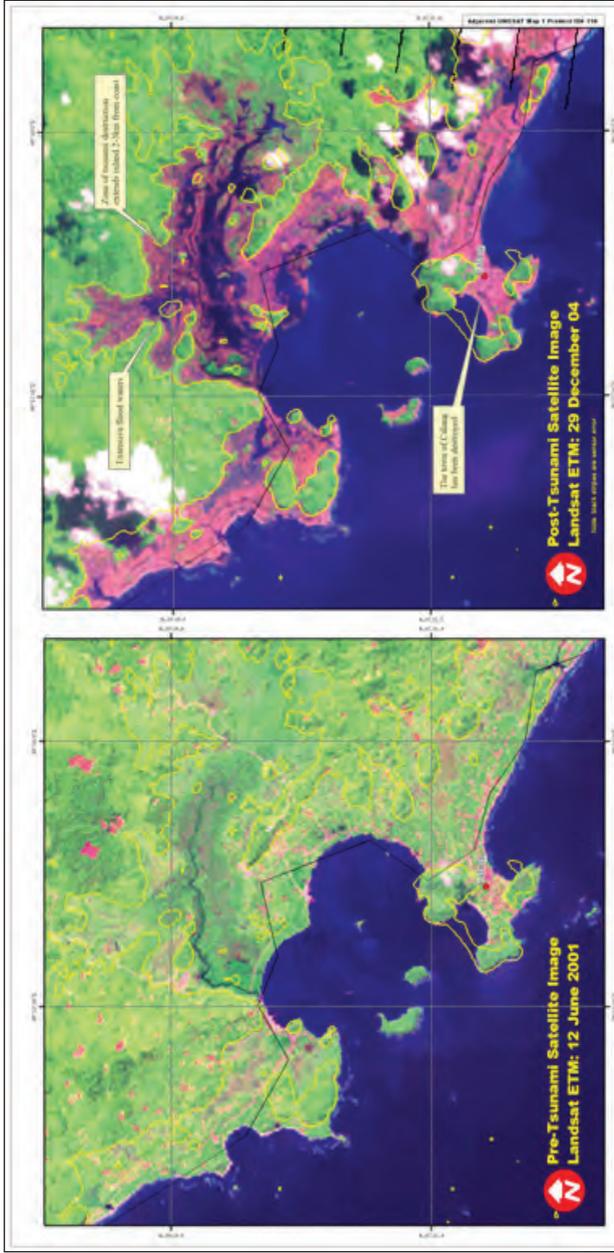
Pada kenaikan ekstrem gelombang tinggi seperti tsunami, kerugian diperhitungkan dari kerusakan fisik akibat hantaman limpasan gelombang dan kerusakan berikutnya yang diakibatkan oleh penggenangan air laut (Gambar 37). Massa air yang menerjang naik ke darat dapat tertinggal sebagai genangan yang bertahan lama atau surut kembali ke laut.



Sumber: Latief (2014)

Ket.: (A) Waktu simulasi 15 menit, (B) Waktu simulasi 48 menit

Gambar 36. Model Simulasi Gelombang yang Melanda Pelabuhan Ratu dari Tsunami di Selatan Jawa



Sumber: modifikasi UNOSAT (2005)

Gambar 37. Peta Citra Landsat ETM Sebelum dan Setelah Tsunami Aceh 2004 di Kawasan Sekitar Calang

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Karena juga mencakup unsur ketinggian genangan, besaran bencana juga bertingkat nilainya. Besaran bencana terjangan gelombang tsunami yang menjangkau ke darat bertingkat, tergantung unsur tutupan lahan, morfologi, jarak dari pantai, ketinggian air, massa jenis dan kecepatan limpasan, dan lama kejadian. Sebagai contoh, bencana tsunami yang menimpa Lhoknga menimbulkan kerusakan berbeda di berbagai bagian daerahnya (Gambar 37 dan 38).

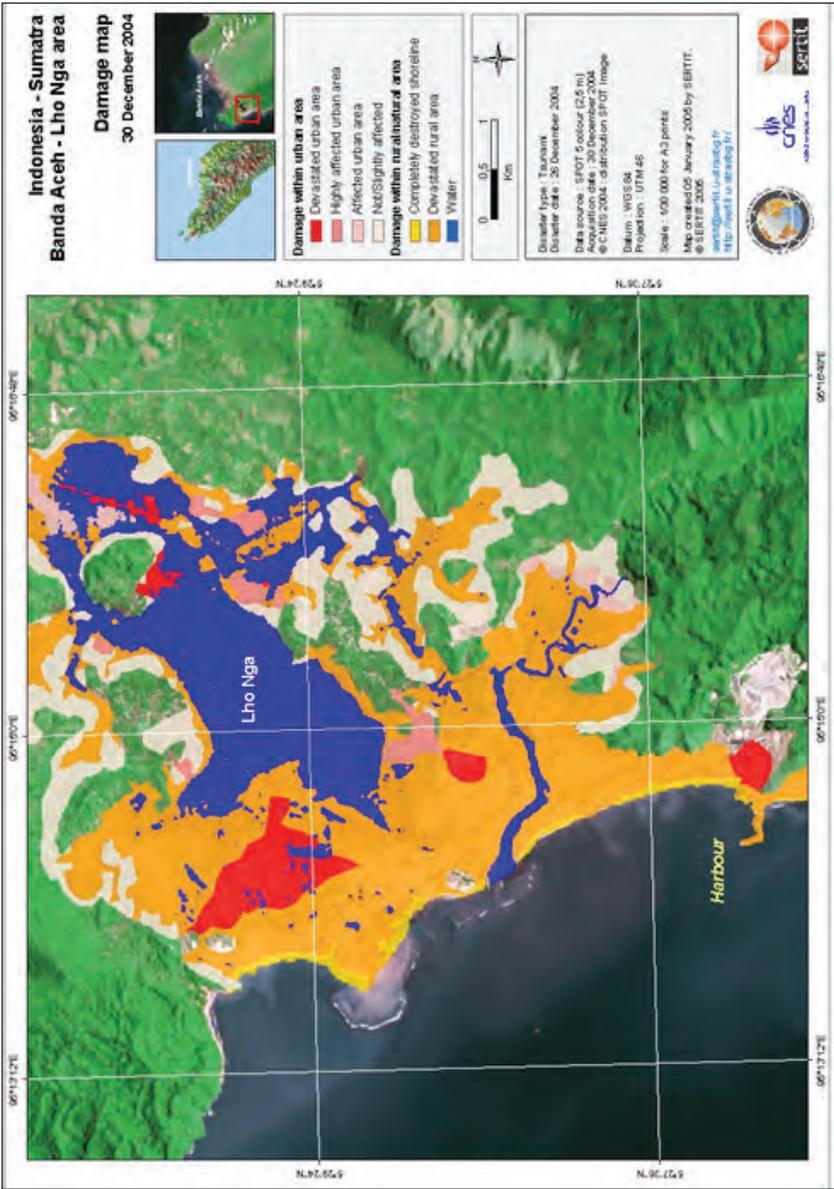
Besaran kerugian dirumuskan sebagai besaran bencana dikalikan penjumlahan unsur yang terdampak.

Pada bencana genangan kenaikan muka laut sebagai dampak pemanasan global yang terjadi perlahan dengan kecepatan 1 cm/tahun (skenario pesimistis IPCC), peningkatan kerugian dihitung berdasarkan peningkatan kedalaman dan perluasan penggenangan menurut waktu. Penggenangan juga bisa diakibatkan oleh turunnya permukaan tanah, sebagaimana dipetakan di beberapa tempat di pesisir timur Sumatra dan utara Jawa (Jakarta, Pekalongan, dan Semarang) (Gambar 39). Penurunan permukaan tanah di beberapa tempat, misalnya Pekalongan (Gambar 39), dianggap sebagai risiko eksploitasi berlebihan air tanah dalam di samping akibat dari kejadian alamiah geologi lainnya.

Dalam keadaan ini, terjadi percepatan kenaikan relatif muka laut yang dihitung dari penjumlahan dua unsur penyebab perubahan relatif muka laut tersebut.

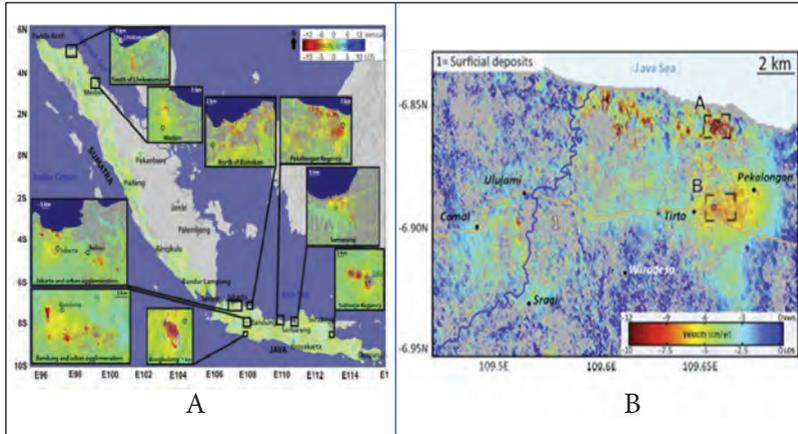
Pantai landai di jalur cekungan aktif bagian dalam busur kepulauan yang memiliki timbunan tebal sedimen masih mengalami proses penurunan karena pemadatan sedimen dan sesar normal. Sebagian pantai di jalur cekungan aktif timur Sumatra dan utara Jawa terpapar gelombang maksimum yang mencapai ketinggian 3 m (Gambar 39 dan 40).

Besaran kerugian yang dihadapi kawasan berisiko bencana tersebut dihitung guna memperoleh gambaran berapa besaran usaha yang diperlukan untuk rehabilitasi dan penguatan pascabencana (F7). Pada besaran ini, terkandung semua unsur yang telah diperhitungkan pada besaran kerentanan yang menyangkut fisik, biologi, sosial, prasarana,



Sumber: Modifikasi UNOSAT (2005)

Gambar 38. Peta Kerusakan Dampak Tsunami Tahun 2004 di Kawasan sekitar Lhoknga



Sumber: Chaussard dkk (2013)

Gambar 39 Peta Kecepatan Penurunan di (A) Beberapa Pesisir Pantai Timur Sumatra dan Utara Jawa (kiri) dan (B) Pekalongan (kanan)

dan lain-lain sebagaimana dirumuskan dalam F2. Data tersebut, bersama dengan model prakiraan ancaman bahaya, menjadi dasar penyusunan rencana adaptasi dalam bentuk pembangunan fisik. Tujuannya adalah meningkatkan pemahaman dan kepedulian masyarakat dalam menghadapi bencana dan bertindak ketika bencana terjadi.

5. Risiko dan kemampuan menghadapi bahaya

Suatu kawasan yang menyandang kerentanan terhadap ancaman bahaya menghadapi risiko bencana. Pemahaman risiko diperlukan guna mengupayakan antisipasi bencana. Berdasarkan keterkaitan tersebut, risiko dapat dirumuskan pada F8, yaitu:

$R = H \times V$ di mana risiko merupakan perkalian antara bahaya dan kerentanan.

Ketika kerentanan adalah bencana dibanding peluang atau kemampuannya menghadapi bahaya, rumusnya menjadi:

$$R = H \times A/CC.....(F8):$$

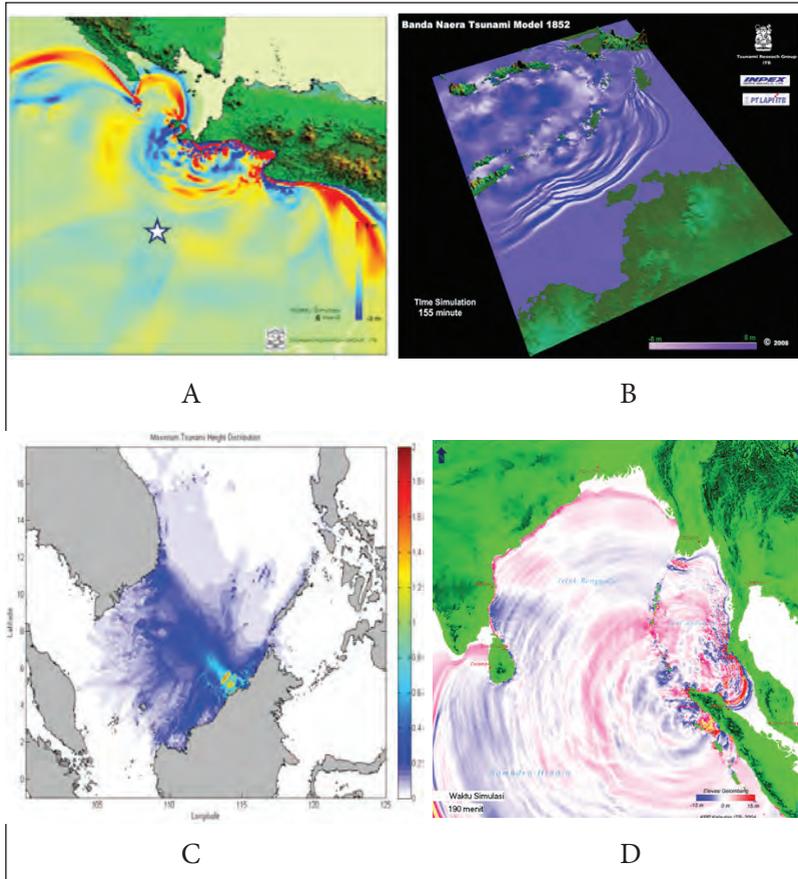
Risiko juga mengandung unsur ruang dan waktu. Dalam hal ruang, beberapa kawasan melibatkan ruang berisiko yang sangat luas. Sebagai contoh, model gempa pembangkit tsunami tektonik di suatu tempat yang luas penjarannya dan dengan risiko kerusakan sangat besar terhadap gugusan pulau dan pesisir di kawasan sekitarnya.

Pesisir landai barat Sumatra dan selatan Jawa menyandang risiko bencana dengan kerugian besar bila memperhitungkan jangkauan dan besaran gelombang tsunami (Gambar 24). Tsunami Mentawai tahun 1797 menjangkau pesisir barat Sumatra dari Natal hingga Bengkulu. Tsunami tahun 2006 yang terjadi di selatan Jawa merusak kawasan selatan Jawa Barat dari Cipatujah hingga Cilacap. Ruang luas lain yang berisiko bencana adalah di kawasan sekeliling Selat Sunda oleh tsunami vulkanik letusan Krakatau maupun tsunami yang dipicu gempa tektonik (Gambar 31, 40). Ruang yang lebih luas oleh ancaman bahaya tsunami tektonik adalah di perairan Laut Banda yang gelombangnya dapat menjangkau pantai utara Australia (Gambar 16 dan 40).

Model gempa di Serawak memicu tsunami yang menjalar ke segala arah di Laut China Selatan (Gambar 40). Gempa Aceh merusak hampir seluruh pesisir barat Aceh, bahkan menjangkau pantai timur India dan Afrika (Gambar 40).

Beberapa seri gempa di sekeliling Pasifik besar kemungkinannya diikuti tsunami yang dapat menjangkau sisi lain dari samudra luas ini. Luasan jangkauan ruang yang berisiko bencana tergantung pada besaran gempa dan jenis dislokasi yang dihasilkan sebagai pemicunya.

Unsur ruang dalam memperhitungkan risiko ini juga tergantung aspek kerentanannya yang terdiri atas empat unsur, yaitu fisiko geologi, fisiko-biologi, sosial demografi, dan ekonomi prasarana. Dalam unsur ruang, masih ada aspek kemampuan menghadapi bahaya berupa ketersediaan teknologi yang terkait pengurangan ancaman hingga kesiapan tanggap darurat dari masyarakatnya.



Sumber: Latief (2014)

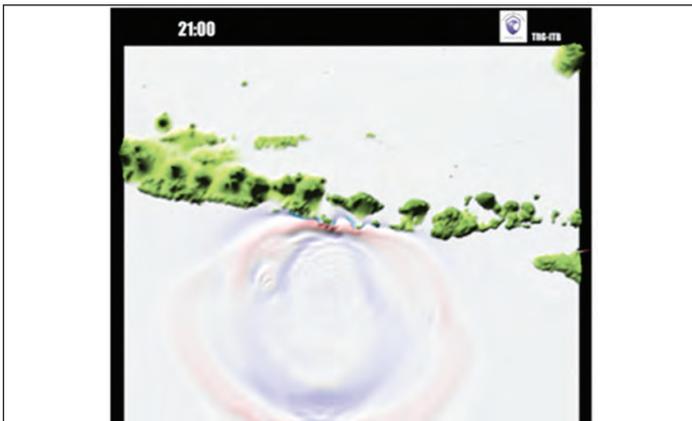
Gambar 40. Simulasi Tsunami dari Model Gempa di (A) Selatan Banten, (B) Laut Banda , (c) Serawak, dan di (d) Aceh yang penjarangan gelombangnya menjangkau daerah luas memberi risiko tinggi bencana.

Dalam risiko, selain unsur ruang, ada unsur waktu. Hal ini terkait berapa lama (selang waktu) kejadian yang sama akan berulang kembali. Semakin pendek selang waktu ulangnya, semakin tinggi risiko yang dihadapi suatu kawasan. Kejadian ulang bencana, seperti tsunami tektonik di suatu daerah, berkisar pada angka 200–300 tahun. Sementara itu, kejadian ulangan tsunami vulkanik membutuhkan waktu

Buku ini tidak diperjualbelikan.

yang lebih lama. Gempa di jalur penunjaman di sekitar Aceh memicu tsunami pada awal abad 20 (tsunami Simeulue) dan awal abad 21 (tsunami Aceh). Artinya, terjadi dengan beda waktu sekitar 100 tahun. Berbeda halnya dengan Kepulauan Mentawai yang mengalami bencana tsunami berulang setelah lebih dari 200 tahun.

Dalam besaran risiko, selain unsur ruang dan waktu serta besaran bahaya, aspek antroposen (yang terkait dengan manusia) merupakan unsur yang rumit keterkaitannya maupun perumusannya. Besaran risiko biasanya menyangkut fisik dan mental, cedera cacat dan korban jiwa, mata pencaharian, tempat tinggal, dan harta. Risiko semakin meningkat jika menyangkut kawasan yang tinggi konsentrasi kegiatan dan jumlah manusianya. Beberapa kota besar atau tempat dengan kegiatan banyak manusia terletak di kawasan yang sangat rentan terhadap bahaya muka laut tinggi yang mendadak dan cepat kejadiannya. Sejumlah kota dengan permukiman padat dan kegiatan penting (ekonomi dan pemerintahan) terletak di pesisir barat Sumatra, selatan Jawa, dan gugus pulau Nusa Tenggara Barat-Timur. Misalnya, Denpasar dan sekitarnya, yang rentan terhadap muka laut tinggi dan kejadian tsunami (Gambar 41).



Sumber: Latief (2014)

Gambar 41. Model Simulasi Penjalaran Gelombang yang Dibangkitkan Gempa di Selatan Bali

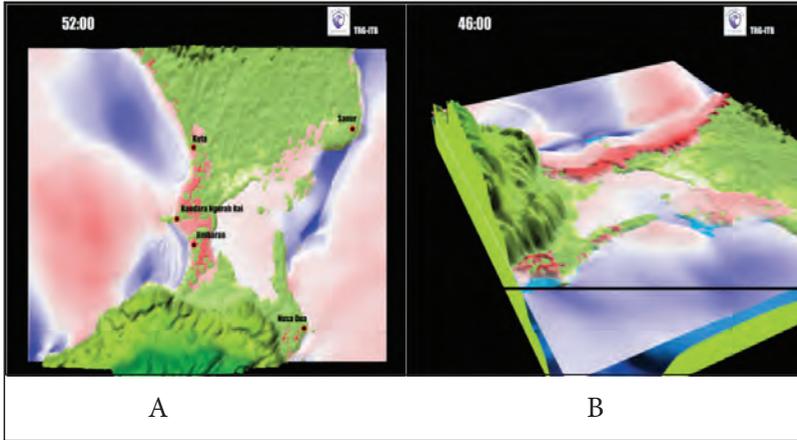
Kawasan Bali juga menerima kunjungan wisata tertinggi untuk wilayah Indonesia. Bali menjadi pilihan untuk acara pertemuan karena daya tarik wisatanya. Oleh karena itu, pesisir selatan Bali yang tinggi kepadatan hunian dan kegiatan wisata menyandang kerentanan dan risiko tinggi terhadap bencana tsunami.

Model simulasi penjaralan gelombang di selatan Bali yang kemudian masuk menerjang dataran rendah memberi gambaran risiko tinggi yang dihadapinya.

Pada perairan bagian dalam Indonesia, ketinggian rata-rata gelombang mencapai 1,2 m pada Januari dan Agustus. Ketinggian gelombang kuat akibat cuaca ekstrem bisa lebih dari 2,5 m ketika mencapai pantai perairan bagian dalam, seperti pantai timur Sumatra dan pantai utara Jawa. Pantai yang menghadap perairan lepas ke Samudra Hindia, seperti sebagian pantai barat Sumatra dan selatan Jawa, terpapar gelombang yang mencapai ketinggian 1,2 m pada Januari dan meningkat hingga 2,2 m pada Agustus. Saat musim puncak gelombang, perairan tersebut mengalami gelombang dengan ketinggian mencapai 2,2 m dan >3 m di perairan lepas (Gambar 9 dan 42).

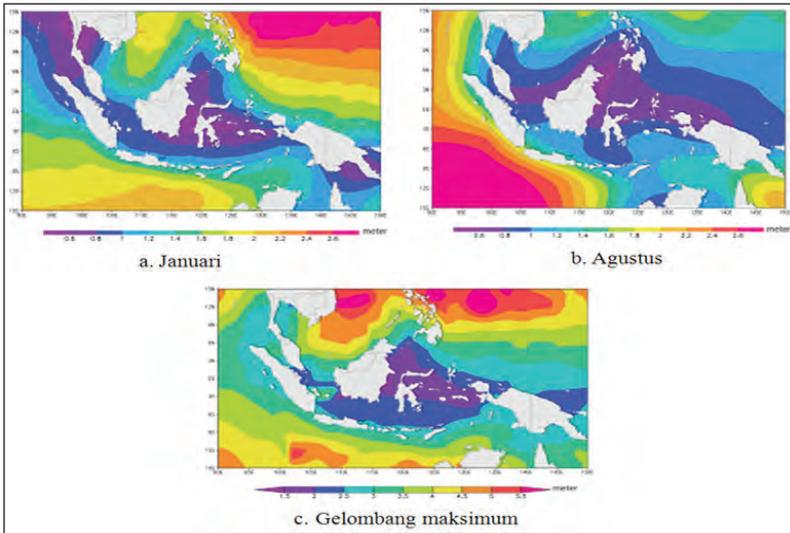
Ancaman bahaya gelombang kuat yang dipicu kejadian ekstrem cuaca dapat berlangsung beberapa kali dalam setahun, misalnya kejadian badai tropis (Gambar 5). Badai dengan angin kencang memicu gelombang tinggi. Kejadian ini tentu mengandung ancaman bahaya bagi kawasan yang dilewati dan mengandung risiko kerusakan bagi wilayah tersebut. Pusat badai mempunyai lintasan di sekitar ekuator (Gambar 4). Wilayah Indonesia berada di luar lintasan badai, namun badai berpengaruh kuat terhadap munculnya cuaca buruk di sekitarnya.

Dengan frekuensi, sebaran, dan panjang lintasan tersebut, kejadian badai dapat meliputi dan berpengaruh terhadap kawasan luas dengan peristiwa yang sering berulang beberapa kali dalam satu tahun. Keadaan ini meningkatkan risiko bencana kawasan di sekitar lintasan badai tersebut, menjadi semakin tinggi.



Sumber: Latief (2014)

Gambar 42 Model Simulasi Penjarangan Gelombang yang Dibangkitkan Gempa di Selatan Bali Ketika Menerjang (A) Pesisir Kuta dan (B) Sanur



Sumber:

Gambar 43. Peta Sebaran Ketinggian Gelombang di Indonesia Selama Bulan Januari, Agustus, dan Ketika Gelombang Maksimum

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bencana terjadi karena dipicu kejadian ekstrem yang datang secara perlahan, senyap atau mendadak. Kejadian ekstrem umumnya terjadi berulang, baik dengan waktu yang teratur maupun tidak beraturan. Lingkungan yang terlanda bencana secara alamiah mampu memulihkan diri dari kerusakan atau ubahannya secara perlahan dan menyesuaikan dengan dinamika alam yang baru. Kedatangan suatu bahaya pemicu bencana sebenarnya diawali oleh gejala yang dapat memberi petunjuk akan kejadiannya. Apabila dinamika alam yang merupakan kejadian ekstrem tersebut diketahui, dampak kerusakan bencana dapat dikurangi atau dihindari. Lingkungan dan masyarakatnya dapat dipersiapkan dengan memperkuat lingkungan, mengurangi besarnya bencana, dan menyediakan waktu yang cukup untuk menghindari bahaya.

A. KONSEP ADAPTASI, REHABILITASI, DAN PENINGKATAN KETAHANAN

Berdasarkan pemahaman kejadian atau gejala, baik yang bekerja sebagai interaksi berbagai unsur alamiah maupun antropogenik pada pulau kecil dan pesisir landai yang berlangsung perlahan ataupun ekstrem, dapat dilakukan beberapa upaya penanggulangannya. Upaya utama adalah mengetahui kapan dan bagaimana kejadian yang membawa bahaya akan muncul dan bagaimana cara mengurangi besaran bahayanya. Upaya ini disebut mitigasi. Mitigasi memerlukan

kemampuan dalam memahami gejala, dinamika, tanda atau sinyal kejadian pada masa lampau; dan memahami unsur dinamika alam apa saja yang dapat digunakan untuk mengenali kemungkinan. Upaya ini melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk para akademisi yang dapat menjelaskan gejala yang akan menjadi ancaman bahaya (Setiadi 2011; Lassa 2011). Dalam hal pengurangan ancaman bahaya, mitigasi dapat berarti mengurangi atau bahkan meniadakan kejadian ekstrem (alam) penyebab bencana. Usaha mitigasi tidak mungkin dilakukan ketika menghadapi gejala alam. Dalam hal gejala alam ekstrem yang dipicu dampak negatif kegiatan manusia, upaya mitigasinya berupa mengurangi kegiatan dan dampak negatifnya. Sebagai contoh, suatu bagian dari pantai pulau mengalami abrasi yang merusak dan meruntuhkan bangunan. Kejadian tersebut merupakan dampak negatif dari rusak atau tidak adanya lagi pelindung pantai berupa ekosistem pesisir (mangrove, terumbu karang, dan lain-lain) serta hilangnya batuan dan pasir di pantai yang habis ditambang. Mitigasi yang bisa dilakukan adalah menghentikan semua penyebab kerusakan. Adaptasinya dapat berupa melindungi bangunan pantai dan memulihkan ekosistem (alam) yang rusak dengan bantuan rekayasa bangunan. Bentuk adaptasi lainnya adalah menjaga agar sedimen dari darat mengisi kembali ruang di pantai. Keperluan bahan bangunan yang semula diperoleh dari pantai (pantai, mangrove, dan terumbu karang) dialihkan ke penyediaan dari darat atau hutan produksi. Peningkatan ketahanan dapat berupa memperluas dan meningkatkan kualitas ekosistem pelindung. Selanjutnya, membangun ketahanan masyarakat nelayan di kawasan rentan kejadian ekstrem cuaca-perairan dapat dilakukan dengan meningkatkan kapasitas produksi pada aspek sarana (kapal, jaring, alat komunikasi, dan lain-lain), kualitas sumber daya manusia, dan sistem pengolahan dan pemasaran hasil.

Upaya mengurangi kerusakan akibat bencana juga dapat disebut mitigasi bencana. Upaya mitigasi ini dapat berupa memberi perlindungan pada suatu lingkungan tertentu yang berpotensi terlanda bencana, bisa juga mengurangi tingkat atau menghilangkan kejadian yang menyebabkan bencana ketika menjangkau suatu tempat. Con-

tohnya, mengurangi atau meredam gelombang yang menuju kawasan terancam.

Berdasarkan pemahaman tersebut, dapat dilakukan upaya penanggulangan terhadap ancaman bahaya dan bencana yang muncul secara mendadak maupun yang berlangsung perlahan. Upaya penanggulangan secara menyeluruh dapat berupa mengurangi sumber ancaman, memperkuat lingkungan dan masyarakat, memulihkan kerusakan, dan meningkatkan ketahanan.

Upaya lebih lanjut untuk menghadapi bahaya di suatu lingkungan adalah dengan menyesuaikan diri dengan keadaan yang sudah demikian sejak semula. Dengan demikian, adaptasi atau penyesuaian berlaku bagi manusia yang datang, kemudian melibatkan diri dalam-dinamika di tempat baru yang rentan bencana. Namun, hal yang terjadi sering kali memberi tekanan atau dampak negatif pada lingkungan pulau kecil. Secara alamiah, lingkungan telah berada pada keseimbangan dengan segala kejadian alam, namun ketika unsur manusia masuk pada dinamika kejadian, perlu ada beberapa penyesuaian agar keseimbangan tetap terjaga tanpa menimbulkan kerusakan dan tetap mampu memulihkan dirinya dari kerusakan, kemudian meneruskan perjalanan mengikuti perubahan demi perubahan.

Upaya adaptasi ini harus didasarkan pada pemahaman bagaimana dinamika alam sejak dahulu kala berlangsung pada ekosistem pulau kecil. Kehadiran manusia yang datang kemudianlah yang memberi tekanan pada alam. Oleh karena itu, harus diketahui seperti apa, berapa besar, dan sejauh mana tekanan tersebut berlangsung. Pemahaman akan hal ini merupakan syarat utama dalam merancang dan menerapkan bentuk adaptasi. Pada rumusan yang dibuat berlaku umum ini, ada unsur kecepatan proses pemulihan maupun pembangunan, dan kualitas atau daya tahan hasil rekayasa adaptasi.

Rangkaian upaya mitigasi, adaptasi, rehabilitasi, dan penguatan sumber daya air dan sanitasi pulau kecil serta wilayah pesisir landai yang dimaksud adalah upaya meningkatkan ketahanannya dalam menghadapi bahaya yang mengancam pada aspek neraca air tawar dan sanitasi lingkungan. Upaya peningkatan ketahanan ini merupakan upaya lebih lanjut setelah rehabilitasi dan adaptasi terhadap kejadian

yang merusak keseimbangan lingkungan pulau kecil. Pada peningkatan ketahanan, terkandung upaya substitusi untuk lingkungan maupun dinamika yang ada. Oleh karena itu, ketika kondisi ekstrem terjadi, lingkungan dan dinamika tersebut mampu bertahan dan dengan cepat memulihkan dirinya dari gangguan keseimbangan. Unsur yang diperkuat ketahanannya adalah lingkungan alamiah tersebut, namun tanpa pemaksaan pengenalan substitusi unsur baru sebagai pemerkuat. Contohnya, pembuatan tanggul pantai bukan merupakan upaya yang tepat, namun memperkuat daya tahan biota pantai merupakan pilihan yang lebih bijak. Memulihkan ekosistem terumbu karang merupakan pilihan yang lebih tepat daripada menimbun pantai pulau kecil-pesisir landai dengan sedimen yang didatangkan dari tempat lain. Membuat instalasi air minum berikut distribusinya dengan biaya besar berupa pemompaan air tanah dangkal maupun dalam dari satu titik di pulau kecil merupakan upaya yang tidak bijaksana karena akan memicu intrusi air laut dan penurunan daratan. Injeksi air hujan ke dalam lapisan akuifer dangkal merupakan upaya paling hati-hati untuk menjaga air hujan berlebih tumpah ke laut, menjamin air tersimpan lebih aman, dan mempertebal lensa air tawar pulau kecil. Upaya penguatan dapat berupa hal yang paling sederhana, yaitu dengan tidak mengganggu sama sekali ekosistem pulau kecil yang masih asli. Pada pulau yang berpenghuni, menjaga keseimbangan ekosistem yang ada artinya menyerahkan pada alam untuk memulihkan setiap kerusakan yang diakibatkan oleh alam, namun bukan oleh tekanan manusia. Manusia penghuni pulau harus menyelaraskan kehidupannya dengan ekosistem yang ada, sesuai dengan daya dukung yang dimilikinya.

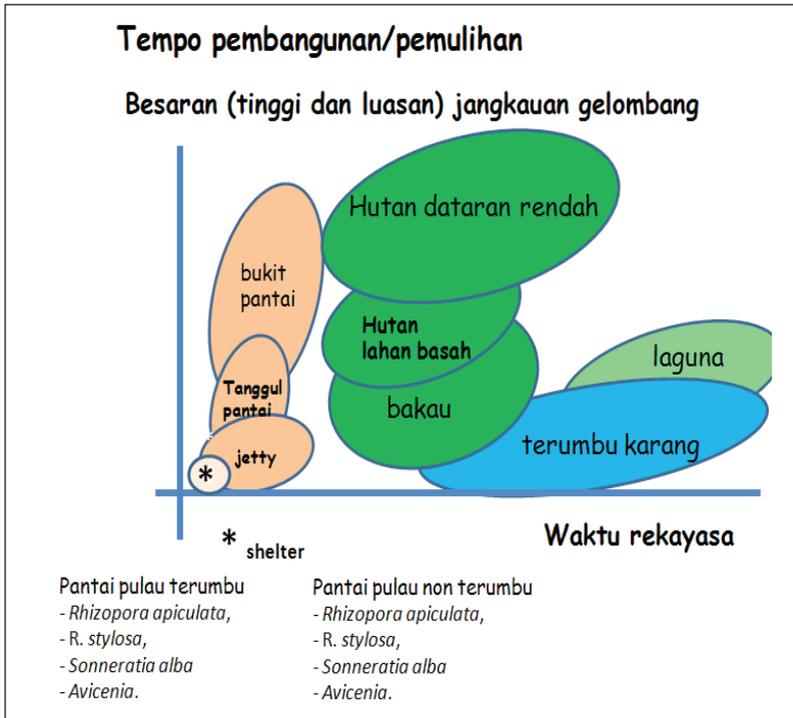
Konsep rehabilitasi, adaptasi, dan peningkatan ketahanan disempurnakan dengan pendekatan dinamis dengan memperhitungkan perubahan unsur waktu. Bila pendekatan ini dilakukan, skenario adaptasi maupun peningkatan ketahanan dengan sendirinya didasarkan pada perhitungan unsur-unsur yang mengacu pada dinamika perubahan tersebut.

Berdasarkan pendekatan yang dilengkapi hitungan, dapat dirancang jenis dan bentuk pelindung kawasan rentan ancaman bahaya.

Misalnya, pada kejadian ekstrem muka laut tinggi dalam bentuk gelombang tinggi (tsunami maupun badai), upaya yang dilakukan adalah memulihkan atau membangun ekosistem baru, yakni hutan pantai dan mangrove di darat-pantai hingga terumbu karang di perairan. Berdasarkan model ketinggian gelombang yang memberi ancaman serta kemampuan ekosistem, dapat dirancang penahan atau pelindung bahayanya (Gambar 25). Kemampuan ekosistem sebagai pelindung berbeda jenis dan bentuknya dari satu tempat ke tempat lain, tergantung pada besaran dan kejadian ulang bahayanya. Gelombang badai lebih sering terjadi walaupun besarnya tidak sekuat gelombang tsunami yang kejadiannya belum tentu muncul 150 tahun sekali. Seberapa jauh ekosistem memberikan kemampuannya sebagai pelindung juga tergantung pada kualitasnya. Tanggul pantai (*jetty*) yang dibangun di pantai memerlukan biaya mahal karena lahan yang harus dibebaskan bila pantai telah rapat oleh permukiman. Membangun ekosistem alamiah baru dengan kualitas yang sepadan dengan fungsinya memerlukan lingkungan dan waktu yang tepat. Gambaran hubungan antara waktu untuk membangun dan besaran bahaya ketinggian gelombang serta waktu ulang kejadian dapat dilihat pada Gambar 44. Pada Gambar 44 terlihat bahwa pembangunan sarana adaptasi buatan relatif lebih singkat waktunya dibandingkan membangun ekosistem alamiah. Pembangunan rekayasa di laut memerlukan waktu lebih lama.

Membangun ekosistem alamiah di laut memerlukan waktu lebih lama dibandingkan membangun ekosistem alam di darat. Dalam beberapa hal, ekosistem hutan pantai dianggap lebih mampu menahan aliran air yang didorong gelombang menuju lebih jauh ke darat dibandingkan mangrove yang di beberapa tempat memiliki ketinggian dan kerapatan pohon yang relatif lebih rendah. Namun, mangrove jenis tertentu memiliki batang kayu tinggi, kuat, dan rapat tumbuhannya, seperti jenis *Rhizophora apiculata*.

Pesisir landai Sumatra bagian timur dan Jawa bagian utara berpotensi memiliki rataan mangrove luas dari berbagai jenis, tergantung pada substratnya (pasiran atau lempengan). Mangrove menjadi korban perambahan untuk diambil kayu dan pembukaan lahan untuk



Sumber: modifikasi Hantoro dan Djuwansah (2014)

Gambar 44. Hubungan antara Besaran-Tinggi Gelombang dengan Waktu Pembuatan Penahan Gelombang

budi daya. Pesisir tidak lagi memiliki mangrove yang berfungsi sebagai pelindung dan penapis terobosan air laut saat pasang tinggi atau gelombang kuat. Pada saat bersamaan, ekosistem perlindungan bagi biota pesisir juga hilang. Di beberapa bagian timur pesisir Sumatra masih tersisa mangrove sebagai tutupan luas di beberapa delta sungai besar. Ekosistem ini secara perlahan mengalami perambahan pula untuk keperluan lahan budi daya dan prasarana. Pesisir selatan Jawa dan barat Sumatra di beberapa ruasnya memiliki dataran landai sempit berikut pantai dengan rata-rata mangrove di sekitar muara sungai. Fungsinya sebagai penapis gelombang telah terbukti saat kejadian tsunami Aceh tahun 2004. Ruas pesisir selebihnya adalah

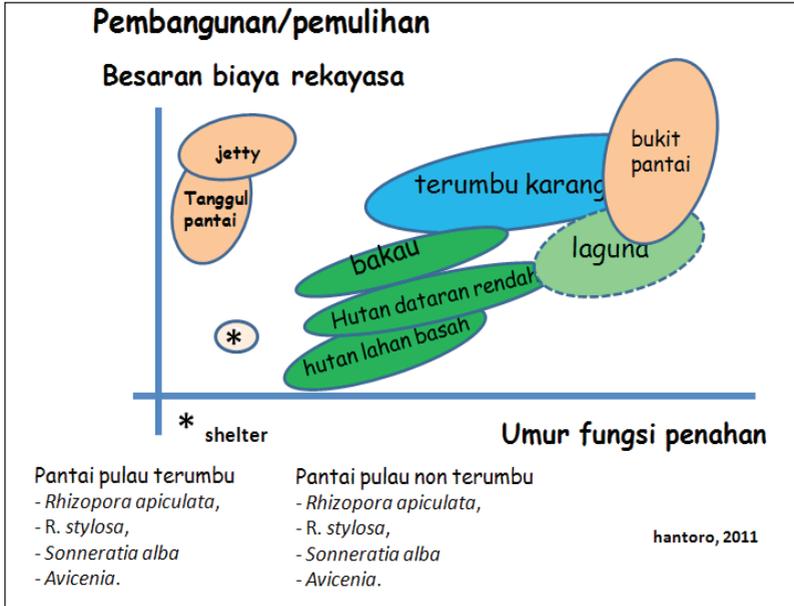
Buku ini tidak diperjualbelikan.

pantai bertebing terjal. Selain mangrove, hutan pantai juga berperan sebagai pelindung pesisir dari terjangan tsunami. Namun, ekosistem ini sudah tidak ditemukan lagi di pantai utara Jawa.

Adaptasi pascatsunami Aceh dilakukan dengan penguatan pantai melalui penanaman jenis tumbuhan yang cepat tumbuh (*Cassuarina equisetifolia*). Hal ini untuk membangun hutan pantai.

Adaptasi dengan memperkuat pelindung pantai dilakukan dengan membangun tanggul atau membangun ekosistem alam. Hambatan dan lamanya waktu yang diperlukan serta ketersediaan bahan maupun kondisi lingkungan (perairan tenang atau bergelombang kuat) merupakan unsur yang menentukan tinggi rendahnya biaya serta jenis teknologi untuk pembangunannya (Gambar 45). Upaya membangun terumbu karang sebagai pelindung pantai memerlukan persiapan dan kajian yang lebih rumit dibandingkan membangun ekosistem hutan pantai dan mangrove. Ada beberapa jenis terumbu karang yang dapat dibangun di perairan dangkal. Terumbu tepi di perairan relatif terlindung lebih sederhana cara dan sistematika pembangunannya dibandingkan terumbu karang halang (*barrier reef*) atau terumbu karang penghalang.

Ketika pelindung pantai harus dibangun di lahan terbatas atau telah penuh dengan prasarana lain, pembangunan pelindung pantai dalam bentuk perbukitan di pantai memerlukan biaya lebih tinggi dibandingkan membangun ekosistem terumbu karang di pantai. Dalam hal tertentu, bentang perbukitan di kawasan pesisir hasil rekayasa mempunyai kelebihan, misalnya dalam hal estetika dan luasan ruang untuk keperluan reservoir terbuka air tawar atau ruang penyimpanan air bawah tanah. Reservoir air tawar sangat diperlukan di kawasan pesisir sebagai tabungan air yang diisi saat musim hujan dan dipergunakan saat ketersediaan air tidak mencukupi pada musim kemarau. Reservoir tidak harus dalam bentuk kolam terbuka, namun dapat dibuat dalam bentuk cekungan berisi bahan sedimen yang memiliki kesarangan dan kelulusan tinggi (>15%) di tempat air disimpan. Dengan demikian, reservoir ini juga menjadi bagian dari upaya pengurangan dampak pascabencana jika kualitas air permukaan rusak akibat bencana.



Sumber: modifikasi Hantoro dan Djuwansah (2014)

Gambar 45. Hubungan antara Besaran Biaya Rekayasa dengan Waktu Fungsi Penahan Gelombang

B. RUMUSAN REHABILITASI, ADAPTASI, DAN PENINGKATAN KETAHANAN

Berdasarkan pemahaman atas dinamika ekosistem dan pengertian kebencanaan, merujuk nomenklatur dan rumusan mengenai kerentanan, bahaya, bencana dan kerugian, rumusan umum dan upaya peningkatan ketahanan terhadap bencana kenaikan muka laut kondisi ekstrem dapat diturunkan menjadi beberapa rumusan operasional.

Dinamika ekosistem perlu dipahami, mengingat suatu bencana sesungguhnya merupakan bagian dari dinamika itu sendiri yang kemunculannya pada tingkat ekstrem dapat menjadi bencana. Ketika bencana terjadi, kondisi lingkungan menjadi acuan dalam menghitung beberapa besaran, misalnya besaran kejadian, bahaya, bencana, dan kerugian. Upaya pemulihan, adaptasi, dan peningkatan ketahanan memerlukan strategi yang dirumuskan setelah memahami dinamika alam serta beberapa besaran tersebut.

Perbedaan mendasar antara rumusan pemulihan, adaptasi, dan peningkatan ketahanan adalah pada tataran jangkauan upaya yang ditawarkan dalam lingkungan tersebut, apakah hanya memulihkan—pada dasarnya mustahil mengembalikan seperti keadaan sebelum bencana—ataukah dengan cara lain. Cara lain adalah menyiapkan upaya yang didasarkan pada dampak bencana yang telah meninggalkan perubahan berupa kerusakan, kemudian melanjutkan yang ada di lingkungan dengan mulai memperhitungkan upaya penyesuaian terhadap kejadian yang sedang atau akan terjadi. Prinsip usaha penguatan lingkungan adalah dengan memberi sentuhan atau bahkan pengenalan suatu rekayasa baru yang dapat menambah kemampuan menangkal bencana sehingga tidak menimbulkan kerugian.

1. Rehabilitasi (*Rhb*)

Rehabilitasi dapat dirumuskan sebagai upaya memperbaiki lingkungan yang telah mengalami kerusakan akibat dilanda bencana menjadi seperti keadaan semula. Dalam pengertian ini, dampak bencana, setelah bencana berakhir dan keadaan kembali tanpa hadirnya kejadian bencana lagi, meninggalkan perubahan pada lingkungan. Keadaan ini dapat dirumuskan sebagai kondisi awal dikurangi kerusakan, menghasilkan keadaan pascabencana.

Dengan demikian, rehabilitasi berusaha memperbaiki kerusakan yang terjadi akibat bencana kejadian ekstrem maupun tekanan pengelolaan berlebihan demi memenuhi keperluan manusia. Rehabilitasi dilakukan untuk mengembalikan lingkungan agar dapat pulih dan berfungsi sebagaimana keadaan semula dengan tetap mempertahankan fungsi kawasan ini. Contohnya, dilakukan rehabilitasi pada neraca dan siklus hidrologi di pulau kecil setelah mengalami bencana. Fungsi dan sistemnya direhabilitasi pulih dan kembali seimbang sebagai bagian dari dinamika lingkungan. Setelah memperhitungkan perubahan dan perkembangan suatu kawasan terhadap masuknya intervensi rekayasa baru dan tambahan tekanan antroposen, langkah selanjutnya adalah meningkatkan adaptasi dan ketahanan kawasan tersebut.

Dengan pulihnya keseimbangan, adaptasi memperoleh pijakan kuat sehingga bisa berfungsi sesuai dengan maksud dan tujuannya. Rehabilitasi harus memperhitungkan gejala alam yang datang dengan kejadian ekstrem karena kehadirannya dapat menghapus sama sekali upaya rehabilitasi ini. Kemampuan membaca kedatangan gejala alam ekstrem akan membantu menyiapkan paket rehabilitasi yang tepat sehingga mampu menghadapi kejadian ekstrem.

Beberapa rumusan yang telah disusun dapat dipergunakan sebagai acuan dalam menyusun rumusan rehabilitasi, misalnya besaran bencana, indeks kerentanan, besaran risiko, dan besaran kerugian (Hantoro 2012).

$$Rhb = k \cdot M_{L.tot} \cdot t \dots\dots\dots 10)$$

t = waktu yang diperlukan untuk rehabilitasi

Untuk

$$M_{L.tot} = M_{D.tot} \cdot k(A+B+C+D+E+F+G+H+I)_{tot}$$

$M_{L.tot}$ = Besaran kerugian

$M_{D.tot}$ = Besaran bencana

Maka

$$Rhb = k \cdot M_{D.tot} \cdot k(A+B+C+D+E+F+G+H+I)_{tot} \cdot t$$

Keterangan:

- A = Kerusakan prasarana/jaringan jalan distribusi air
- B = Kerusakan sarana/sistem perdagangan/mata pencaharian
- C = Kerusakan sarana sistem transportasi dan komunikasi
- D = Kerusakan sarana sistem pemerintahan
- E = Kerusakan sarana sistem pendidikan
- F = Kerusakan sarana/sistem pelayanan dan rehabilitasi kesehatan
- G = Kerusakan sarana/sistem pertanian, perikanan, perkebunan
- H = Kerusakan sistem sanitasi
- I = Kerusakan jaringan distribusi energi dan pangan

2. Adaptasi (Adp)

Adaptasi dapat dirumuskan sebagai upaya penyesuaian lingkungan tanpa imbuhan rekayasa maupun penguatan unsur alamiahnya untuk

menghadapi suatu bencana atau kondisi ekstrem lainnya. Manusia merupakan unsur utama dalam proses adaptasi (Setiadi 2011). Dalam pengertian ini, bila suatu lingkungan belum pernah dilanda bencana, namun menurut hasil kajian rentan terlanda bencana, unsur-unsur yang memiliki kerentanan tersebut dihindarkan dari jangkauan ancaman. Namun, bila lingkungan tersebut pernah terlanda bencana, terdapat dua upaya yang harus dilakukan, yakni pemulihan dan unsur yang memiliki kerentanan tersebut dihindarkan dari jangkauan bencana. Bila upaya berupa perlindungan, dalam adaptasi ini tidak perlu upaya penguatan, namun sekadar melindungi. Dalam keadaan demikian, kemungkinan akan ada imbuhan rekayasa terhadap lingkungan. Imbuhan ini lebih bersifat sebagai penyesuaian unsur alamiah untuk menghadapi kejadian ekstrem agar tidak menjadi bencana. Pemahaman mengenai dinamika alam di lingkungan tersebut menjadi dasar bagi setiap upaya adaptasi (Hantoro 2012).

$$Adp = k \cdot R_{tot} \dots\dots\dots 11)$$

$$\text{Bila } R_{tot} = H_{tot} \cdot V_{tot} \text{ dan } V_{tot} = A_{tot} / CC_{tot}$$

$$\text{Maka } Adp_{tot} = k \cdot H_{tot} \cdot A_{tot} / CC_{tot}$$

Keterangan:

- R = Risiko
- H = Bencana (*Hazard*)
- V = kerentanan (*Vulnerability*)
- A = Jenis bencana
- CC = kemampuan menghadapi (*Coping capacity*)

Bila unsur H telah dihitung = $M_{H.e1}$

$$\text{Bila } M_{H.tot} = E_{tot} \cdot R_{tot} \cdot (Ls)$$

Keterangan:

- E_{tot} = Besaran kejadian 1
- R_{tot} = Perulangan bagian pada kejadian 1
- v_{tot} = Kecepatan datangnya kejadian 1
- L_{tot} = Lingkungan kejadian
- h_{tot} = ketinggian muka laut

m_{tot} = massa air laut

$$\text{maka } Adp_{tot} = k \cdot E_{tot} \cdot R_{tot} \cdot (Ls) \cdot A_{tot} / CC_{tot}$$

Rumusan ini dapat diterapkan untuk semua jenis bencana, namun perlu penyesuaian pada unsur besaran kejadian di mana faktor kejadiannya berbeda. Rumusan ini juga dapat diterapkan secara menyeluruh, mengingat dalam unsur kerentanan tersebut sudah ada berbagai unsur yang menyanggah kerentanan, seperti aspek sosial, ekonomi, fisik, dan lain-lain.

3. Penguatan Ketahanan (*E.res*)

Peningkatan ketahanan atau *resilience* suatu lingkungan dilakukan untuk mempersiapkan secara fisik maupun non fisik suatu lingkungan penyanggah kerentanan dalam menghadapi jangkauan bencana. Penguatan ini merupakan usaha lebih jauh daripada sekadar adaptasi dalam menyiapkan masyarakat agar memiliki kepekaan dan kesiapan menyongsong bencana. Adaptasi juga dapat berarti upaya rehabilitasi atau pemulihan pascabencana.

Peningkatan ketahanan mencakup semua aspek ruang dan kehidupan. Penguatan fisik merupakan tingkat lanjut dari adaptasi yang membangun upaya perlindungan fisik dari ancaman bahaya dan kerusakan akibat bencana. Pembuatan tanggul dan pembangunan ekosistem pantai dapat menjadi upaya adaptasi maupun penguatan pelindung fisik. Kesejahteraan masyarakat, ketersediaan transportasi aman dan cepat serta kecepatan tanggap darurat merupakan sisi lain dari adaptasi dan penguatan ketahanan.

Terdapat beberapa skenario penguatan, tergantung pada kondisi awal wilayah, pernah tidaknya terlanda bencana, seberapa besar bencana, dan kapan bencana terjadi menurut analisis kerentanan. Informasi mengenai dinamika lingkungan sangat penting untuk mengetahui respons dinamika itu sendiri terhadap imbuhan rekayasa yang kemudian menjadi bagian dari dinamika alam. Dinamika alam juga menjadi dasar untuk merancang pada tingkatan dan unsur apa penguatan dilakukan. Bila penguatan tidak dilakukan secara terukur

dan terpilih, kekeliruan pada sasaran dan besaran penguatan dapat berdampak negatif, yaitu memperbesar risiko dan memperbesar biaya.

Skenario 1: Belum pernah terlanda bencana (Hantoro 2012).

$$Eh.res = k \cdot t_e \cdot M_{H.e1} \dots\dots\dots 12a)$$

Di mana

$$M_{H.e1} = E_{e1} \cdot R_{e1} \cdot (Lt)$$

$$Lt = [G_t + B_t + O_t + P_t + S_t]$$

$$E_{e1} = v_{e1}^2 \cdot L_{e1} \cdot h_{e1} \cdot M$$

$$t_e = t_x - t_{e1} = \text{waktu yang diperlukan untuk penguatan}$$

$$t_x = \text{waktu datangnya bencana kedua}$$

Apabila:

$$M_{H.e1} = v_{e1}^2 \cdot L_{e1} \cdot h_{e1} \cdot m \cdot R_{e1} \cdot [G_t + B_t + O_t + P_t + S_t]$$

Keterangan:

$$M_{H.e1} = \text{Besaran bahaya kejadian 1}$$

$$E_{e1} = \text{Besaran kejadian 1}$$

$$R_{e1} = \text{Perulangan bagian pada kejadian 1}$$

$$v_{e1} = \text{Kecepatan datangnya kejadian 1}$$

$$L_{e1} = \text{Lingkungan/luasan kejadian}$$

$$h_{e1} = \text{Ketinggian muka laut}$$

$$m_{tot} = \text{Massa air laut}$$

maka

$$Eh.res = k \cdot t \cdot v_{e1}^2 \cdot L_{e1} \cdot h_{e1} \cdot m \cdot R_{e1} \cdot [G_t + B_t + O_t + P_t + S_t]$$

Skenario 2: Pernah terlanda bencana (Hantoro 2012).

$$Eh.res = k \cdot t_e \cdot M_{D.e1} \dots\dots\dots 12b)$$

Di mana

$$M_{D.e1} = t_{e1} \cdot M_{H.e1} \cdot H_{Me1} \cdot D_{Me1}$$

Keterangan:

$M_{D,e1}$ = Besaran bencana

$M_{H,e1}$ = Besaran bahaya

t_{e1} = Lama berlangsung kejadian 1 hingga pemulihan

H_{Me1} = Jumlah manusia yang tertimpa

D_{Me1} = Kerusakan tempat kejadian

t_e = $t_x - t_{e1}$ = Waktu yang diperlukan untuk penguatan

t_x = Waktu datangnya bencana ke-2

Maka:

$$Eh.res = k \cdot t_{e1} \cdot M_{H,e1} \cdot H_{Me1} \cdot D_{Me1}$$

C. STRATEGI MITIGASI DAN ADAPTASI

Perubahan atau bahkan kerusakan di kawasan landai pesisir dan pulau kecil dapat diakibatkan oleh kejadian ekstrem dengan beragam gejala alam sebagai pemicunya. Kondisi alam kawasan landai pesisir dan pulau kecil sangat beragam, demikian pula kondisi sosial kemasyarakatannya. Ancaman bahaya yang beragam menghadirkan bencana yang datangnya bisa sangat cepat atau perlahan. Kejadian bencana juga dapat berulang dalam waktu hitungan bulan atau tahun, bisa juga berulang setelah puluhan tahun atau bahkan abad. Oleh karena itu, upaya adaptasi menghadapi ancaman bahaya dan dampak bencana juga harus disesuaikan dengan beberapa faktor yang berkaitan dengan kejadian ekstrem maupun gejala pemicunya. Sebagaimana telah disampaikan, mitigasi, adaptasi, dan peningkatan ketahanan merupakan rangkaian upaya dengan sasaran akhir untuk mengurangi korban dan kerugian akibat bencana. Upaya-upaya tersebut tergantung jenis, waktu dan ruang cakupan, serta sasaran objeknya. Lingkungan dan sarana permukiman merupakan sasaran yang bersifat fisik. Sasaran yang bersifat non fisik adalah sosial ekonomi masyarakatan yang juga harus diperhitungkan. Salah satu upaya yang dapat diperhitungkan sebagai bagian mitigasi, adaptasi, dan peningkatan ketahanan adalah membangun sarana peningkatan kesehatan masyarakat, misalnya pembangunan sanitasi dan peningkatan ketersediaan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

air bersih di kawasan rentan bencana. Masyarakat sejahtera dengan daya saing ekonomi yang kuat diharapkan mampu bertahan pada keadaan tanggap darurat pascabencana saat melakukan penyelamatan dan menunggu bantuan penanggulangan.

Bagi kawasan landai pesisir dan pulau kecil, ancaman bahaya utama adalah tinggi muka laut yang berlangsung secara mendadak maupun perlahan. Pilihan strategi adaptasi bagi masing-masing pemicu ancaman bahaya dapat dibangun dengan bantuan model yang dapat menggambarkan besaran kejadian. Pilihan tepat berdasarkan model hasil penelitian akan membantu penentuan skala prioritas dan efisiensi anggaran pembangunan sarana.

Dari segi fisik dan lingkungan, strategi adaptasi dan peningkatan ketahanan pada kawasan landai pesisir dan pulau kecil dalam menghadapi ancaman bahaya muka laut tinggi adalah dengan memulihkan ekosistem yang telah rusak akibat bencana alam atau gangguan manusia. Ekosistem yang harus dipulihkan dan diperkuat adalah tegakan hutan pesisir (*baringtonia*, mangrove, dan *Cassuarina equisetifolia*) dan biota perairan, seperti terumbu karang dan rumput laut. Sementara itu, kerusakan sedimen pantai akan pulih oleh asupan pasir dari terumbu karang. Upaya adaptasi dan peningkatan ketahanan (kesehatan) masyarakat pesisir dilakukan dengan pemulihan dan peningkatan kualitas air bersih serta sanitasi permukiman. Selain itu, dilakukan rekayasa pembangunan fisik sarana yang berperan langsung sebagai sarana pengurangan ancaman bahaya, seperti tanggul pantai, jalur evakuasi, *shelter*, transportasi, peringatan dini, dan lain-lain.

Dari segi non fisik, terdapat beberapa strategi adaptasi. Pertama, peningkatan pemahaman masyarakat pada dinamika alam yang menghasilkan ancaman bahaya. Dari upaya tersebut diharapkan kepedulian dan peran serta masyarakat dalam semua upaya adaptasi (misalnya memperkuat *local wisdom*, seperti halnya sasi) akan tumbuh. Oleh karena itu, peran gender guna memperkuat wadah komunitas (institusi) lokal yang dapat mendorong akselerasi penerapan strategi adaptasi perlu ditingkatkan. Kedua, peningkatan ketahanan sosial dan ekonomi sehingga akan terjadi penguatan daya saing ekonomi yang mempercepat peningkatan kesejahteraan. Ketiga,

pelatihan tanggap darurat secara berkala perlu dilakukan agar masyarakat tidak canggung dan dapat tertib melaksanakan usaha-usaha evakuasi.

Bagi kawasan yang terpapar bencana dengan perulangan dalam kurun waktu pendek, strategi adaptasi yang ditempuh adalah meningkatkan pemahaman masyarakat terhadap ancaman yang dihadapi dan konsekuensi yang dihadapi dari waktu ke waktu. Upaya ini memerlukan penyampaian informasi dengan kemasan dan muatan yang tepat. Usaha peningkatan pemahaman ini dapat memberi hasil tumbuhnya kepedulian dan partisipasi dalam usaha pengurangan ancaman bahaya. Namun, upaya ini kemungkinan menghasilkan respons berupa apatisme masyarakat.

Berdasarkan data ketinggian muka laut dan data berbagai ekosistem yang berpotensi mengurangi ancaman bahaya muka laut tinggi, dapat digambarkan hubungan potensi di antara unsur-unsur tersebut sebagai pelindung dan lama waktu yang diperlukan untuk menghasilkannya. Hal ini sebagai salah satu bagian dari strategi adaptasi. Terkait gejala kenaikan muka laut tinggi yang dipicu oleh pemanasan global, upaya mitigasi tidak hanya berskala lokal, namun juga melibatkan kebijakan global. Pada skala lokal, pemeliharaan ekosistem yang menjadi pengaman terhadap gejala pemanasan global dapat dilakukan. Caranya adalah dengan menjaga keutuhan hutan sebagai penyerap karbon atau terumbu karang yang menjadi bagian dari ekosistem pantai penyimpan karbon dalam bentuk kalsium karbonat kerangka koral.

D. STRATEGI PENINGKATAN KETAHANAN, KETANGGUHAN DAN KELENTURAN

Sepintas tidak terdapat perbedaan di antara istilah ketahanan, ketangguhan, dan kelenturan. Istilah ini sebenarnya dapat diterapkan dalam isu yang berkaitan dengan kawasan landai pesisir dan pulau kecil. Istilah ketahanan mewakili keadaan lingkungan dan masyarakat kawasan dalam menerima kejadian ekstrem skala besar yang sangat jarang terjadi. Masyarakat secara alamiah telah beradaptasi dengan

kondisi lingkungan dan mampu bertahan ketika bencana besar melanda. Contoh bencana yang terkait dengan ketahanan antara lain tsunami dan gelombang badai kuat. Bahaya yang datang tidak akan menghancurkan ekosistem jika lingkungan dan masyarakatnya berada dalam kelindungan alamiah yang tidak terjangkau dan tidak menimbulkan bencana.

Istilah ketangguhan dapat diterapkan pada kondisi lingkungan atau masyarakat yang telah beradaptasi dengan kejadian ekstrem yang datang berulang, seperti gelombang badai. Walaupun terpapar dan terlanda kejadian ekstrem secara berulang, ekosistem dan masyarakatnya dapat dengan cepat memulihkan diri. Kuatnya ekosistem alam sebagai pelindung dari bahaya dan tingginya kesejahteraan (kesehatan, ekonomi, dan pengetahuan) menjadikan masyarakat tangguh dalam menghadapi dan mengatasi dampak bencana.

Istilah ketahanan dapat diterapkan pada ekosistem dan masyarakat yang terpapar dan terlanda bencana secara berulang. Walaupun terpapar berulang kali pada bencana dengan kerugian besar, berkat kesiapan fisik dan mental, masyarakat dapat menyelesaikan masalahnya dengan cepat berbekal pengalaman sebelumnya, bahkan menemukan dan memperoleh manfaat dari dampak bencana yang terjadi. Pada kasus letusan gunung api pulau kecil (misalnya Banda, Ternate, dan Tidore), dampak sampingan hasil erupsi pasir menjadi sumber pendapatan dan lahan subur bagi perkebunan rempah (pala). Berdasarkan pengalaman sebelumnya dalam menanggapi dampak bencana, muncul inovasi sistem dalam rehabilitasi. Inovasi ini memanfaatkan momentum dampak. Jadi, bukan hanya sekadar bangkit, namun juga membangun masyarakat yang lebih baik dan lebih kuat dalam berbagai hal, seperti ekonomi dan sosial budaya.

Kondisi kawasan pesisir landai dan pulau kecil di Indonesia yang sangat beragam mengharuskan strategi pengelolaannya dipilih sesuai potensi dan daya dukung sumber daya alam dan lingkungannya. Strategi ini juga harus memperhitungkan bagaimana kawasan sekitarnya mengelola ruang dan sumber dayanya, apakah juga memiliki

cukup sumber daya bagi kawasan itu sendiri atau harus mengandalkan dan bahkan menguras sumber daya dari kawasan pesisir pulau kecil tersebut. Kuatnya perambahan eksploitasi keluar menimbulkan ketimpangan ketahanan suatu kawasan. Hal ini karena eksploitasi yang dilakukan telah melampaui daya dukung sumber daya di kawasan pesisir landai dan pulau kecil tersebut. Dengan demikian, kawasan ini tidak lagi memiliki ketangguhan dan daya saing dalam pengelolaan sumber dayanya sendiri.

Salah satu strategi penguatan ketahanan adalah dengan memulihkan ekosistem alamiah. Pemulihan ini dapat dirancang dalam suatu pendekatan dengan semua pihak terkait melalui pembangunan suatu taman atau kebun raya (Hantoro dkk. 2014). Eko sains teknopark (ESTP) diusulkan menjadi model penguatan ekosistem yang dilakukan bersamaan dengan sosialisasi dan pembelajaran pengelolaan ekosistem dalam taman tersebut. Sarana ini juga dapat dikembangkan sebagai suatu tujuan wisata lingkungan sekaligus penyebaran nilai kelestarian dan pengetahuan alam.

Strategi yang lebih baik diperlukan untuk mempersiapkan suatu kawasan dalam menghadapi ancaman bahaya dampak kejadian ekstrem, terlebih pada kejadian ekstrem yang sering berulang. Di satu sisi, unsur yang harus diperhitungkan pada penyusunan strategi ini adalah potensi dan daya dukung sumber daya alam dan lingkungan serta kondisi sosial budaya masyarakatnya. Di sisi lain, strategi pengurangan risiko bencana juga disiapkan manakala dipahami benar bagaimana mekanisme kejadian bahaya tersebut dipicu kejadian ekstrem yang sangat rumit dinamikanya.

Arti ketahanan kawasan terhadap ancaman bahaya bukan sekadar ketahanan terhadap kerusakan fisik yang ditimbulkan oleh suatu kejadian ekstrem, misalnya bahaya gelombang tinggi. Selain kerusakan fisik, gelombang tinggi juga mengakibatkan genangan air asin yang merusak air tanah permukaan. Muka laut tinggi yang prosesnya berjalan perlahan juga akan berdampak pada kerusakan ekosistem dan mengancam ketahanan sumber daya alam, contohnya air tawar bersih.

E. PEMBUATAN EKOSISTEM PELINDUNG PANTAI

Berdasarkan besaran waktu kejadian ekstrem muka laut tinggi yang melanda, garis besar rancangan pembangunan ekosistem pelindung pantai diusulkan. Salah satu yang dapat dipergunakan sebagai model adalah kawasan Selat Sunda. Selat Sunda pernah mengalami bencana kejadian ekstrem yang dampaknya memicu bahaya muka laut tinggi, yakni letusan Gunung Krakatau yang diikuti gelombang tsunami. Ledakan terjadi beberapa kali, demikian pula gelombang kuat dilaporkan melanda beberapa kali di berbagai lokasi di sekeliling Selat Sunda. Ledakan puncak terjadi dilaporkan sebagai ledakan paling akhir, disusul oleh tsunami yang dilaporkan sebagai gelombang paling tinggi dari beberapa gelombang sebelumnya. Ledakan besar ini diikuti runtuh atau terbannya kaldera yang memicu perpindahan volume air dengan cepat dan dalam jumlah besar yang membentuk gelombang kuat dan menyebar ke hampir semua arah (Simkin dan Fiske 1983).

Ketinggian gelombang saat mencapai pantai dan jangkauan masuk ke darat dilaporkan berbeda besarnya dari satu ke tempat lainnya. Jenis bahan rombakan dari dasar laut yang diseret limpasan gelombang (*urge*) juga berbeda ukuran dan jenisnya. Bongkah-bongkah tsunami yang paling sering ditemukan adalah pecahan atau rombakan koral terumbu karang dari berbagai ukuran. Koral *Porites* sp. yang berukuran mulai dari beberapa puluh sentimeter hingga 4 meter terenggok di pantai atau di pesisir sejauh > 400 m. Remah koral yang berupa patahan karang mati diangkut dan ditekarkan di pantai hingga sejauh 200 meter membentuk timbunan (pematang pantai Teluk Plantung Kalianda) atau lebih hingga pesisir Anyer (Gambar 50).

Sedimen laut dangkal bercampur remah terumbu karang atau potongan kayu ditemukan hingga 700 m di pesisir sekitar Panimbang (Gambar 51), bagian pesisir Banten yang memiliki dataran landai dan luas. Dari pengamatan di Pulau Panaitan pesisir bagian utara, diketahui bahwa gelombang tsunami letusan Krakatau tidak menjangkau jauh ke daratan. Gelombang diduga telah diberaiakan oleh terumbu

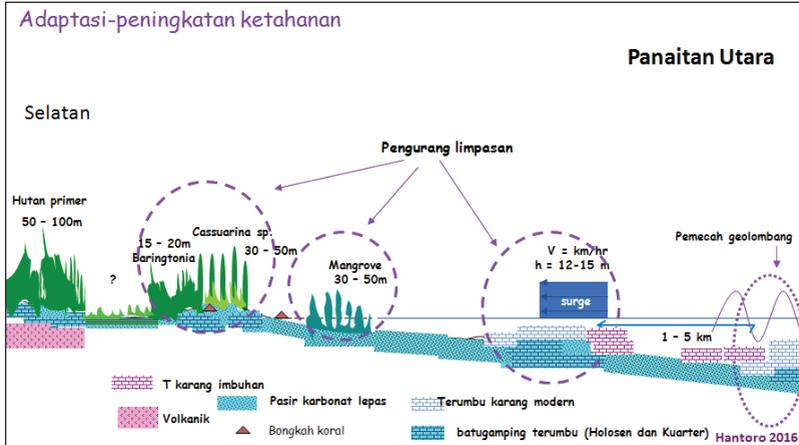
karang saat melalui rata-rata terumbu karang, kemudian ditahan oleh mangrove dan hutan pantai. Di belakang jajaran pohon hutan pantai terdapat lahan terbuka dengan bahan pasir dan kerikil dari laut dangkal (perairan) yang diduga masih sempat lolos terbawa massa air yang menerobos di sela kerapatan hutan pantai. Gambar 46 memperlihatkan pelindung pantai alamiah yang terdiri atas terumbu karang di lepas pantai dan hutan tropis primer yang terdiri atas mangrove, cemara (*Cassuarina equisetifolia*), dan kelompok baringtonia.

Berdasarkan beberapa catatan, pengamatan, dan laporan kejadian letusan tsunami, diusulkan upaya pembangunan pelindung pantai dan pesisir dengan ekosistem alamiah. Pilihan yang diusulkan adalah terumbu karang, mangrove, hutan pantai (termasuk cemara pantai), dan sebagai penguat, diusulkan pembangunan tanggul pantai yang disesuaikan dengan ketersediaan dan estetika ruang. Gambar 48 memperlihatkan model pembangunan ekosistem pelindung pantai dari gelombang tsunami.

Beberapa ruas yang diusulkan di kawasan sekeliling Selat Sunda adalah di Teluk Betung (Gambar 47) dan Krunji di Lampung; serta Cilegon, Carita dan Sumur di Banten.

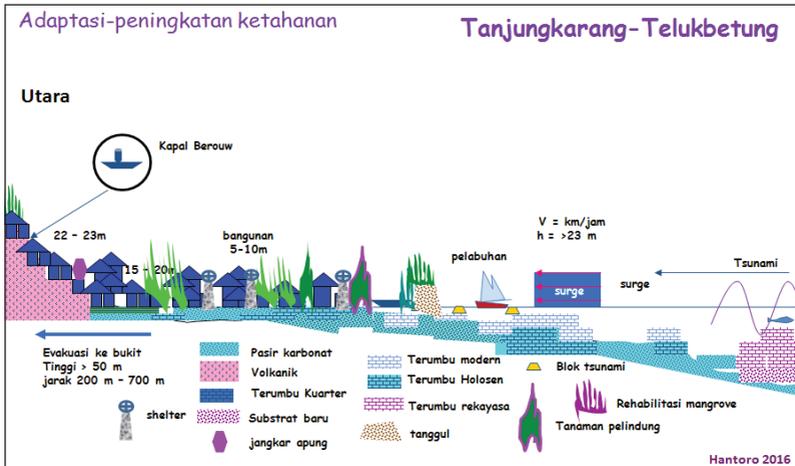
F. DATA DAN INFORMASI YANG DIPERLUKAN

Sejumlah data dan informasi harus tersedia saat analisis guna memperoleh gambaran dan upaya pembangunan model untuk mengurangi ancaman bahaya dan meningkatkan ketahanan kawasan landai pesisir dan pulau kecil. Langkah berikutnya adalah mengetahui kondisi dan dinamika lingkungannya serta mempelajari regulasi yang berlaku di kawasan tersebut. Secara garis besar, jenis data yang diperlukan untuk analisis dan pembuatan model ini adalah sebagai berikut.



Sumber: Hantoro dkk. (2015)

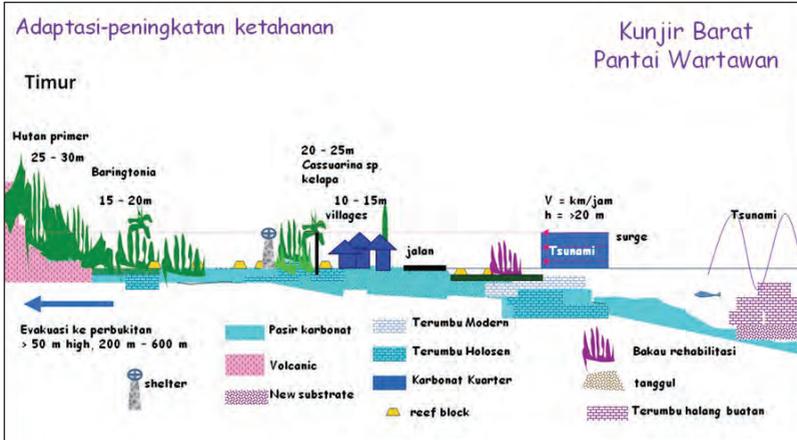
Gambar 46. Penampang Ideal Ekosistem Pantai di Pesisir Utara Pulau Panaitan (Oktober 2005)



Sumber: Hantoro dkk. (2015)

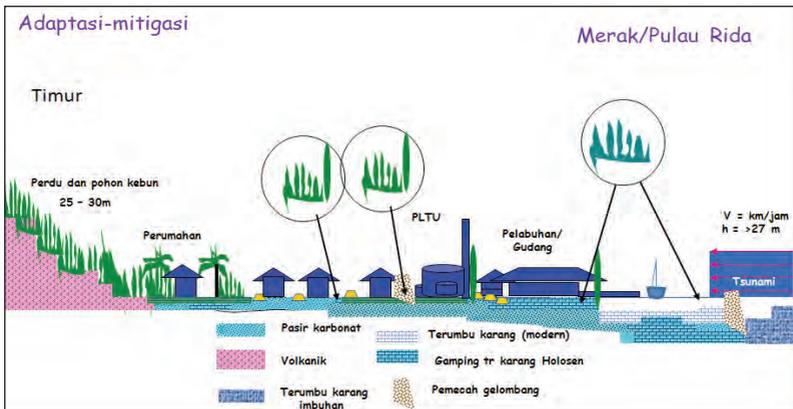
Gambar 47. Penampang Ideal Ekosistem Pesisir Tanjungkarang ke Teluk Betung. Bangunan Permukiman Padat Terdapat Sepanjang Pantai, Terutama di Teluk Betung. Empasan Gelombang Mencapai 22 m.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



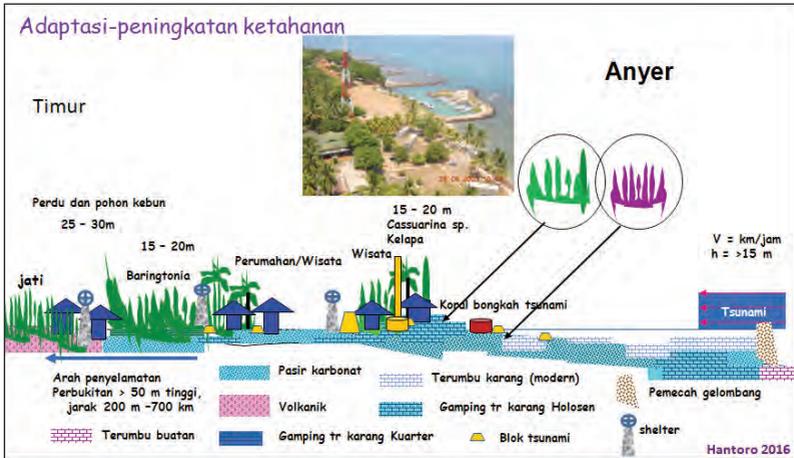
Sumber: Hantoro dkk. (2015)

Gambar 48. Penampang Ideal Ekosistem Pantai Sepanjang Pantai Barat Teluk Lampung dari Kunjir Hingga Canti



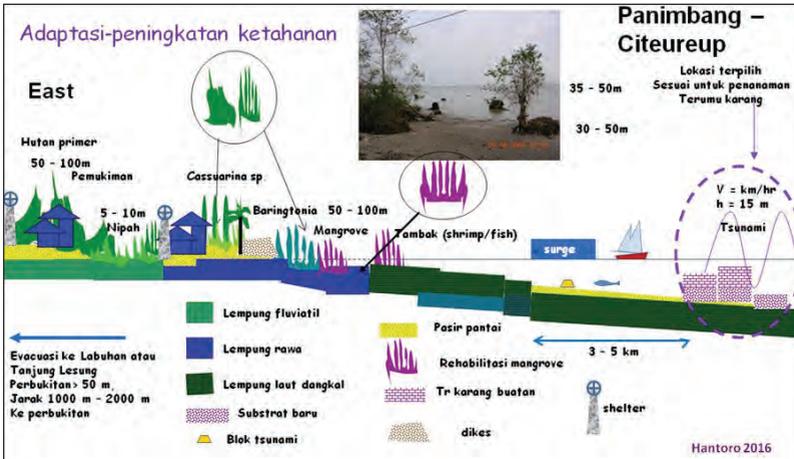
Sumber: Hantoro dkk. (2015)

Gambar 49. Penampang Ideal Ekosistem Ruas Pantai Merak-Pulau Rida dan Sekitarnya (Oktober 2015) dan Run Up Tsunami pada 1883 (>25 m)



Sumber: Hantoro dkk. (2015)

Gambar 50. Penampang Ideal Ekosistem Pantai Anyer dan Sekitarnya (kondisi Oktober 2005) dan *Run Up* Tsunami pada 1883 (> 25 m)



Sumber: Hantoro dkk. (2015).

Gambar 51. Penampang Ideal Ekosistem Perairan Pesisir Kawasan Panimbang yang Diwakili oleh Mangrove di Lahan Basah dan Sebagian di Pantai

Buku ini tidak diperjualbelikan.

1. Meteorologi sejak 30 tahun silam

Dari data meteorologi suatu pulau, dapat diperoleh informasi tentang dinamika lingkungan, neraca hidrologi, dan potensi bencana yang mengancam dalam bentuk kejadian cuaca ekstrem. Data sebaiknya disajikan dalam bentuk luasan sehingga dapat dengan tepat menggambarkan keadaan meteorologi pulau yang dimaksud. Dengan kurun waktu sepanjang 30 tahun, diharapkan tercatat sinyal kejadian di luar kelaziman, baik itu anomali, perulangan, maupun yang muncul ekstrem. Dari data ini juga dapat diketahui hubungan antara keadaan meteorologi dan beberapa kejadian bencana yang tercatat melanda pulau dalam bentuk apa pun.

2. Kondisi perairan (pasut, arus, gelombang) sejak 30 tahun silam

Dari data pasut yang telah diperiksa dan dianalisis statistiknya, dapat diketahui apakah terjadi perubahan pola perubahan tinggi muka air laut yang diakibatkan oleh berbagai gejala. Korelasi dan perbandingan data ini dengan data lain dapat memberi penjelasan tentang terjadinya perubahan pola pasut akibat gejala lain, misalnya perubahan posisi astronomis berpengaruh pada gaya tarik antarbenda angkasa, lalu menyebabkan pasang surut. Analisis lebih lanjut juga dapat mengungkapkan apakah terjadi perubahan pola ketinggian relatif daratan terhadap muka laut yang berkaitan dengan gerak dari daratan oleh berbagai sebab. Data pasut juga dapat mengungkapkan adanya perubahan tinggi muka laut akibat gejala anomali cuaca.

3. Topografi dan batimetri resolusi tinggi

Datum dari data ini telah ditentukan di beberapa tempat di Indonesia. Setiap perubahan oleh kejadian apa pun, besarnya dapat diketahui melalui berbagai metode pengukuran sesaat atau pencatatan/pemantauan menerus. Perbandingan antara data ini dan berbagai data lain dapat mengungkap gejala yang sedang berlangsung. Analisis untuk memisahkan dan mengukur besaran tiap gejala mempunyai metode masing-masing. Rumus atau

algoritma metode itu pun terus disempurnakan untuk mencapai ketelitian yang semakin baik.

4. Geohidrologi dan stratigrafi

Data geohidrologi, termasuk stratigrafi, diperlukan sebagai latar belakang keadaan dan dinamika lingkungan bekerja di suatu pulau yang terbentuk dengan beragam cara. Berdasarkan cara pembentukannya, pulau memiliki geologi dan batuan penyusun yang berbeda. Data ini menjelaskan mengenai ketahanan pulau secara fisik dan kemampuan menerima imbuhan berupa resapan air meteorik yang menjadi satu-satunya unsur daur hidrologi air tawar pulau. Pengukuran teliti sifat fisik geologi berikut data mengenai hidrologi pulau dapat menghasilkan daya dukung lestari air tawar di pulau kecil. Geologi dan stratigrafi pulau juga penting artinya bagi upaya mitigasi, adaptasi, pemulihan, dan peningkatan ketahanan pulau dalam menghadapi bahaya kejadian ekstrem dan perubahan lingkungan akibat berbagai gejala alam maupun antropogenik.

5. Biologi ekosistem perairan

Beberapa ekosistem dengan biota penyusunnya di pesisir dan pantai telah terbukti berperan sebagai pelindung pantai dari beberapa kejadian ekstrem. Terumbu karang sebagai terumbu penghalang (*barrier reef*) di lepas pantai maupun rata-rata terumbu tepi (*fringing reef*) terbukti berhasil menjinakkan gelombang yang memecah ketika melewati ekosistem tersebut. Limpasan pecahan gelombang yang masih memiliki energi kinetik besar terhambat masuk lebih jauh ke daratan oleh keberadaan mangrove dan hutan tropis pesisir. Tegakan di lahan basah, seperti pohon nipah dan sagu, berperan sebagai penahan atau hambatan gerak massa air pecahan gelombang yang masuk ke pantai.

6. Astronomi (pasut)

Data atau tepatnya model pasut astronomis memberikan latar belakang dalam pemeriksaan ketinggian muka laut pada waktu

tertentu. Dengan demikian, diketahui nilai sebenarnya dari perubahan relatif muka laut terjadi.

7. Catatan kejadian ekstrem

Informasi mengenai kejadian ekstrem dapat berupa catatan yang dibuat pihak terkait, peneliti, atau masyarakat. Informasi ini diperlukan sebagai klarifikasi temuan kejadian ekstrem yang sinyalnya dapat terbaca pada data lain, termasuk yang diperoleh dari alam berdasarkan analisis contoh yang merekamnya.

8. Kependudukan

Bila pulau berpenghuni, data kependudukan mutlak dilengkapi untuk berbagai upaya, mulai dari menghitung neraca hidrologi, tekanan pada lingkungan, hingga keperluan data mengenai bagaimana suatu bahaya dan bencana dihadapi dan diatasi dampaknya dan biaya yang diperlukan untuk itu. Informasi sosial budaya dan pendidikan masyarakat diperlukan guna merancang upaya sosialisasi dan diseminasi pemahaman mengenai bencana dan peningkatan ketahanan serta adaptasi terhadap risiko dampak kejadian ekstrem yang dihadapi.

9. Keberadaan dan kondisi prasarana di kawasan studi

Penempatan sarana perlindungan dan penyelamatan saat tahap tanggap darurat harus dirancang dengan tepat sehingga tercapai efisiensi dan daya guna maksimal. Demikian halnya sarana dalam bentuk rancangan teknik maupun pengembangan ekosistem perlindungan. Ruang dan fungsinya harus sesuai dengan tujuan pembuatan.

10. Data dan informasi

Ketelitian data tergantung pada bagaimana pemutakhiran informasi mengenai gejala pemicu bahaya. Pemutakhiran ini sebaiknya tidak hanya dilakukan dengan penyusunan peta dua dimensi, namun juga dalam bentuk tiga dimensi, mengingat informasi ini diperlukan sebagai dasar penghitungan besaran bencana dan kerugian.

11. Kondisi lingkungan dan perubahannya
Walaupun sangat jarang dan sulit diperoleh, beberapa pulau memiliki informasi mengenai pemerian keadaan lingkungan pada suatu waktu tertentu. Informasi ini didapat dari hasil penelitian yang pernah dilakukan. Adakalanya informasi tersebut hanya tentang unsur tertentu dari lingkungan. Namun, informasi ini tetap bermanfaat sebagai acuan dalam melakukan analisis kesenjangan.
12. Sistem pengelolaan air tawar
Data diperlukan untuk mengetahui bagaimana dan berapa besar sumber daya air tawar permukaan maupun air tanah dangkal yang dipergunakan dalam satuan waktu tertentu. Dari data ini dapat diketahui neraca dan proyeksi sumber daya air tawar sehingga ambang batasnya juga dapat diketahui. Dengan demikian, berbagai upaya pelestarian pengelolaannya dapat dilakukan.
13. Informasi mengenai tata ruang dan regulasi lainnya
Informasi ini sangat penting dalam upaya penataan secara menyeluruh karena perlu diselaraskan antara upaya rehabilitasi hingga penguatan ketahanan dan rencana penataan-pengelolaan pulau kecil.

G. BATASAN DAN KENDALA

Upaya penyusunan naskah ini bertujuan untuk mencari model yang tepat untuk menggambarkan upaya penanganan masalah kawasan landai pesisir dan pulau kecil. Gambaran penanganan masalah akan semakin baik bila data yang diperlukan semakin lengkap. Sering kali syarat yang dikemukakan tersebut tidak semuanya dapat diperoleh.

Salah satu pendekatan dalam memperoleh gambaran adalah melalui penyusunan beberapa formulasi untuk mengetahui indeks dan besaran yang berkaitan dengan kondisi ekstrem muka laut tinggi. Salah satu pemicu ancaman bahaya muka laut tinggi sebagai benang merah masalah kawasan tersebut terhadap kejadian ekstrem adalah gangguan cuaca dan iklim global. Walaupun telah dikenali jenis-jenis

kejadian alam ekstrem yang memicu naiknya muka laut yang berpotensi menghasilkan bencana, belum seluruh jenis yang telah dikenali dapat digambarkan bagaimana kejadian itu mulai muncul menjadi bahaya dan besaran yang dicapainya. Bahan penyusunan formula-formulasi tersebut beragam jenis dan kualitasnya. Bahan penyusun tersebut juga berubah secara dinamis sesuai gejala yang menghasilkannya sehingga formulasi ini tidak cukup didasarkan pada data kondisi sesaat dan pengandaian statis pada kejadiannya belaka. Batasan kedalaman dan kerumitan formulasi numerik untuk menggambarkan dinamika kejadian pada penulisan tahap sekarang. Selain batasan pada kerumitan formulasi, perlu batasan pada kedalaman dan keragaman pembahasan yang berkaitan dengan jenis dan keragaman (jumlah) data.

Kendala yang dihadapi pada dasarnya berkaitan dengan bagaimana data dapat dikumpulkan dengan cepat dan tanpa mengeluarkan biaya besar. Kendala ini dapat diatasi dengan membangun sistem pemantauan terus-menerus (*Online Continuous Realtime Monitoring System*). Sistem tersebut bermanfaat guna menentukan dan membuat model berdasarkan suatu kawasan yang dapat mewakili daerah lain. Bila sistem yang dihasilkan ini (model numerik statik) akan ditingkatkan menjadi model numerik dinamik, masih diperlukan tenaga khusus untuk menangani pemodelan hingga tingkat DSS (sistem penunjang penentuan kebijakan) atau sistem ahli (*expert system*).

A. DINAMIKA ALAM DAN KERENTANAN-KETAHANAN

Wilayah Indonesia terdiri atas untaian pulau besar dan kecil yang terletak di perairan dangkal dan laut dalam sebagai hasil dari proses geologi konvergensi kerak samudra dan lempeng benua. Proses pembentukan dan letaknya di antara dua samudra dan benua besar, menghasilkan sumber daya alam dan lingkungan yang beraneka ragam. Proses alam tersebut menghasilkan keragaman gejala alam yang berperan sebagai pemicu kejadian ekstrem. Pemahaman lebih baik mengenai kondisi dan daya dukung (sumber daya) alam hingga dinamika alam yang berpotensi memberi ancaman perlu diusahakan. Pemahaman tersebut akan membantu dalam memahami perilaku dan kecenderungan kejadian ekstrem. Jika perilaku dan kecenderungan kejadian ekstrem dapat dipahami, penyusunan rencana dan pengelolaan ruang dan sumber daya di kawasan perairan, pesisir, dan pulau kecil dapat dilakukan secara optimal. Dengan demikian, perencanaan tata ruang yang dihasilkan memiliki ketahanan yang tinggi terhadap kejadian ekstrem.

Skenario penanganan masalah di pulau kecil dapat disusun berdasarkan pemahaman gejala dan dinamika alam yang memberi

ancaman berupa kejadian ekstrem, khususnya yang berkaitan dengan tinggi muka laut yang dipicu oleh beberapa gejala alam. Dari skenario tersebut, dapat dikembangkan aspek pengelolaan sumber daya alam dan lingkungan yang berkelanjutan dan berdaya tahan terhadap bahaya dan bencana. Tata cara pengelolaan berkelanjutan tersebut menjadi dasar bagi upaya penataan ruang yang penerapannya tidak mencederai alam dan kehidupan yang bergantung padanya. Cedera-nya keseimbangan alam akan merusak kemampuan alam untuk memulihkan diri dan akan menjadi bencana bagi lingkungan serta kehidupan makhluknya. Dalam banyak hal, terlampauinya daya dukung alam karena eksploitasi untuk keperluan manusia menjadi awal petaka bagi ekosistem dan kehidupan makhluk lain.

B. MITIGASI DAN ADAPTASI TERHADAP ANCAMAN BAHAYA KEJADIAN EKSTREM

Skenario mitigasi dan adaptasi kawasan landai pesisir dan pulau kecil dalam menghadapi ancaman bahaya muka laut tinggi dari berbagai pemicu kejadian ekstrim, disusun berdasarkan pada gejala alam yang memicu kejadian ekstrem dan memberi ancaman bahaya. Sebagai contoh, harus mempunyai dan diterapkan, suatu skenario dalam menghadapi ancaman bahaya gelombang tinggi, sejak dari meningkatkan pemahaman dan kewaspadaan semua pihak hingga kelengkapan menghadapi dan mengatasi-memulihkan dari dampak bencana. Menghadapi gelombang tinggi, ekosistem pantai harus dipulihkan dan diperkuat, dilengkapi tanggul buatan untuk mengurangi ancaman bahaya hempasan gelombang selain jalur evakuasi dan bangunan perlindungan/pengungsian. Menghadapi ancaman genangan pesisir karena penurunan daratan karena pemampatan sedimen di cekungan, dilakukan upaya pembuatan tanggul dan mengatasi penyebab penurunan, antara lain eksplotasi berlebih air tanah.

Tata ruang dan program pembangunan daerah merupakan peluang dan cara intervensi agar model penanganan masalah pengurangan kerentanan dan peningkatan ketahanan kawasan landai pesisir pulau kecil dapat ditangani. Berdasarkan model dari daerah yang umumnya memiliki aspek khusus tersebut, dapat dirancang model

dan prosedur untuk tingkatan lebih luas sehingga dapat dijadikan acuan pengembangan model di kawasan lain yang juga unik dalam gejala dan kondisi alam.

Strategi penanganan masalah melalui adaptasi maupun mitigasi harus disusun berdasarkan kajian utuh. Kajian ini dimulai dari mengetahui potensi dan daya dukung sumber daya alam-lingkungan suatu kawasan yang meliputi kawasan dari darat (pegunungan-hulu) hingga perairan lepas (hilir-pesisir, perairan). Diperlukan pemahaman mengenai dinamika alam yang berlangsung saat ini, dahulu, dan prakiraan masa mendatang sebagai bagian dari perencanaan dan mitigasi-adaptasi suatu ruang yang akan dikelola untuk menghadapi perubahan.

Pemanasan global diperkirakan memberi dampak yang lebih rumit dinamikanya terhadap perairan di Indonesia, mengingat letaknya di antara benua dan samudra besar. Sementara itu, fisiografi di kawasan ini memiliki dinamika perairan yang sangat peka terhadap perubahan sirkulasi energi lokal. Dampak umum, seperti naiknya muka laut, asidifikasi, dan naiknya suhu perairan, akan diikuti kerusakan biota perairan dan pesisir.

Secara umum, kerentanan lebih tinggi akan dialami oleh kawasan pesisir yang memiliki populasi dan permukiman padat dengan kegiatan manusia yang tinggi, dibandingkan pulau-pulau kecil landai dan dekat permukaan laut yang jumlah dan kepadatannya relatif rendah. Dari segi ketersediaan air bersih, pulau kecil yang hanya memperoleh air tawar meteorik, menyandang kerentanan sangat tinggi dibandingkan pesisir pulau besar yang masih dapat mengandalkan air dari bagian hulu. Pada kenyataannya, pulau kecil dan kawasan pesisir landai merupakan tempat pertumbuhan kependudukan dan sosial ekonomi yang lebih cepat dibandingkan dengan kawasan yang berada di hulu atau pedalaman.

Pemahaman lebih baik mengenai dinamika interaksi atmosfer, lautan, darat, dan biota harus diupayakan agar mampu merencanakan dan mengelola sumber daya alam dan lingkungan di suatu kawasan yang semakin rentan terhadap kejadian ekstrem. Berdasarkan pemahaman tersebut, upaya adaptasi maupun mitigasi, yakni penataan

ruang, dapat dilakukan semaksimal mungkin dan menyeluruh antara kawasan daratan, pesisir, perairan dan pulau kecil, tanpa terkendala batas administrasi pemerintahan.

Teknologi yang lebih baik dalam pemantauan (*real time*) dan prediksi dapat membantu memahami perangai kejadian ekstrem. Dengan demikian, pendekatan adaptasi yang tepat guna mengurangi ancaman dan kerugian dari bahaya kejadian ekstrem dapat disiapkan. Sistem pemantauan yang menghasilkan data dalam jumlah sangat besar ini harus dikelola dan dapat dimanfaatkan bersama secara terbuka demi kemaslahatan bersama.

Upaya penerapan model pendekatan mitigasi dan adaptasi pada gangguan iklim global dan kejadian ekstrem, walaupun telah dirancang sebaik mungkin, tidak akan terwujud bila tidak didukung oleh semua pemangku kepentingan. Pemahaman konsep mitigasi dan adaptasi perlu dimiliki oleh semua pemangku kepentingan. Oleh karena itu, diperlukan cara penyajian konsep dengan muatan dan kemasan yang mudah dipahami agar dapat dimengerti secara mendalam dan mudah dilaksanakan.

Berdasarkan model mitigasi dan adaptasi di kawasan pulau kecil dan pesisir landai di Indonesia, dapat dikembangkan model-model lain untuk peningkatan ketahanan ketersediaan sumber daya alam dengan cara pemulihan dan perlindungan ekosistem. Ekosistem yang menjadi bagian dari potensi sumber daya alam tidak sekadar memberi perlindungan, namun juga menjadi sumber mata pencaharian baru sehingga dapat meningkatkan ketahanan sosial ekonomi masyarakatnya.



DAFTAR PUSTAKA

- Aldrian, E., Karmini, M., dan Budiman. 2011. *Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim di Indonesia*. Jakarta: Pusat Perubahan Iklim dan Kualitas Udara, Kedeputan Bidang Klimatologi, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- Anwar, H. Z., dan H. Harjono. 2011. "Pengurangan Risiko Bencana Alam dan Degradasi Lingkungan di Indonesia." Dalam Herryal Z. Anwar dan Herry Harjono (ed.), *Perspektif terhadap Kebencanaan dan Lingkungan di Indonesia: Studi Kasus dan Pengurangan Dampak Risiko*. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Bailey, R. 2009. "Sea Level Rise Spells Increased Likelihood of Disaster for the World's Poorest People. Oxfam International. <https://www.oxfam.org/en/pressroom/pressreleases/2009-03-10/sea-level-rise-spells-increasedlikelihood-disaster-worlds>.
- Birkmann, J. 2007. "Risk and Vulnerability Indicators at Different Scales: Applicability, Usefulness, and Policy Implications." *Environmental Hazard* 7(1): 20–31.
- Bishop, Stephen. 2011. "China Rising Sea Level Trigger Disaster." Diakses dari <http://stephenbishop.china-rising-sea-level-trigger-disaster/>.
- BMKG. 2011. Pembagian mintakat hujan di Benua Maritim Indonesia. Jakarta: BMKG.
- BMKG. 2014. "Citra Terkini". Diakses pada 25 Januari 2014 dari satelit.bmkg.go.id/BMKG.

- BMKG. 2015. *Metsat Enhance: Satelit Cuaca Wilayah Indonesia dan Sekitarnya*. Jakarta: BMKG.
- Bollin, C., C. Cardenas, H. Hahn, dan K. S. Vatsa. 2003. *Disaster Risk Management by Communities and Local Governments*. Washington, DC, USA: Inter-American Development Bank.
- Chaussard, E., F. Amelung, H. Abidin, dan S. H. Hang. 2013. "Sinking Cities in Indonesia: ALOS PALSAR Detects Rapid Subsidence Due to Groundwater and Gas Extraction." *Remote Sensing of Environment* 128: 150–161. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015>.
- Fahrenthold, D.A. 2007. "As Sea Level Rises, Disaster Predicted for Va. Wetlands." *Washington Post*, 7 Juni 2007. <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2007/06/06/AR2007060602479.html>.
- Google Maps. 2017. "Peta Laut Bagian Barat Pulau Jawa." Diakses pada 2 Agustus 2016 dari <https://www.google.com/maps/@-4.9952635,106.8488038,654311m/data=!3m1!1e3>.
- Google. (2017). [Google maps of Indonesia 2018]. Diakses pada ? dari <https://www.google.com/maps/@6.1990245,133.55739,249634m/data=!3m1!1e3>.
- Hall, R. 2009. Southeast Asia's changing palaeogeography. *Blumea-Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants*, 54(1–2): 148–161.
- Handayani, L., 2012. (Pers.comm.). Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI
- Hantoro W.S., A. Situmorang, L. Subehi, Firmansyah, D. Syamsi, A. Yoganingrum, D. Munandar, Djupriono, Suyatno, O. Mahendra, J. Lekalet, 2017c. "Ketahanan dan Daya saing SD Alam-Lingkungan Masyarakat Pesisir Landai Pulau Kecil Terhadap Kejadian Ekstrem Alamiah dan Antropogen: Sintesa Kawasan Strategis." Laporan Program Unggulan LIPI 2017. Jakarta: LIPI.
- Hantoro W.S., Arsadi M.E., Suherman D., Aziz M.F., Suyatno, Kosasih E., 2017a. *Mitigasi, Adaptasi dan Peningkatan Ketahanan Wilayah Pesisir dan Pulau Kecil Landai terhadap Bahaya Kejadian Ekstrem Geologi serta Gangguan Iklim: Kasus Pulau Biak dan Kepulauan Padaido*. Bandung: Penerbit Halima.
- Hantoro W.S., M.R. Djuwansah, E. Soebowo, D. Suherman, M.F. Aziz, T.A. Soeprapto, Suyatno, Kosasih E., 2017b. *Kerentanan-Ketahanan Pesisir dan Pulau Kecil Landai: Adaptasi dan peningkatan Ketahanan serta Daya Saing (Kepulauan Aru)*. Bandung: Penerbit Halima.

- Hantoro, W. S. 2006. "Climate-Environment and Extreme Event Since The Last Glacial Maximum: Human Occupation and Dispersal Pattern in Indonesian Maritime Island." Dalam *Archaeology: Indonesian Perspective: RP Soejono's Festschrift*, diedit oleh Truman Simanjuntak, M. Hisyam, Bagyo Prasetyo, dan Titi Surti Nastiti. Jakarta: LIPI Press.
- Hantoro, W. S. 2012. "Konsep Bencana, Rehabilitasi, Adaptasi, dan Peningkatan Ketahanan Wilayah Pesisir dan Pulau Kecil di Indonesia Menghadapi Ancaman Kejadian Ekstrem Muka Laut Tinggi." Dalam *Bunga Rampai Ketahanan Wilayah: Demi Terwujudnya Percepatan Pembangunan Ekonomi yang Berwawasan Lingkungan*, diedit oleh Anto Tri Sugiarto, Marsudi Wibowo, dan Dyna Sri Andriyani. Jakarta: LIPI Press.
- Hantoro, W. S. 2016. *Paparan Tepi Kontinen Sunda: Peran pada Dinamika Lingkungan dan Kehidupan Masa Lampau Sekitar Busur Kepulauan Indonesia*. Diedit oleh Suharsono, Zainal Arifin, Susilohadi, Haryadi Permana dan Hamzah Latif. Bandung: Penerbit Halima.
- Hantoro, W. S., A Situmorang, L. Subehi, Soehardjono, dan F. Irianto. 2014. "Ketahanan Daya Saing SDA-Lingkungan dan Masyarakat Berdasar Pengelolaan Lestari Ekosistem Pesisir Landai Pulau Kecil Perbatasan: Sintesa Pengelolaan Terpadu Sumber Daya Alam dan Lingkungan." Laporan Program Kompetitif LIPI. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Hantoro, W. S., dan M. R. Djuwansah. 2014. "Peningkatan Ketahanan Masyarakat serta Lingkungan Kawasan Landai Pesisir Pulau Kecil dan Terdepan terhadap Kondisi Ekstrem atau Bencana Gangguan Iklim dan Geologi: Konsep Adaptasi Melalui Pendekatan Alamiah." *Membangun Strategi Adaptasi Perubahan Iklim*, diedit oleh Heru Santosa. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Hantoro, W. S., E.M. Arsadi, D. Suherman, M. F. Azis, E. Kosasih, dan Suyatno. 2012. "Rehabilitasi, Adaptasi dan Peningkatan Ketahanan Wilayah Pesisir dan Pulau Kecil Landai terhadap Bahaya Kejadian Ekstrem Geologi Maupun Gangguan Iklim: Kasus Pulau Biak dan Kepulauan Padaido." Laporan Hasil Penelitian LIPI. Bandung: Puslit Geoteknologi LIPI.
- Hantoro, W. S., H. Latief, A. Susilohadi, A. Gusman, A. Hidayat, A. Suminar, dan A. Y. Airlangga. 2006. "Volcanic Tsunami Hazard of Krakatau: Run up and Travel Time Model for its Mitigation in Sunda Strait." *Geological Hazard and Its Mitigation*. International Seminar, Mei 2006. Yogyakarta, Indonesia.

- Hantoro, W. S., L. Hamzah, P. Haryadi, Susilohadi, M. D. Rahman, H. Gunawan, E. Subowo, M. A. Furqon, D. Syamsi, A. Yoganingrum, Y. Latief, Suyatno, dan Djupriono. 2015. “Kerentanan dan Ketahanan Kawasan terhadap Kejadian ekstrem Alamiah dan Dampak Antroposen.” Laporan Penelitian Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Hantoro, W. S., M. R. Djuwansah, E. Sebowo, M. F. Azis, T. A. Soeprapto, A. Fadhilah, E. Kosasih, dan Suyatno. 2012. “Kerentanan Pesisir Pulau Kecil Landai Kepulauan Aru terhadap Muka Laut Tinggi Kejadian Ekstrem. *Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI*. Bandung: Puslit Geoteknologi LIPI.
- Hantoro, W. S., S. Hadiwisastra, E. M. Arsadi, A. Masduki, H. Latif, Suyatno, dan E. Kosasih. 2008. “Air Tawar di Pulau Kecil Terumbu Karang Derawan di Kalimantan Timur: Contoh Masalah dan Antisipasi terhadap Kenaikan Muka Laut Global.” Dalam *Kenaikan Muka Laut Relatif dan Kerentanan Wilayah Pesisir dan Pulau-pulau Kecil di Indonesia: Status Report Hasil-hasil Penelitian*. Jakarta: Pusat Riset Wilayah Laut dan Sumber Daya Non-hayati hayati (Balai Riset dan Observasi Laut-DKP).
- Hantoro, W. S., T. A. Suprpto, S. Hadiwisastra, H. Latif, A. Y. Airlangga, L. Handayani, E. M. Arsadi, A. Masduki, Suyatno, dan E. Kosasih. 2008. “Perubahan Muka Air Laut Global di Indonesia: Ancaman Bencana bagi Wilayah Pesisir dan Pulau Kecil (Contoh Kasus Perairan Berau Tektonik Tarikan).” Dalam *Kenaikan Muka Laut Relatif dan Kerentanan Wilayah Pesisir dan Pulau-pulau Kecil di Indonesia: Status Report Hasil-hasil Penelitian*. Jakarta: Pusat Riset Wilayah Laut dan Sumber Daya Non-hayati (Balai Riset dan Observasi Laut-DKP).
- Happ, E. 2011. “Climate Disaster, Declining Rainfall, Rising Sea Levels.” <https://climatechange1.wordpress.com/2011/09/19/climate-disaster-declining-rainfall-rising-sea-levels/>.
- Happ, E., 2011. Climate disaster, declining rainfall, rising sea levels. <http://wattsupwiththat.com/2011/09/13/climate-disaster-declining-rainfall-rising-sea-levels/>
- Hastenrath, S. 1994. “Climate Dynamics of the Tropics.” Atmospheric Sciences Library Vol. 8. Netherlands: Kluwer Academic Publisher. <https://www.google.com/search?q=world+map+cyclone+track&client=firefox->
- IPCC. 2007. “IPCC Forum Document 2007.”
- IRI/LDEO. 2019. “SOURCES: The IRI/LDEO Collection of Climate Data.” Diakses pada Maret 2017 dari iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.

- Keim, M. E. 2010. "Sea-level-rise Disaster in Micronesia: Sentinel Event for Climate Change?" *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 4(1): 81–87.
- LAPAN. 2007. "Citra Satelit Multi Kanal Daerah Kepulauan Aru Bagian Utara."
- Lassa, J. A. 2011. "What are the Roles of Civil Society in Governing Disaster Reduction in Indonesia." Dalam *Perspektif terhadap Kebencanaan dan Lingkungan di Indonesia: Studi Kasus dan Pengurangan Dampak Risiko Vol. 1*, diedit oleh Herryal Z. Anwar dan Herry Harjono. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Latief, H. 2014. Model Kecenderungan Muka Laut Estatik Dampak Pemanasan Global. [pers comm].
- Latief, H. (2014). Peta sebaran pusat gempa bumi di Indonesia.... [pers comm].
- Latief, H. in Hantoro W. S., A Situmorang, L. Subehi, Soehardjono, dan F Irianto. 2014. "Ketahanan Daya Saing SDA Lingkungan dan Masyarakat Berdasar Pengelolaan Lestari Ekosistem Pesisir Landai Pulau Kecil Perbatasan: Sintesa Pengelolaan Terpadu Sumber Daya Alam dan Lingkungan." Laporan Program Kompetitif LIPI. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Latief, H. 2002. Inpress. Tsunami assesment around the Banten Bay.
- Latief, H. 2009. Peta Rata-rata Ketinggian Gelombang di Indonesia.
- McGeown, K. 2009. "Rising Sea Levels: A Tale of Two Cities." *BBC News*, 24 November 2009. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8369236.stm>.
- McGeown, K. 2009. "Rising Sea Levels: A Tale of Two Cities." *BBC News*, 24 November 2009. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/africa/8363045.stm>.
- Merriam Webster. 2019. "Hazard." Terakhir diperbarui 2019. <http://www.merriam-webster.com/dictionary/hazard>.
- Mosher, Dave. 2017. "A New Satellite is Recording Unprecedented Views of Deadly Storms and Tornadoes from Space." *Business Insider*, 5 April 2017. <https://sg.news.yahoo.com/satellite-recording-unprecedented-views-deadly-221400414.html>.

- NASA-SRTM. 2007. "NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Version 3.0 Global 1 arc second Data Released over Asia and Australia." Terakhir diperbarui 24 Agustus 2017. <https://earthdata.nasa.gov/nasa-shuttleradar-topography-mission-srtm-version-3-0-global-1-arc-second-datareleased-over-asia-and-australia>.
- Nilfanion. 2006. Global Tropical Cyclone Tracks-edit2.jpg. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Global_tropical_cyclone_tracks-edit2.jpg.
- Nugroho, 2012. (pers.comm.) Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Nullschool. 2014. "Earth a Global Map of Wind, Weather, and Ocean Condition." <https://earth.nullschool.net/>.
- OCHA PDSB. 2011. *Policy Development and Studies Branch*. UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. ochapolicy@un.org.
- Pemerintah Daerah Kabupaten Kepulauan Aru. 2012. "RTRW Kabupaten Kepulauan Aru" (draf). Bappeda Kabupaten Kepulauan Aru. Publikasi Terbatas.
- Prawiwardoyo, Susilo. 1996. *Meteorologi*. Bandung: ITB.
- Pusat Survei Geologi. 2007. *Atlas: Pengelompokan Pulau Kecil Berdasarkan Tektonogenesis untuk Perencanaan Tata Ruang Darat Laut dan Dirgantara Nasional*. Bandung: Pusat Survei Geologi, Badan Geologi Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Sahala, S. A. H., dan M. B. F. Bisri. 2011. Perencanaan Tata Ruang Berbasis Kebencanaan di Indonesia. Dalam *Perspektif terhadap Kebencanaan dan Lingkungan di Indonesia: Studi Kasus dan Pengurangan Dampak Risiko*, diedit oleh Herryal Z. Anwar dan Herry Harjono. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Setiadi, N. J. 2011. "Establishment of an Effective People Center Tsunami Early Warning by Understanding People's Behavior and Needs: Case study of Padang West Sumatra." Dalam *Perspektif terhadap Kebencanaan dan Lingkungan di Indonesia: Studi Kasus dan Pengurangan Dampak Risiko*, diedit oleh Herryal Z. Anwar dan Herry Harjono. Bandung: Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI.
- Simkin, Tom, dan Richard S. Fiske. 1983. *Krakatau 1883 Eruption and its Effects*. Washington D.C: Smithsonian Institution Press.
- The Weather Channel. 2014. "Radar Map." Diakses pada 25 Januari 2014 dari weather.com/weather/radar/interactive/l/-6.23,106.83.

- The Weather Company. T.t. "Current Surface." Diakses pada? dari <https://weather.com/maps/currentusweather>
- Thiruvananthapuram. 2011. "Rise in the Level of Indian Ocean may Spell Disaster." Sea Level Rise Foundation. Diakses dari <http://sealevelrise.blogspot.com/2010/01/rise-in-level-of-indian-ocean-may-spell.html>.
- Unosat, 2005. <https://www.un.org/News/dh/infocus/Tsunami/tsunami-flashappeal.pdf>.
- World map cyclone track 2017. <https://weather.com/maps/currentusweather>
- Yoganingrum, A., I. Maryati, dan Rr. S. R. R. Endang. 2013. "Kendala pada Pelayanan Informasi Melalui *Short Message Service* (SMS) untuk Masyarakat Perdesaan." *Jurnal Masyarakat & Budaya* 15(2): 1–23.
- Yoganingrum, A., I. Maryati, M. Y. Rezaldi, dan W. S. Hantoro. 2012. "Kebutuhan dan Media Informasi Pengelolaan Air Tawar Masyarakat Pulau Kecil di Kabupaten Kepulauan Seribu." *Jurnal IPTEK KOM* 14 (2): 151–164.



INDEKS

- Adaptasi, 25, 30, 37, 44, 45, 63, 86, 91, 98, 99, 100, 101, 104, 105, 106, 107, 108, 110, 111, 112, 121, 122, 127, 128
- Akuifer, 77
- Anomali, 2, 12, 39, 51, 53, 60, 120
- Anthropogen, 2
- Antisipasi, 91
- Antroposen, 28, 77, 94, 105
- Asia, 3, 4, 6, 9, 12, 19
- Astronomi, 121
- Australia, 3, 4, 6, 9, 12, 19, 92

- Baringtonia, 61, 111, 116
- Barrier reef, 103
- Bentik, 61, 68
- Benua Maritim Indonesia, 3
- Besaran bahaya, 44, 57, 58, 59, 65, 66, 67, 69, 85, 86, 87, 94, 101, 110
- Besaran bencana, 44, 66, 67, 69, 71, 83, 86, 87, 89, 106, 122
- Besaran kejadian, 15, 53, 57, 58, 59, 63, 65, 66, 69, 86, 87, 104, 108, 111

- Biologi, 86, 89, 92
- BMKG, 6, 7, 10, 11

- Cassuarina equisetifolia, 49, 103, 116
- CC, 70, 71, 92, 107
- Coping capacity, 107

- DAS, 5
- Deformasi, 15, 21, 40, 49
- Delta, 5, 13, 23, 56, 60, 61, 67, 68, 102
- DSS, 124

- Eksogen, 19, 29, 45
- Emperor of China, 40
- Endogen, 19, 39, 45
- ENSO, 53, 60
- ESTP, 114
- Eustatik, 2, 15, 17, 18, 19, 41, 47, 60, 73, 77, 78, 79, 80, 86
- Evakuasi, 26, 30, 41, 111, 112

- Fauna, 3, 61, 68
- Flora, 3

Buku ini tidak diperjualbelikan.

- Focal point, 21
- Fringing reef, 121
- Geohidrologi, 121
- Geologi, 4, 12, 15, 19, 20, 23, 24, 28, 29, 39, 45, 47, 49, 50, 51, 53, 54, 60, 73, 77, 82, 89, 92, 121, 125
- Global Conveyor Belt, 12
- Gunung api, 4, 19, 20, 29, 39, 40, 73, 77, 113
- IGOSS, 10
- Indeks kerentanan, 58, 59, 61, 68, 85, 106
- Infratidal, 61, 68
- Inner basin, 19
- Inter Tropical Convergent Zone, 4
- IOD, 53
- IPCC, 15, 16, 25, 39, 77, 80, 89
- ITCZ, 4, 6
- Jalur evakuasi, 26, 41, 111
- Jangkauan air laut, 55, 56
- Kejadian ekstrem, 2, 3, 5, 9, 12, 13, 23, 26, 28, 33, 37, 38, 39, 41, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 51, 53, 54, 65, 69, 71, 73, 74, 95, 97, 98, 101, 105, 106, 107, 110, 112, 113, 114, 115, 121, 122, 123, 125, 126, 127, 128
- Kerentanan, 2, 12, 18, 24, 25, 26, 27, 30, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 45, 46, 47, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 68, 69, 70, 73, 76, 85, 86, 89, 91, 95, 104, 106, 107, 108, 126, 127
- Ketahanan, 10, 12, 25, 27, 32, 36, 42, 43, 45, 46, 47, 49, 58, 59, 85, 97, 98, 99, 100, 104, 105, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 121, 122, 123, 125, 126, 128
- Landsat ETM, 88
- LAPAN, 10
- Laut Banda, 3, 4, 5, 6, 32, 40, 49, 92
- Local wisdom, 111
- Mangrove, 5, 27, 36, 37, 38, 39, 42, 49, 56, 58, 59, 60, 61, 67, 98, 101, 102, 103, 111, 116, 121
- Meteorologi, 9, 15, 45, 48, 49, 120
- Mikroplastik, 42
- Milankovitch, 53, 54
- Mitigasi, vi, 44, 45, 97, 98, 99, 110, 112, 121, 127, 128
- MJO, 53, 60
- Model simulasi, 73, 87
- NASA, 4, 50
- Neraca hidrologi, 6, 53, 120, 122
- NKRI, 32
- Paparan Sunda, 31
- Pelagik, 61, 68
- Pemanasan global, 2, 15, 16, 17, 19, 38, 39, 41, 51, 77, 89, 112
- Pematang pantai, 67, 115
- Pemutakhiran data, 71
- Penunjaman, 19, 20, 24, 40, 49, 54, 94
- Pesisir landai, 2, 5, 6, 9, 10, 18, 26, 28, 29, 32, 35, 37, 38, 39, 48, 51, 56, 97, 99, 100, 113, 114, 127, 128
- Porites sp., 115

- Pulau kecil, vi, ix, x, xv, xvii, xviii,
2, 5, 6, 9, 10, 12, 18, 21, 23,
25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 35,
37, 38, 39, 40, 42, 45, 46, 48,
51, 55, 56, 59, 66, 68, 71, 83,
97, 99, 100, 105, 110, 111,
112, 113, 114, 116, 121, 123,
125, 126, 127, 128
- Rapid onset, 73
Real time, 128
Resilience, 108
Rhizopora apiculata, 101
Run up, 118, 119
RUTR, 32
- Samudra Hindia, 4, 12, 73, 95
Samudra Pasifik, 3, 12
Sea level, 52
Sesar, 82, 89
Sesar normal, 89
Shelter, 26, 111
Siklus hidrologi, 6, 9, 53, 105
Slow onset, 41, 73
SR, 20
Stratigrafi, 121
Supratidal, 61, 68
- Tanggap darurat, 27, 30, 43, 44, 49,
86, 92, 108, 111, 112, 122
Tektonik, 24, 29, 40, 47, 49, 60, 71,
73, 92, 93
Terumbu karang, 5, 23, 26, 27, 36,
37, 38, 39, 40, 42, 49, 56, 58,
59, 60, 61, 98, 100, 101, 103,
111, 112, 115, 116
Tinggi muka laut, 23, 38, 47, 53, 54,
55, 73, 86, 111, 120, 126
Tsunami, 15, 19, 20, 21, 23, 24, 27,
40, 47, 48, 49, 51, 53, 56, 58,
65, 71, 72, 73, 80, 81, 82, 84,
85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93,
94, 95, 101, 102, 103, 113,
115, 116, 118, 119
- UNOSAT, 88, 90
Upper delta, 61, 68
- Volkanik, 19, 23, 40, 92
- WMO, 10



BIOGRAFI



Lahir di Tulungagung-Jawa Timur pada tanggal 12 Januari 1953 dari ibu seorang guru, Hj. Soepadmi dan ayah seorang (guru) militer, H. Soekardji (alm). Menikah dengan Hj. dr. Poppy Budiwati (Dinkes Kota Bandung) dengan 2 anak, yaitu Intan Savitri Wahyoe M.Sc. dan Agni Yoga Airlangga Wahyoe, M.Sc.

Menamatkan pendidikan di SD Pawyatan Dhoho tahun 1965, SMPN I tahun 1968, dan SMAN I tahun 1971, semuanya di Kediri. Kemudian melanjutkan pendidikan di Geologi ITB Bandung pada tahun 1972 hingga selesai tahun 1977 mengambil kajian stratigrafi karbonat dan sedimen klastik. Anggota Majelis Permusyawaratan Mahasiswa dan Dewan Mahasiswa ITB.

Pada tahun 1978 bergabung ke LGPN (Puslit Geoteknologi) LIPI sebagai Calon Pegawai Negeri Sipil. Menerima tugas sebagai Sekretaris LGPN-LIPI pada tahun 1982. Penelitian dengan SCRIPS pada tahun 1979–1980 mengawali pengalaman penelitian Internasional dengan RV Thomas Washington dan seismologi darat guna mempelajari tektonik Sumatra. Sejak 1984 melakukan penelitian mengenai neotektonik Indonesia bekerja sama dengan ORSTOM Perancis. Pada tahun 1987 menerima beasiswa Bank Dunia melalui program OFP (Overseas Fellowship Program) untuk melanjutkan studi program

Buku ini tidak diperjualbelikan.

doktor di Universite d'Aix Marseille II, Perancis dan menyelesaikan studi dengan predikat *summa cumlaude* pada tahun 1992. Selama itu ditempatkan di LGQ-CNRS sebagai peneliti menekuni bidang neotektonik-perubahan muka laut dan perubahan iklim/lingkungan, serta terlibat pula pada program penelitian di Perancis (*age dating, paleoclimate & archeology*).

Hubungan dengan berbagai kelompok kerja internasional (UNESCO dan lain-lain) telah mulai terbentuk sejak di Perancis, terlibat langsung pada kegiatan diskusi dan seminar (IGCP 268, 274, 275, 282) di berbagai negara Eropa, Afrika, Asia, dan Amerika. Kegiatan ini berlanjut ketika kembali aktif sebagai peneliti di Puslitbang Geoteknologi LIPI (IGCP 355, 375 hingga 495). Keterlibatan pada kelompok kerja ilmiah internasional berkembang, antara lain dengan IAEA pada pemanfaatan koral sebagai indikator perairan dari pencemaran bahan radioaktif. Aktif pada kelompok kerja ilmiah lain, umumnya yang bergerak pada bidang perubahan global lingkungan dan iklim, seperti CLIP, START, PAGES, dan IMAGES (*national contact*). Selain itu, juga aktif sebagai anggota kelompok ahli untuk IOC (1996–sekarang) dan IGBP (2005–2010). IODP (International Ocean Drilling Project-Sunda Shelf 2016–sekarang), Flused Sediment IOC Unesco 2008–sekarang.

Memperoleh dana untuk program RUT II pada 1994 di bidang neotektonik dan perubahan lingkungan. Program ini melibatkan sejumlah pakar (Kimia isotop, Biologi dan Lingkungan), diselesaikan pada tahun 1997 dengan penilaian sangat memuaskan. Sejak tahun 2003 bergabung pada majelis penilai antara lain program RUT, TP2I (2011-2013) dan TP3I (2015-2017). Kegiatan pada kajian koral terumbu karang sejak 1988 di Marseille terus berlangsung, antara lain aktif pada beberapa kongres (Coral Reef Congres Panama 1995: *Best Paper Award*) dan Panitia Nasional "Coral Reef Congres" tahun 2000 di Bali serta *workshop* (proksi koral) START di Hawaii, 1998).

Kerja sama dengan PT Freeport Indonesia membuka peluang penerapan dari kajian ilmu keikliman purba untuk membuat model mengenai kemungkinan dampak kegiatan penambangan pada penyusutan tudung es Jayawijaya (1996–1998).

Artikulasi dari kajian perubahan lingkungan yang dilakukan mempunyai spektrum luas, dapat bersifat teori atau terapan, eksploratif atau eksperimental. Karenanya beberapa program lingkungan, antara lain Riverwatch (1998), ADB untuk WJEMP (2003–2004), Kajian Observatorium Boscha (Menristek), merupakan terapan untuk lingkungan dataran dan pegunungan. Kajian kawasan pesisir dan perairan merupakan inti kegiatan, antara lain Coremap sejak penyiapan hingga pelaksanaan (1995–2005), antara lain dengan kegiatan Pemetaan Terumbu Karang Indonesia (1998–2001), kajian dan model rehabilitasi (Senayang, 1999 dan Teluk Ratai 2001–2002). Kajian perairan dan pesisir juga dilakukan melalui program Small Islands (1996–sekarang), Pelita Kelautan Bappenas (1998), Tanimbar Assessment for MEE (1997–1999), Kajian SD Alam dan Mineral (Propinsi Riau dan Jawa Tengah). RUTR dan RPJM Propinsi Riau dan Propinsi Riau Kepulauan (2002–2003), RUTR Laut Banda (Kemen PUPR). Team Leader West Java Env, Project-ADB 2004).

Sejumlah kerja sama internasional penelitian mulai ditangani sejak 1992 untuk mengatasi kendala analisis laboratorium, antara lain dengan Univ. Harvard (1992–1993), California Technology (1993–2000), Univ. Princeton (1996–1998), Univ. New Hampshire (1993–1998), RSES-ANU (1994–sekarang), AIST Tsukuba (2002–2007), Univ. Bremen (2005–2010), Rijks Museum (2005–2012). Kerja sama ini antara lain diwujudkan dalam bentuk ekspedisi (RV Sonne) dan analisis contoh di laboratorium. Ekspedisi dengan RV Marion Dufresne sebagai program IMAGES untuk memperoleh contoh dari laut dalam.

Kegiatan lain adalah kuliah, bimbingan program, pengujian S1, S2, dan S3 di berbagai perguruan tinggi (ITB, IPB, Master Course Asean, UI, ANU, Univ. Wolongong), pelatihan GIS (COREMAP) dan komunikasi maupun melayani konsultasi sejumlah LSM dan institusi yang bergerak di bidang lingkungan dan kelautan. Selain itu, sebagai peneliti senior, aktif sebagai pembimbing dan narasumber pada kegiatan penelitian di institusi lain, seperti dengan P3GL (Perairan Berau–Tarakan, Kalimantan Timur), BRKP (Selat Sunda), dan beberapa perguruan tinggi.

Tugas sebagai koordinator harian subprogram kompetitif LIPI DAS terpadu Jabopunjur-Citarum dilakukan sejak awal 2006. Peneliti utama pada program Kompetitif LIPI 2008–2012, Program Unggulan LIPI 2013–2017 dengan kajian dan penerapannya dalam bidang geodinamika, lingkungan, kebencanaan dan tata air pesisir-pulau kecil. Hasil kegiatan berupa model pendukung kebijakan dan arahan untuk adaptasi penguatan ketahanan disosialisasikan kepada masyarakat dan pemangku kepentingan (pemerintah daerah dan swasta) melalui berbagai media cetak dan film. Kegiatan berlangsung hingga terpasangnya model teknologi pengelolaan air di berbagai daerah maupun stasiun pemantau kualitas lingkungan hasil rancangan LIPI di sejumlah tempat seperti stasiun penelitian LIPI dan instansi lain serta sekolah.

Sejumlah publikasi (lebih dari 15 buah) dalam bentuk buku sebagai bagian bunga rampai dan buku penulisan bersama atau tunggal diterbitkan oleh berbagai penerbit (Ikapi). Naskah ilmiah telah dipublikasi di berbagai jurnal nasional dan internasional antara lain di Internasional Coral Reef yang memperoleh penghargaan "*the best paper*". Research Grand RSES ANU Australia 1996–2017 dan Univ. Tongji State Lab. Marine Geology 2008–2019, Senior Fellow Univ. Queensland 2018–2023.

KERENTANAN-KETAHANAN KAWASAN LANDAI PESISIR DAN PULAU KECIL

MITIGASI DAN ADAPTASINYA

Indonesia dengan gugusan pulau dan kawasan landai pesisir dianggap menyimpan potensi bencana alam geologi dan bencana hidrometeorologi. Oleh karena itu, pemahaman yang lebih baik terkait kondisi dan daya dukung (sumber daya) alam hingga dinamika alam yang berpotensi memberi ancaman perlu diusahakan.

Buku ini hadir secara tepat untuk memberikan edukasi terkait upaya yang bisa ditempuh untuk pengurangan ancaman bahaya dan risiko kerusakan akibat bencana. Dalam buku ini, penulis mengusulkan berbagai model pendekatan mitigasi dan adaptasi pada gangguan iklim global dan kejadian ekstrem di kawasan pulau kecil dan pesisir landai di Indonesia. Tata ruang dan program pembangunan daerah merupakan peluang dan cara intervensi sebagai model pengurangan kerentanan dan peningkatan ketahanan kawasan landai pesisir dan pulau kecil.

Diharapkan buku ini dapat menjadi pegangan bagi pemerintah daerah dan pembuat kebijakan, utamanya yang berada di kawasan pantai landai dan pulau-pulau kecil dalam meningkatkan daya lentur dan daya tahan masyarakat terhadap ancaman bencana yang sewaktu-waktu dapat terjadi.



Diterbitkan oleh:

LIPI Press, anggota Ikapi
Gedung PDDI LIPI Lt. 6
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta Selatan 12710
Telp.: +62 21 573 3465 | Whatsapp +62 812 2228 485
E-mail: press@mail.lipi.go.id
Website: lipipress.lipi.go.id | penerbit.lipi.go.id

ISBN 978-602-496-066-5



9 786024 960865