



Bab 5

Solusi Adaptif Dampak Kenaikan Muka Air Laut

Al Mukhollis Siagian

A. Perubahan Iklim dan Kenaikan Muka Laut

Kunci keberhasilan dalam menghadapi perubahan iklim yang berimplikasi pada peningkatan muka laut adalah kemampuan mengidentifikasi solusi terhadap masalah yang kemudian dikonversi menjadi langkah mitigatif dan preventif. Lantas, bagaimana kondisi perubahan iklim terhadap peningkatan muka laut di dunia? Perubahan iklim yang tengah melanda sungguh mengerikan. Berbagai ungkapan untuk menggambarkan efek destruktif perubahan iklim telah dilontarkan oleh berbagai tokoh dan temuan riset.

Sejumlah perhatian besar telah banyak dilakukan oleh badan internasional, seperti United Nations (UN), National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Oceanic and Atmospheric

A. M. Siagian

Common Ground Research Networks, e-mail: almukhollis1998@gmail.com

© 2023 Editor & Penulis

Siagian, A. M. (2023). Solusi adaptif dampak kenaikan muka air laut. Dalam Elza Surmaini, Lilik Slamet Supriatin, & Yeli Sarvina (Ed.), *Teknologi dan kearifan lokal untuk adaptasi perubahan iklim* (113–137). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.901.c720
E-ISBN: 978-623-8372-46-1

Administration (NOAA), United States Geological Survey (USGS), Group of Twenty (G20), dan AS Institute. Selain itu, terdapat juga riset-riset yang dilakukan secara nasional setiap negara dan universitas di dunia yang menunjukkan bahwa persoalan ini merupakan bahaya nyata yang dahsyat dan memiliki daya rusak berkepanjangan.

Daya rusak dan bahaya nyata yang disebabkan oleh peningkatan muka laut telah diupayakan oleh berbagai negara maupun badan internasional dalam menemukan solusi tepat guna dan tepat hasil. Oleh karena itu, dalam bab ini, kajian dekonstruksi untuk menelaah berbagai solusi yang telah diterapkan oleh negara-negara maju. Selain itu, tulisan ini juga bertujuan memunculkan solusi tepat guna dan tepat hasil. Adapun ruang lingkup bab ini terdiri atas multifaktorial peningkatan muka laut, titik temu peningkatan muka laut dan penurunan tanah, beraneka solusi mal-adaptif peningkatan muka laut, dan gagasan teknologi Chi A Gian sebagai solusi tepat untuk peningkatan muka laut.

B. Multifaktorial Peningkatan Muka Laut

Perubahan iklim yang dipacu pemanasan global begitu masif memengaruhi terjadinya bermacam-macam perubahan efek destruktif pada berbagai bidang kehidupan dan munculnya permasalahan baru. Kekhawatiran yang sudah lama diprediksi para ilmuwan sebagai dampak destruktif dari krisis iklim kini menjadi kenyataan dan bahkan sudah merambah pada arus perekonomian. Hal ini disebabkan bahwa pemanasan global telah menyebabkan terjadinya pencairan lumbung es dunia di kutub secara bersamaan dan berdaya ekstrem. Pencairan es yang terjadi merupakan faktor utama dari terjadinya peningkatan muka laut. Setidaknya, pada akhir abad ini terjadi peningkatan muka laut setinggi 1,2 meter dan dapat mencapai 2,4 meter (Dennis & Mooney, 2016). Ketika Perjanjian Paris disusun, pihak-pihak yang merumuskannya meyakini bahwa lapisan Antarktika akan tetap stabil, bahkan ketika planet ini menghangat beberapa derajat, harapannya laut naik hanya satu meter pada akhir abad ini (Crist, 2018). Pada tahun yang sama, NASA mendapati bahwa harapan itu terlalu muluk,

menunjukkan bahwa satu meter bukan batas atas, melainkan batas bawah (Wallace, 2019).

Pada tahun 2100, apabila emisi gas rumah kaca (GRK) tidak dihentikan, sekitar 5% populasi dunia akan mengalami banjir setiap tahun (Hinkel dkk., 2014). Kemudian, penelitian tahun 2018 juga melaporkan bahwa laju pelelehan lapisan es Antarktika berlipat tiga kalinya hanya dalam satu dasawarsa kemarin (University of Leeds, 2018). Peningkatan muka laut merupakan salah satu akibat dari mencairnya es yang disebabkan oleh pemanasan global dan berada di atas misteri dasar tanggapan manusia serta adanya lapisan ketidaktahuan epistemologis lebih tebal dari aspek lain sains perubahan iklim. Pecahnya es merupakan persoalan fisika baru, yang jarang diamati sepanjang sejarah manusia sehingga belum dipahami dengan baik (Zeebe dkk., 2016).

Peningkatan muka laut merupakan permasalahan global yang multifaktorial bersifat kompleks-fundamental terkait dengan kesehatan, ekonomi, dan perilaku manusia, serta pola hajat hidup masyarakat, terutama yang berdomisili di pesisir pantai. Asia Tenggara sebagai salah satu wilayah yang berpotensi untuk tenggelam ketika terjadinya peningkatan muka laut secara ekstrem, tidak terkecuali Indonesia, dan sebagaimana yang terdapat dalam buku *Bumi Yang Tak Dapat Dihuni* memprediksikan bahwa Jakarta sebagai ibu kota negara Indonesia akan tenggelam pada tahun 2050 (Wallace, 2019). Perlu diingat bahwa Indonesia kaya akan pulau-pulau kecil yang dapat dimaksimalkan atas seluruh potensi di dalamnya, tetapi dapat berujung sia-sia karena ditenggelamkan oleh lautan begitu saja akibat kenaikan muka laut. Merujuk dari Undang-Undang Nomor 6 Tahun 1996 tentang Perairan Indonesia, jumlah pulau di Indonesia sebanyak 17.508 pulau (pulau besar dan pulau kecil). Namun, perhatian terhadap kedaulatan pulau-pulau kecil bagian terluar mulai dilakukan karena adanya permasalahan *effective occupation* terhadap empat pulau, yaitu Pulau Ligitan, Pulau Sipadan, Pulau Kambing, dan Pulau Yako. Pada tahun 2019, jumlah pulau Indonesia yang terdaftar ke PBB melalui sidang United Nations Group of Expert on Geographical Names

(UNGEKN) memiliki jumlah sebanyak 16.671 pulau. Kemudian, dilakukan penambahan jumlah pulau (tertera pada Gazeter Nasional) pada tahun 2020 sehingga berjumlah 16.771 pulau (Badan Informasi Geospasial, 2020). Selanjutnya pada tahun 2021, melalui Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2017 tentang Penetapan Pulau-Pulau Kecil Terluar, Indonesia mempunyai 111 pulau-pulau kecil terluar yang akan dilaporkan kembali ke sidang UNGEKN.

Apabila pengajuan 111 pulau-pulau kecil terluar tersebut diterima, Indonesia tetap kehilangan pulau sebanyak 626 pulau. Kehilangan daulat terhadap 626 pulau tentu merupakan kondisi yang sangat merugikan. Namun, sudah pasti jumlah sebanyak itu bukanlah permasalahan *effective occupation* maupun pencurian oleh negara lain. Jelas, percepatan aliran es dari gunung es dan runtuhnya lapisan es di Antarktika yang berbanding lurus dengan peningkatan muka laut global telah menimbulkan risiko besar bagi pulau-pulau kecil di Indonesia (Siagian, 2022b). Menurut penelitian, peningkatan muka laut di wilayah pesisir Sumatra Barat, yaitu Pariaman, akan mengalami laju kenaikan muka air laut mencapai 2.006 cm/tahun (Putri dkk., 2021).

Berdasarkan luas daratan dan melalui beberapa laporan penelitian, dijelaskan bahwa peningkatan muka laut makin sulit untuk diprediksi. Lebih lanjut, pada tahun 2021 ditemukan beberapa dampak proyeksi dari peningkatan muka laut di berbagai wilayah meliputi pantai di Sundarbans, yaitu hilangnya wilayah daratan secara besar-besaran. Pada berbagai skenario, Pantai Arktik mundur dengan kecepatan dua hingga tiga meter per tahun karena sebagian besar penurunan es laut dan naiknya permukaan laut, serta ketahanan pesisir di Maryland dan wilayah Teluk Chesapeake yang sangat dipertanyakan (Kenney & Gerst, 2021).

Dampak kenaikan muka laut menyebabkan kerugian dan kerusakan kondisi kehidupan manusia pada berbagai bidang. Dampak tersebut juga dapat dilihat dari kategori sosial, khususnya jenis kelamin, usia, dan suku asli yang berinteraksi dengan peristiwa iklim (Dorkenoo dkk., 2022). Aset budaya pun tidak dapat terhindar dari

dampak buruk sebagai konsekuensialitas peningkatan muka laut yang mengakibatkan sebagian besar masyarakat dunia kehilangan fakta sejarah. Perubahan iklim telah mengubah lingkungan fisik alam (termasuk mencairnya es) dengan konsekuensi serius bagi pelestarian sumber daya budaya (Sesana dkk., 2021).

Pada sisi lain, faktor yang memicu makin ngerinya dampak dari peningkatan muka laut juga dipengaruhi oleh upaya para *stakeholders* yang kurang maksimal. Setidaknya terdapat dua kategori, yaitu pertama, meliputi kumpulan praktik terorganisasi, pengorganisasian subjek (dalam hal ini, iklim, dan dampak terkait iklim) diatur, tetapi kurang pada korelasi antara kualitas tata kelola, kerentanan pulau, dan kapasitas adaptasi; dan kedua, disparitas dalam kebijakan publik lokal atau setidaknya tidak adanya budaya umum manajemen risiko melalui perencanaan kota (Robert & Schleyer-Lindenmann, 2021).

Kurang maksimalnya peran *stakeholders* dalam upaya, baik pencegahan maupun penanganan, terhadap peningkatan muka laut mengakibatkan kerugian pada sektor transportasi sebesar 1,9 juta TEU dan lebih dari 22 juta ton kargo pada tahun 2100, sedangkan biaya adaptasi akan melebihi 40 juta euro dan 0,95 penurunan standar deviasi dalam kinerja pariwisata menyusul peningkatan sebesar 1 standar deviasi dalam kerugian ekonomi terkait kenaikan permukaan laut (Yong, 2021; Sierra & Kintz, 2015). Kenaikan permukaan laut diproyeksikan akan terus terjadi sampai setelah tahun 2100, bahkan jika konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer stabil pada abad ini (Nicholls dkk., 2021).

Mengacu dari seluruh kondisi yang telah dipaparkan, terbentuk sebuah potret bahwa ketidakpastian global akibat kenaikan muka laut bagi populasi dunia menjadi masalah besar yang perlu solusi segera. Ketidakpastian yang terkandung di dalamnya memberikan malapetaka mengerikan untuk masa depan populasi dunia. Penulis juga menemukan irisan abstraksi antara peningkatan muka air laut dan penurunan tanah sebagai kondisi bahaya metadaya (kekuatan daya rusak bersifat jauh melampaui dari proyeksi dan temuan dalam penelitian selama ini) bagi dunia. Penulis melakukan pendalaman

secara teoretis dan praktis mengenai peningkatan muka laut dengan merumuskan tiga pertanyaan akademis. Pertama, adakah faktor lain yang menjadikan bahaya kenaikan muka laut berlipat ganda selain pemanasan global? Kedua, bagaimana solusi yang sudah ada dapat diterapkan dalam mengatasi peningkatan muka laut oleh dunia (sejumlah negara arus utama)? Ketiga, apa solusi yang tepat untuk menangani peningkatan muka laut?

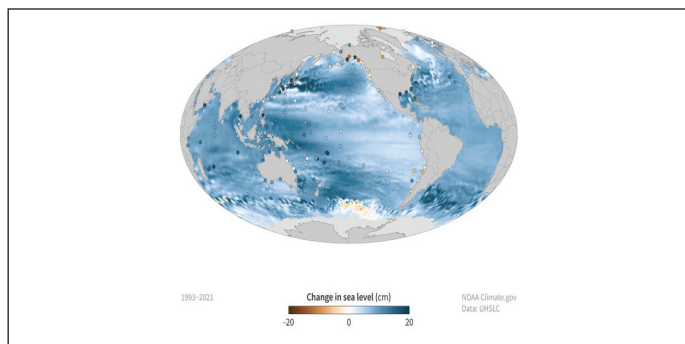
Menjawab pertanyaan tersebut, penulis menggunakan metode penyajian kualitatif dengan pendekatan agregasi dan perbandingan data, metode pakar, dan kajian literatur sistematis. Data agregat dan perbandingan digunakan untuk memberikan analisis situasi peningkatan muka laut secara historis dan saat berlangsung. Pengumpulan dokumen dan data dilakukan langsung dari IPCC, Lembaga Penelitian Iklim, NASA, Google Scholar (GS), Scopus, dan DOAJ. Metode pakar diterapkan untuk berkonsultasi dengan ahli di bidang geografi, kebijakan publik, lingkungan, hidrologi, dan iklim sehingga membentuk dasar ilmiah tentang peningkatan muka laut. Metode pakar dilakukan bersama dengan beberapa ilmuwan akademis yang berasal dari Universitas Sumatra Utara, Universitas Riau, Universitas Andalas, Universitas Negeri Padang, dan Perpustakaan Nasional Indonesia.

Selanjutnya, kajian literatur sistematis penulis gunakan untuk menilai dan mengevaluasi penelitian sebelumnya dalam rangka menemukan kesenjangan pengetahuan dan memosisikan kebutuhan akademis dan praktis lebih lanjut (Charmaz, 2006). Penulis telah menyelami banyak sumber informasi yang disediakan oleh berbagai basis data. Salah satu pedoman yang paling banyak diterima oleh peneliti arus utama untuk tinjauan sistematis adalah *The Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis (PRISMA) Guideline* (Page dkk., 2021). Panduan PRISMA digunakan sebagai pemandu dalam pencarian literatur relevan dengan mengidentifikasi jalur sintesis secara sistemis. Penelusuran literatur dilakukan dengan menggunakan database Google Scholar (Haddaway dkk., 2015), Scopus, dan DOAJ (Ennas & Di Guardo, 2015). Penulis

memperoleh 82 artikel dari Scopus dan DOAJ serta 431 artikel yang awalnya diidentifikasi dari GS. Namun, bahasan yang masih terlalu lebar membuat penulis melakukan iterasi secara sistematis terhadap 68 artikel berdasarkan kriteria, sebagai berikut (1) sebagai kajian internasional, artinya lokasi penelitian harus berbagai negara di luar Indonesia; (2) penelitian harus disajikan sebagai laporan lengkap; (3) studi harus secara substansial membahas perilaku seksual pemuda; dan (4) literatur tidak boleh merupakan duplikat dari sumber lain. Secara keseluruhan, penelitian yang penulis lakukan memiliki durasi waktu selama dua tahun yang dimulai sejak April tahun 2020 dan selesai pada April 2022.

C. Titik Temu Penurunan Tanah dan Peningkatan Muka Laut

Terdapat lima dimensi kehidupan manusia yang telah dihantam oleh kenaikan muka laut; dimensi daratan (Putri dkk., 2021; Huismans dkk., 2022), dimensi antropologi (Sesana dkk., 2021), dimensi ekonomi (Handwenger dkk., 2021; Dorkenoo dkk., 2022), dimensi pemerintahan dan kebijakan (Robert & Schleyer-Lindenmann, 2021; Yong, 2021), serta dimensi udara (Nicholls dkk., 2021). Rata-rata kenaikan muka laut di dunia dari tahun 1880 hingga 2009 adalah sekitar 210 mm. Tren linier dari 1900 hingga 2009 adalah $1,7 \pm 0,2$



Keterangan: Kondisi peningkatan muka laut di dunia sejak tahun 1993–2021

Sumber: NOAA Climate.gov (2022)

Gambar 5.1 Sebaran Wilayah Kenaikan Muka Laut (1993–2021)

mm tahun⁻¹ dan sejak 1961 adalah $1,9 \pm 0,4$ mm tahun⁻¹. Terdapat variabilitas yang cukup besar dalam tingkat kenaikan selama abad ke-20, tetapi telah terjadi percepatan yang signifikan secara statistik sejak 1880 dan 1900 sebesar $0,009 \pm 0,003$ mm tahun⁻² dan $0,009 \pm 0,004$ mm tahun⁻² (Church & White, 2011).

Sekilas, peningkatan muka laut belum menemukan titik sentral bahaya dahsyatnya dalam penyelidikan para ahli (termasuk para ilmuwan dan peneliti). Hal ini dikarenakan sebagian besarnya hanya terpaku pada fenomena peningkatan muka laut sebagai konsekuensi dari pemanasan global. Benar bahwa pemicu dominan terjadinya peningkatan muka laut adalah pemanasan global (terjadinya peningkatan temperatur bumi) yang menyebabkan gletser mengalami penyu-sutan serta hilangnya massa es di Greenland dan Antarktika. Muatan es di Selandia Baru berpotensi kehilangan gletser sebesar 79% dan Alpen Eropa sebesar 90% seperti yang dilaporkan oleh ahli geofisika dari Universitas Alaska di Amerika Serikat tahun 2011. Kedua daerah tersebut merupakan letak gletser terbesar di dunia.

Pencairan lumbung es secara alami terus menyumbangkan gas metana dikarenakan terjadinya pencairan lapisan *permafrost* (Oblogov dkk., 2020). Kondisi ini membentuk siklus dilematis, di mana gas metana makin memperbesar daya pemanasan global, kemudian es tercairkan lebih besar, gas metana dari dalam es makin banyak keluar, dan muka laut makin melahap daratan secara signifikan. Akibatnya, di banyak tempat, pantai akan bergeser sampai 160 kilometer menuju pemukiman masyarakat. Sebagai contoh, Arkansas dan Vermont yang terkurung daratan sekarang bakal memiliki pantai. Kenaikan muka laut 80 meter adalah batas, tetapi potensi besar manusia akan sampai pada titik itu (Wallace, 2019). Kumulatif peningkatan muka laut saat ini telah berdampak langsung pada 110 juta populasi manusia dengan kondisi di bawah garis air pasang dan 250 juta di bawah tingkat banjir tahunan. Satu miliar orang saat ini menempati tanah kurang dari 10 m di atas garis pasang; 630 juta manusia berada di bawah proyeksi tingkat banjir tahunan pada tahun 2100 dan 340 juta untuk pertengahan abad ini (Kulp & Strauss, 2019).

Selain pemanasan global sebagai pemicu pencairan es yang berimplikasi terhadap kenaikan muka laut, aktivitas manusia juga telah memicu terjadinya penurunan tanah sehingga menambah daya libas dari bahaya kenaikan muka laut. Artinya, bahaya laten yang sedang dihadapi adalah perpaduan peningkatan muka laut dan penurunan tanah. Kombinasi ini mempercepat frekuensi banjir dan laju erosi daratan (Yu dkk., 2022). Penurunan tanah merupakan masalah lingkungan yang kompleks terkait dengan pembangunan perkotaan, aktivitas pertambangan, dan pemanfaatan lahan yang tidak sesuai dengan ambang ekologis. Kegiatan ekonomi yang dilakukan oleh industri, baik itu terkait pemanfaatan air tanah di area penduduk setempat dengan akses air yang terbatas maupun kegiatan-kegiatan tambang, telah membentuk beban pembangunan yang sulit dikendalikan sehingga melebihi daya dukung alamnya.

Penurunan tanah berkontribusi pada penenggelaman kota-kota pesisir pada masa depan, membuatnya tidak dapat dihuni. Kota-kota bahkan menjadi lebih rentan ketika pemerintah daerah dan masyarakatnya kurang memiliki kesadaran tentang bahaya dan dampak penurunan tanah (Le, 2020). Hal ini memicu terjadinya kesalahan dalam pengambilan keputusan sehingga tindakan yang diambil menjadi tidak efektif (Saputra, 2020). Penduduk di area pesisir yang tak lagi layak huni membuka pintu besar dalam memunculkan masalah-masalah baru, seperti terciptanya konflik sosial—perpindahan penduduk dan perebutan lahan akan sulit untuk dihindarkan. Sebagaimana temuan Prasetyo dkk. (2019) dalam penelitiannya dinyatakan bahwa penurunan tanah yang terjadi (konteks Kecamatan Sayung, Indonesia) telah menyebabkan beberapa dusun tenggelam dan masyarakat berpindah ke dusun lain.

Penurunan tanah dan korelasinya dengan peningkatan muka air laut dipaparkan dalam temuan Erban dkk. (2014). Erban menyatakan bahwa penurunan tanah telah memperparah peningkatan muka laut. Penurunan tanah mengakibatkan peningkatan permukaan laut relatif di wilayah yang mengancam kelangsungan hidup kota-kota pesisir (Yu dkk., 2022). Kumulatif potensi penurunan tanah mencapai 2,2 juta

km², atau 1,6% dari daratan; mencakup 1,2 miliar penduduk (setara dengan 19% dari populasi) global (Herrera-Garcia dkk., 2021).

Sebagian besar populasi global yang terpapar potensi penurunan tanah adalah penduduk yang berada di Asia sebesar 86%, yaitu sekitar sepuluh kali gabungan populasi Amerika Utara dan Eropa yang terpapar sebesar 9%. Hasilnya menunjukkan bahwa 97% dari populasi global yang terpapar terkonsentrasi di 30 negara, India dan Tiongkok berbagi dua menempati peringkat teratas potensi penurunan tanah dalam hal luas spasial dan populasi yang terpapar. Mesir dan Belanda memiliki populasi terbesar tinggal di daerah potensial penurunan permukaan laut yang berada di bawah rata-rata permukaan laut. Kepadatan populasi terbesar di daerah potensi penurunan tanah terjadi di Mesir dan Indonesia. Selain itu, penurunan tanah juga akan terus mengalami peningkatan ke depannya seiring dengan meningkatnya jumlah populasi dunia.

D. Beraneka Solusi Mal-Adaptif Peningkatan Muka Laut

Dampak buruk dan tingginya kerusakan yang ditimbulkan oleh peningkatan muka air laut membuat beberapa negara (terutama negara-negara maju) mengantisipasi dengan mengeluarkan berbagai inovasi dalam menciptakan solusi untuk meminimalisasi dampak yang ditimbulkan dari terjadinya peningkatan muka laut ekstrem. Beraneka inovasi teknologi yang telah dikembangkan, antara lain teknologi memompakan air laut ke dalam tanah (Hampton Roads Sanitation District, 2016), *sea wall* di Jerman (University of Oxford, 2020), rumah panggung di Indonesia (Purwanto, 2009), rumah tinggi *mizuya* (Jepang), dan rumah model perahu (Belanda).

Adaptasi masyarakat atas kenaikan muka laut oleh semua negara berakar pada warisan sejarah panjang pembangunan masyarakat di pesisir pantai. Namun, secara fundamental, solusi yang ditawarkan belum mempertimbangkan prinsip keberlanjutan. Seluruh solusi yang ditawarkan tersebut senantiasa memakan biaya besar dan rusak saat dobrakan badai besar menghantam. Artinya, diperlukan

pengubahan pendekatan relatif terhadap tiga atau beberapa dekade yang lalu (Lee, 2001; Brady & Boda, 2017) dan membentuk solusi paling *sustainable*, efisien, dan efektif. Proses kebijakan yang mengatur dan formulasi gagasan harus didasarkan pada evolusi panjang tentang peningkatan muka laut yang terus berasimilasi dan berkontribusi pada transformasi solusi tepat guna. Dari deskripsi tentang berbagai solusi mal-adaptif dari negara-negara arus utama tersebut, penulis menguraikan kelemahan dan kerentanannya terhadap bahaya besar peningkatan muka laut.

1. Jerman

Hampir seperempat dari negara Jerman (sekitar 4.000 km²) terletak di dataran rendah pesisir berisiko terkena banjir. Lebih dari 350.000 orang tinggal di daerah ini dalam lingkaran sekitar 1.100 km garis pantai. Artinya, tingkat kerentanan populasi di sana dari ancaman



Keterangan: Garis hitam tebal dibentuk untuk tanggul negara, garis cokelat untuk tanggul regional, dan garis hitam tipis untuk tanggul tengah.

Sumber: Hofstede (2019)

Gambar 5.2 Sea Wall (Jerman)

laut sangat tinggi. Atas dasar itu, Jerman membentuk *sea wall* untuk melindungi dari terjangan laut.

Selama lebih dari dua milenium, penduduk Jerman telah melindungi diri mereka dari gelombang badai melalui *sea wall* (Gambar 5.2). Namun, gelombang badai hebat yang berulang (tahun 1362, 1634, 1717, 1825, dan 1962) telah berulang kali menyebabkan jebolnya tanggul, tanggul terus diperbaiki dan diperkuat (Hofstede, 2019). Sekilas, tampaknya *sea wall* merupakan solusi yang tepat untuk menghadapi peningkatan muka laut, tetapi efektivitas dan efisiensinya sangat rendah, terutama ketika terjadinya badai. Apabila penurunan tanah dimasukkan dalam perhitungan bahaya, *sea wall* tidak mampu melindungi penduduk (bahkan memunculkan bahaya berlipat) terhadap kenaikan muka laut.

2. Jepang

Seyogianya, Jepang juga telah menerapkan *sea wall* untuk melindungi negaranya dari amukan laut. *Sea wall* Jepang mencapai angka yang tinggi, sebesar 40% telah dibangun mengelilingi garis pantainya.



Keterangan: Model rumah *mizuya* yang dapat mengapung

Sumber: Cho (1996)

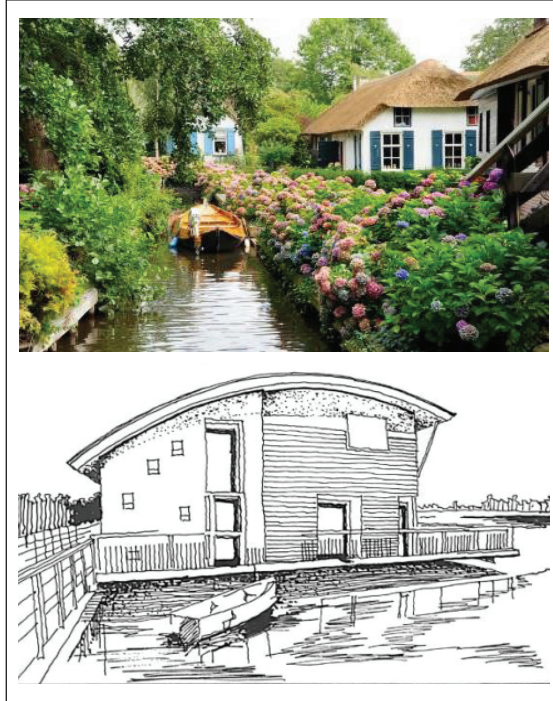
Gambar 5.3 *Mizuya* (Raized Houses)

Namun, bencana besar (*tsunami*) pada 11 Maret 2011 merobohkan tanggul tersebut dengan tingkat kerugian yang merenggut nyawa sebanyak 15.000 jiwa dan kehilangan finansial sebesar 210 miliar dolar Amerika Serikat (Boret & Gerster, 2021). Kondisi ini memperlihatkan kesesuaian dengan argumen penulis (pada bagian Jerman) bahwa *sea wall* berpotensi menimbulkan bahaya berlipat dari amukan laut.

Secara khusus, gagasan Jepang untuk mengantisipasi peningkatan muka laut, khususnya banjir yang disebabkan peningkatan muka laut, adalah rumah tinggi *mizuya* (Gambar 5.3). Rumah *mizuza* memiliki atap jerami yang dirancang untuk mengapung di atas air jika terjadi banjir ekstrem. Menurut penulis, membangun rumah *mizuya* tidak dapat diandalkan untuk menghadapi banjir yang diakibatkan oleh peningkatan muka laut, mengacu pada pergeseran garis pantai secara signifikan. Artinya, terjangan air laut (baik itu banjir sebagai salah satu wujudnya) adalah banjir ekstrem yang belum pernah kita saksikan sepanjang sejarah.

3. Belanda

Sebagian besar wilayah Belanda, lebih dari setengah pendapatan domestik bruto (PDB) nasional dan populasi, terletak di bawah permukaan laut rata-rata. Sejak awal abad ke-20, sejumlah bencana badai memicu pembangunan infrastruktur yang mengurangi panjang garis pantai hingga saat ini sekitar 450 km. Standar perlindungan pantai didasarkan pada penilaian risiko yang membahas kemungkinan individu menjadi korban gelombang pantai. Hal ini berarti langkah yang diambil telah merancang minimalisasi dampak dari gelombang badai yang memiliki kemungkinan terjadinya terendah per 10.000 tahun untuk sebagian besar wilayah pesisir. Langkah ini mirip dengan infrastruktur *sea wall* Jerman yang terdiri dari campuran langkah-langkah pertahanan banjir struktural dan program nutrisi pasir yang bertujuan untuk mempertahankan garis pantai pada posisinya saat ini, termasuk penghalang gelombang badai di lima lokasi muara (Alphen, 2016). Struktur tata kelola multilevel melekat pada pengelolaan air dan risiko Belanda (OECD, 2014).



Keterangan: Penataan rumah terapung penduduk desa
Sumber: Ngo dan Hoang (2020)

Gambar 5.4 Rumah Desa Terapung Belanda

Selain itu, Belanda juga menghadapi peningkatan muka laut dengan membangun model rumah yang didesain seperti perahu yang dapat mengapung di atas air dalam segala kondisi cuaca. Desain Dura Vermeer (Belanda) menawarkan proyek “Desa Terapung” untuk sekitar 12.000 orang di dekat Bandara Schiphol, tidak jauh dari Amsterdam (Gambar 5.4). Rancangan tersebut menata rumah-rumah terapung yang membentuk klaster. Contoh khususnya adalah desa ekologis kuno di Provinsi Overijssel (terbentuk dari tahun 1230 dan masih ada sampai sekarang) berjarak 148 km dari Amsterdam.

4. Inggris

Sistem pertahanan pantai di Inggris dari garis pantai sepanjang 5.000 km juga telah dibentuk oleh kondisi badai ekstrem selama berabad-abad. Sejak badai Laut Utara tahun 1953, telah terjadi evolusi progresif pengelolaan yang terus berlanjut (Nicholls dkk., 2013; Haigh dkk., 2020). Hal ini termasuk pengembangan sistem prakiraan dan peringatan bersama dengan pertahanan yang lebih baik dan lebih luas serta penggunaan penilaian risiko ekonomi dan manfaat-biaya.

Pada tahun 1990-an, terjadi pergeseran paradigma kebijakan pesisir menuju perspektif “risiko sistemik”, yang mengakui bahwa risiko dipengaruhi oleh banyak faktor (misalnya, sumber seperti gelombang dan kenaikan muka laut). Terdapat beberapa langkah terstruktur yang dilakukan oleh Inggris untuk menghadapi peningkatan muka laut, yaitu *sand dunes*, *sea walls*, *groins*, *rock armor*, dan *nourishment* (Kantamaneni dkk., 2022).

5. Indonesia

Salah satu solusi menghadapi kenaikan muka laut yang dilakukan di Indonesia adalah metode *managed retreat*. Ini merupakan salah satu strategi adaptasi dan manajemen risiko terhadap bahaya pesisir dengan cara memindahkan infrastruktur, penduduk, dan asetnya (relokasi) dari area pesisir ke daratan yang lebih tinggi (Lawrence dkk., 2020). Aksi nyata dari strategi ini terlihat dari rencana pemerintah memindahkan ibu kota negara dari Jakarta ke Nusantara di Kalimantan Timur. Selain urgensi terkait pemerataan ekonomi dan inklusivitas, rencana pemindahan ini juga sebagai strategi mengantisipasi kenaikan muka laut bagi penduduk pesisir (Van de Vuurst & Escobar, 2020).

Selain di Indonesia, metode *managed retreat* didekati dan disebarkan secara berbeda di seluruh dunia. Seperti di Senegal, telah dilakukan relokasi nelayan padat penduduk di Distrik Guet’Ndar di Saint Louis (World Bank, 2018). Di negara-negara maju (Amerika Utara, Eropa Utara, dan Eropa Barat), *managed retreat* mendapat tanggapan dan dukungan publik sehingga menjadikan strategi ini sebagai solusi paling populer menghadapi peningkatan muka laut.

Namun, bukan berarti penerapannya sama sekali bebas dari kendala. Di Amerika Serikat, *managed retreat* terbatas oleh kondisi psikologis penduduk dan institusional pemerintahan (Siders, 2019). Di sebagian Eropa yang lain, meskipun mengelola risiko banjir melalui *depoldering* memberikan manfaat ekosistem, mereka masih cenderung pada penggunaan *sea wall* (Goeldner-Gianella dkk., 2015).

Bragg dkk. (2021) menggarisbawahi bahwa penggunaan istilah *managed retreat* dapat menimbulkan kecemasan di antara penduduk yang paling tidak mampu bergerak, menimbulkan resistensi dari yang terkena dampak, dan pengabaian kebijakan. Bragg dkk. (2021) mencatat bahwa penggunaan terminologi yang tepat dan strategi komunikasi tetap penting untuk meningkatkan penerimaan *managed retreat*.

Berangkat dari kerangka berpikir bahwa dunia sedang berhadapan dengan peningkatan muka laut dan penurunan tanah, penggunaan *managed retreat* adalah solusi yang paling tidak memungkinkan dan telah memunculkan jebakan berbahaya. Penggunaan *managed retreat* akan makin meningkatkan muka laut pada bagian daratan lain dan penurunan tanah pun makin meningkat.

E. Gagasan Stabilitas Muka Laut

Pada bagian ini, penulis menawarkan solusi yang tepat guna dan berkelanjutan untuk menangani peningkatan muka laut. Temuan penulis menunjukkan bahwa berbagai solusi untuk menghadapi peningkatan muka laut yang telah dikemukakan sebelumnya tidak akan mampu melindungi bumi dan populasi dunia secara berkesinambungan. Argumen ini penulis bangun berdasarkan dua catatan temuan dan dua catatan kausalitas berikut ini.

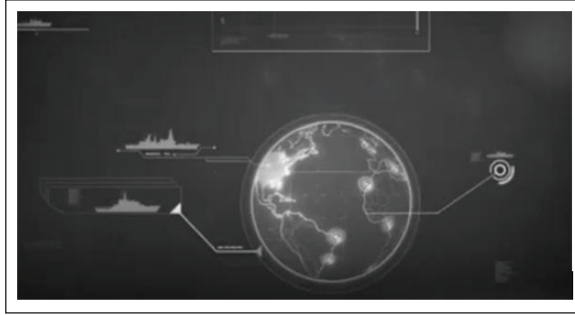
Temuan *pertama*, peningkatan muka laut berpotensi menggeser garis pantai sampai sejauh 160 km ke daratan dengan kumulatif peningkatan berdampak langsung berada pada angka 20% dari populasi dunia pada tahun 2100-an (termasuk memperhitungkan dampak intensitas banjir dan/atau curah hujan berskala besar). *Kedua*, faktor penambah daya bahaya peningkatan muka laut juga dipicu oleh

penurunan tanah. Kumulatif penurunan tanah telah mencapai angka 2,2 juta km², atau 1,6% dari daratan; mencakup 1,2 miliar penduduk, setara dengan 19% dari populasi dunia.

Kedua temuan tadi menyebabkan konsekuensi *pertama*, yakni 60% dari populasi dunia akan terdampak bahaya besar dari peningkatan muka laut yang diperparah oleh penurunan tanah di tahun 2100-an. Pergeseran pantai mampu mencapai 480 km ke arah daratan (termasuk memperhitungkan penurunan tanah yang terjadi beriringan) dan besaran daratan tidak layak huni mencapai 5,6 juta km². Konsekuensi kedua ialah pergeseran muka laut yang jauh ke daratan. Jika terjadi tsunami berskala kecil saja, angka populasi yang menderita dari peningkatan muka laut menjadi 62%.

Atas dasar tersebut, terdapat dua paradigma solutif untuk pencegahan peningkatan muka laut dan penurunan tanah (yang juga mengalami peningkatan signifikan). *Pertama*, melindungi daratan dan populasi dari bahaya dan amukan laut dan membentuk daratan alternatif layak huni. Namun, hal tersebut tidak cukup jika hanya sekadar memunculkan solusi jangka pendek terhadap peningkatan muka laut, termasuk hanya sebatas beradaptasi dan menghadapinya. Dibutuhkan upaya lebih, yaitu paradigma yang *kedua*, yakni mengelola dan mengendalikan peningkatan muka laut. Kemudian, dalam rangka menindaklanjuti paradigma tersebut, solusi yang digagas adalah pendekatan Chi A Gian Stabilitas Volume Air Laut (Siagian, 2022a). Gagasan ini mengacu dari kebutuhan global berdasarkan cakrawala dimensi waktu, skenario iklim, dan representasi ketidakpastian.

Paradigma pertama, pendekatan Chi A Gian dirancang berbentuk kapal selam dan digagas dengan sistem kerja untuk membekukan laut di Antarktika, Greenland, dan menormalisasi gletser yang telah mencair (simulasinya dapat dilihat di Siagian, 2022c). Cara kerjanya, kapal selam dirancang dengan fitur penyerap tenaga laut sebagai energi untuk menghasilkan pembekuan terhadap laut. Artinya, teknologi ini tetap ramah lingkungan dan tidak berkontribusi terhadap pemanasan global.



Keterangan: Prototipe stabilitas muka laut diletakkan pada area lautan yang telah mengalami kenaikan muka laut secara signifikan di area daratannya.

Sumber: Siagian (2022c)

Gambar 5.5 Pendekatan Stabilitas Muka Laut

Kemudian, untuk daya dapat diperincikan bahwa setiap satu unit Chi A Gian yang diletakkan pada titik tertentu akan dipasang *power* pembeku laut dengan jangkauan setiap unit menghasilkan bekuan es seluas 1 mil (relatif dan pengaturan *power* dapat ditingkatkan). Artinya, untuk keseluruhan dibutuhkan beberapa unit Chi A Gian dalam membentuk kinerja untuk menjaga stabilitas muka laut. Paradigma kedua, konsep Chi A Gian diperuntukkan membentuk daratan baru di atas lautan bertekstur es. Setelah dataran berbasis es terbentuk, setiap sisi terluarnya diperkuat dengan semen. Prototipe Chi A Gian disajikan pada Gambar 5.5.

Terakhir, pendekatan Chi A Gian, selain berfungsi sebagai solusi terhadap peningkatan muka laut dan penurunan tanah, juga dapat berfungsi sebagai alat pertahanan negara. Pendekatan Chi A Gian dapat dikonstruksi untuk membentuk benteng es di dalam lautan sehingga mampu menghentikan kapal selam (sekalipun Tsar Bomba) dari negara-negara lain yang melakukan operasi di lautan. Hingga saat ini, teknologi kapal selam Tsar Bomba seperti kepemilikan Rusia, yang disinyalir mampu menenggelamkan daratan, bahkan negara dengan tenaga nuklirnya dalam membentuk *tsunami* buatan, belum memiliki teknologi pengadang dari negara maju sekalipun.

F. Penutup

Kenaikan muka air berpotensi menggeser garis pantai sampai sejauh 160 km ke daratan dengan kumulatif peningkatan berdampak langsung berada pada angka 20% dari populasi dunia pada tahun 2100-an (termasuk memperhitungkan dampak intensitas banjir dan/atau curah hujan berskala besar). Selain itu, terdapat faktor penambah daya bahaya kenaikan muka laut, yaitu terjadinya penurunan tanah. Kumulatif penurunan tanah mencapai angka 2,2 juta km², atau 1,6% dari daratan; mencakup 1,2 miliar penduduk (setara dengan 19% dari populasi) global.

Konsekuensinya, 60% dari populasi bumi akan terdampak bahaya besar dari kenaikan muka laut yang diperparah oleh penurunan tanah di tahun 2100-an. Dengan catatan pergeseran pantai mampu mencapai 480 km ke arah daratan (termasuk memperhitungkan penurunan tanah yang terjadi beriringan) dan besaran daratan tidak layak huni mencapai 5,6 juta km².

Menanggapi kondisi demikian, beraneka solusi untuk menghadapi bahaya kenaikan muka laut, seperti teknologi memperlambat tenggelamnya tanah, *sea wall*, rumah panggung, rumah tinggi *mizuya*, rumah model perahu, dan *managed retreat* merupakan solusi yang mal-adaptif dan *unimplemented* untuk melindungi bumi dan populasinya.

Mengacu dari kebutuhan global berdasarkan cakrawala waktu, skenario iklim, dan representasi ketidakpastian dari kenaikan muka laut dan penurunan tanah, penulis menawarkan ide Chi A Gian sebagai solusi tepat guna dan berkelanjutan. Kinerjanya, yaitu untuk membekukan air laut (stabilitas muka laut), menambah daratan alternatif layak huni berbasis es, dan memiliki nilai guna tambahan untuk menghadapi teknologi *destroyer* Tsar Bomba yang mampu menekan gelombang air laut sehingga menimbulkan *tsunami* buatan (jika dibutuhkan).

Meskipun demikian, dalam rangka menindaklanjuti gagasan yang penulis tawarkan untuk menghadapi bahaya laten dari kenaikan muka laut, disarankan kepada seluruh masyarakat Indonesia untuk

mendukung keterwujudan pembuatan teknologinya. Secara khusus, penulis berharap kepada pemangku kebijakan (eksekutif dan legislatif) Republik Indonesia, BRIN, BNPB, dan BMKG dapat mendukung secara materiel dan morel dalam mewujudkan teknologi stabilitas muka laut yang penulis gagas.

Referensi

- Alphen, J. V. (2016). The Delta Programme and updated flood risk management policies in the Netherlands. *Journal of Flood Risk Management*, 9, 310–319.
- Badan Informasi Geospasial. (2020). *Gazeter nasional tahun 2020*. <https://sinar.big.go.id/detail/download/MS1HYXpldGVyLU5hc2lvbmFsLTlwMjAyLnBkZg==>
- Boret, S. P., & Gerster, J. (2021). Social lives of tsunami walls in Japan: Concrete culture, social innovation and coastal communities. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science* 630 (012029).
- Brady, A. F., & Boda, C. S. (2017). How do we know if managed realignment for coastal habitat compensation is successful? Insights from the Implementation of the EU Birds and Habitats Directive in England. *Ocean & Coastal Management*, 143, 164–174.
- Bragg, W. K., Gonzalez, S. T., Rabearisoa, A., & Stoltz, A. D. (2021). Communicating managed retreat in California. *Water*, 13(6), 781.
- Charmaz, K. (2006). *Constructing grounded theory: A practical guide through qualitative analysis*. Sage Publications.
- Cho, I. (1996). *A guide to places of historical interest in the lower Yoshino Basin (in Japanese)*. Tokushima Work Office, Ministry of Construction.
- Church, J. A., & White, N. J. (2011). Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surv Geophys*, 32, 585–602. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>.
- Crist, M. (2018, 22 Februari). *Beside, I'll be dead*. London Review of Books. Diakses pada tanggal 15 Juli, 2022, dari https://www-lrb-co-uk.translate.goog/the-paper/v40/n04/meehan-crist/besides-i-ll-be-dead?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=op,sc

- Dennis, B., & Mooney, C. (2016, 30 Maret). Scientists nearly double sea level rise projections for 2100, because of Antarctica. *The Washington Post*. Diakses pada 15 Juli, 2022, dari <https://www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2016/03/30/antarctic-loss-could-double-expected-sea-level-rise-by-2100-scientists-say/>
- Dorkenoo, K., Scown, M., & Boyd, E. (2022). A critical review of disproportionality in loss and damage from climate change. *WIREs Climate Change*, 13(4), e770.
- Ennas, G., & Di Guardo, M. C. (2015). Features of Top-Rated Gold Open Access Journals: An Analysis of the Scopus Database. *Journal of Informetrics*, 9(1), 79–89.
- Erban, L. E., Gorelick, S. M., & Zebker, H. A. (2014). Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, 9(8), 084010.
- Goeldner-Gianella, L., Bertrand, F., Annaig, O., & Grancher, D. (2015). Depolderisation policy against coastal flooding and social acceptability on the French Atlantic coast: The case of the Arcachon Bay. *Ocean and Coastal Management*, 116, 98–107.
- Haddaway, N. R., Collins, A. M., Coughlin, D., & Kirk, S. (2015). The role of Google Scholar in evidence reviews and its applicability to grey literature searching. *PLoS ONE*, 10(9), Article 0138237.
- Haigh, I. D., Nicholls, R. J., Penning-Rowsell, E. C., & Sayers, P. (2020). Impacts of climate change on coastal flooding, relevant to the coastal and marine environment around the UK. *MCCIP Science Review*, 2020, 546–565.
- Hampton Roads Sanitation District. (2016). Interim financial report for subordinate wastewater bonds. <https://www.hrsd.com/sites/default/files/assets/HRSDBondsPDFs/InterimFinancialReportforSubordinateWastewaterBondsSeries2016-ForthePeriodEndedJanuary312023.pdf>
- Handwerker, L. R., Sugg, M. M., & Runkle, J. D. (2021). Present and future sea level rise at the intersection of race and poverty in the Carolinas: A geospatial analysis. *The Journal of Climate Change and Health*, 3, Article 100028.
- Herrera-Garcia, G., Ezquerro, P., Tomas, R., Bejar-Pizarro, M., Lopez-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreon-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, J., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W. C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., & Ye, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34–36.

- Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Perrettec, M., Nicholls, R. J., Tol, R. S. J., Marzeion, B., Fettweis, X., Ionescu, C., & Levermann, A. (2014). Coastal flood damage and adaptation cost under 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3292–3297.
- Hofstede, J. (2019). Kustenschutz in Schleswig-Holstein: ein Überblick über Strategien und Maßnahmen. Dalam *Die Kuste 87* (287–302). Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens und Co.
- Huismans, Y., van der Spek, A., Lodder, Q., Zijlstra, R., Elias, E., & Wang, Z. B. (2022). Development of intertidal flats in the Dutch Wadden Sea in response to a rising sea level: Spatial differentiation and sensitivity to the rate of sea level rise. *Ocean and Coastal Management*, 216, Article 105969.
- Kantamaneni, K., Rice, L., Du, X., Allali, B., & Yenneti, K. (2022). Are current UK coastal defences good enough for tomorrow? An assessment of vulnerability to coastal erosion. *Coastal Management*, 50(2), 142–159.
- Kenney, M. A., & Gerst, M. D. (2021). Synthesis of indicators, datasets, and frameworks available to establish resilience and adaptation indicators: Case study of Chesapeake Bay Region, USA. *Current Climate Change Reports*, 7, 35–44.
- Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2017 tentang Penetapan Pulau-Pulau Kecil Terluar. (2017). <https://jdih.setkab.go.id/PUUdoc/175209/Keppres%20No%206%20Tahun%202017.pdf>
- Kulp, S. A., & Strauss, B. H. (2019). New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Communications*, 10, Article 4844.
- Lawrence, J., Boston, J., Bell, R., Olufson, S., Kool, R., Hardcastle, M., & Stroombergen, A. (2020). Implementing pre-emptive managed retreat: Constraints and novel insights. *Current Climate Change Reports*, 6, 66–80.
- Le, T. D. N. (2020). Climate change adaptation in coastal cities of developing countries: Characterizing types of vulnerability and adaptation options. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25, 739–761.
- Lee, M. (2001). Coastal defence and the habitats directive: Predictions of habitat change in England and Wales. *The Geographical Journal*, 167(1), 39–56.

- Ngo, L. M., & Hoang, H. Y. (2020). Climate change and sea level rise response solutions for Can Gio District, Ho Chi Minh City: Potential to adapt ideas from selected developed countries. Dalam L. T. T. Huong & G. M. Pomeroy (Ed.), *AUC 2019: Proceedings of the 15th international asian urbanization conference, Vietnam*. Springer. <https://www.springerprofessional.de/en/climate-change-and-sea-level-rise-response-solutions-for-can-gio/18480562>
- Nicholls, R. J., Hanson, S. E., Lowe, J. A., Slangen, A. B. A., Wahl, T., Hinkel, J., & Long, A. J. (2021). Integrating new sea-level scenarios into coastal risk and adaptation assessments: An ongoing process. *WIREs Climate Change*, 12(3), Article e706.
- Nicholls, R. J., Townend, I. H., Bradbury, A. P., Ramsbottom, D., & Day, S. A. (2013). Planning for long-term coastal change: Experiences from England and Wales. *Ocean Engineering*, 71, 3–16.
- NOAA Climate.gov. (2022). *Sea level change (1993-2001)*. <https://www.climate.gov/media/14660>
- Oblogov, G. E., Vasiliev, A. A., Streletskaia, I. D., Zadorozhnaya, N. A., Kuznetsova, A. O., Kanevskiy, M. Z., & Semenov, P. B. (2020). Methane content and emission in the permafrost landscapes of Western Yamal, Russian Arctic. *Geosciences*, 10(10), Article 412.
- OECD. (2014). *Water governance in the Netherlands: Fit for the future?* OECD Publishing.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *J Clin Epidemiol*, 134, 178–189.
- Prasetyo, Y., Bashit, N., Sasmito, B., & Setianingsih, W. (2019). Impact of land subsidence and sea level rise influence shoreline change in the coastal area of Demak. Dalam *IOP conference series: Earth and environmental science volume 280* (012006).
- Purwanto, E. (2009). “Rumah panggung” for the settlement with sea level rise problem in the fishermen settlement of Tambak Lorok Semarang. *Journal of Coastal Development*, 13(2), 1–14.
- Putri, E. E., Galib, M., & Mubarak. (2021). Analysis of inundation area as an impact of sea level rise in Kota Pariaman District, West Sumatera Province. *Jurnal of Coastal and Ocean Sciences*, 2(3), 193–200.

- Robert, S., & Schleyer-Lindenmann, A. (2021). How ready are we to cope with climate change? Extent of adaptation to sea level rise and coastal risks in local planning documents of Southern France. *Land Use Policy*, *104*, Article 105354.
- Saputra, E. (2020). *Land Subsidence as a Sleeping Disaster Case studies from Indonesia* [Disertasi]. Utrecht University.
- Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, C., Cassar, J., & Hughes, J. J. (2021). Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *WIREs Climate Change*, *12*(4), Article e710.
- Siagian, A. (2022a, 1 April). *Perubahan iklim dan teknologi stabilitas volume air laut*. Bisnis Indonesia. Diakses pada 21 Juli, 2022, dari <https://bisnisindonesia.id/article/perubahan-iklim-dan-teknologi-stabilitas-volume-air-laut>
- Siagian, A. (2022b). *Urgensi intervensi sea level rise di Indonesia*. Generasi Peneliti. Diakses pada 21 Juli, 2022, dari <https://generasipeneliti.id/tulisan.php?id=IDfUVBiDhX6QPv&judul=Urgensi-Intervensi-Sea-Level-Rise-di-Indonesia>
- Siagian, A. [@almukhollis]. (2022c, 12 Mei). *Gagasan CHI A GIAN* [Reel]. Instagram. https://www.instagram.com/reel/Cddmk_njUT2/?igshid=MDJmNzVkMjY=
- Siders, A. R. (2019). Managed retreat in the United States. *One Earth*, *1*(2), 216–225.
- Sierra-Correa, P. C., & Kintz, J. R. C. (2015). Ecosystem-based adaptation for improving coastal planning for sea-level rise: A systematic review for mangrove coasts. *Marine Policy*, *51*, 385–393. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.09.013>
- Undang-Undang Nomor 6 Tahun 1996 tentang Perairan Indonesia. (1996). <https://peraturan.go.id/id/uu-no-6-tahun-1996>
- University of Leeds. (2018, 13 Juni). *Antarctica ramps up sea level rise*. www.leeds.ac.uk/news/article/4250/antarctica_ramps_up_sea_level_rise
- University of Oxford. (2020). *Sea-level rise in a 4 degree world* [Video presentasi]. <https://podcasts.ox.ac.uk/sea-level-rise-4-degree-world>
- Van de Vuurst, P., & Escobar, L. E. (2020). Perspective: Climate change and the relocation of Indonesia's capital to Borneo. *Frontiers in Earth Science*, *8*, 5.
- Wallace-Wells, D. (2019). *Bumi yang tak dapat dihuni*. Gramedia Pustaka Utama.

- World Bank (2018). *Senegal - Saint-Louis emergency recovery and resilience project (P166538): Combined project information documents / integrated safeguards datasheet (PID/ISDS)* (Report No: PIDISDSA24100).
- Yong, E. L. (2021). Understanding the economic impacts of sea-level rise on tourism prosperity: Conceptualization and panel data evidence. *Advances in Climate Change Research*, 12(2), 240–253.
- Yu, H., Gong, H., & Chen, B. (2022). *Analysis of superposition effect of land subsidence and sea level rise in Tianjin Coastal area and its emerging risks*. Authorea. https://d197for5662m48.cloudfront.net/documents/publicationstatus/77699/preprint_pdf/7a0ba30512ba1c0d26dda6598f772135.pdf
- Zeebe, R. E., Ridgwell, A., & Zachos, J. C. (2016). Anthropogenic carbon release rate unprecedented during the past 66 million years. *Nature Geoscience*, 9, 325–329.