WRI INDONESIA

KERTAS KERJA

Menavigasi Ancaman Genangan Pesisir Permanen dan Potensi Kerugian bagi Pembangunan Provinsi Bali hingga 2045

Penulis: Ardi Nur Armanto, Farijzal Arrafisena, Wira Swadana, Egi Suarga, Sofwan Hakim, Hafidz Abdillah, Dr. Eng. Anjar Dimara Sakti, Cokro Santoso, Ar'rafi Malika Ardy, dan Ifandara Kusuma Cahya Reynaldi

DAFTAR ISI

Ringkasan eksekutif. 2
Pendahuluan. 4
Gambaran umum 7
Pendekatan dan metodologi 17
Temuan studi 23
Rekomendasi strategi penataan ruang. . 38
Kesimpulan 40
Limitasi studi dan saran studi lanjutan . . 40
Lampiran. 42
Daftar singkatan 56
Catatan akhir. 57
Daftar pustaka 57
Ucapan terima kasih 61
Kontribusi penulis. 61
Tentang WRI 61

Kertas kerja berisi hasil sementara dari penelitian, analisis, temuan, dan rekomendasi yang disirkulasikan untuk memantik diskusi dan umpan balik, serta untuk memengaruhi perdebatan terkait isu yang sedang sering dibicarakan. Kertas kerja dapat dipublikasikan dalam bentuk lain dengan isi yang dapat berubah.

Saran cara pengutipan: Armanto, A. N., F. Arrafisena, W. Swadana, E. Suarga, S. Hakim, H. Abdillah, Dr. Eng.Sakti A. D., C. Santoso, A.M. Ardy, dan I.K.C. Reynaldi. 2026. "Menavigasi Ancaman Genangan Pesisir Permanen dan Potensi Kerugian bagi Pembangunan Provinsi Bali hingga 2045." Kertas kerja. Jakarta: WRI Indonesia. Tersedia daring
DOI: https://doi.org/10.46830/wriwp.24.00098
Tautan: https://wri-indonesia.org/id/publikasi/menavigasi-ancaman-genangan-pesisir-permanen-dan-potensi-kerugiannya-bagi-pembangunan

Ide pokok

- Penguatan implementasi adaptasi perubahan iklim dalam penataan ruang wilayah memerlukan dukungan informasi spasial bahaya iklim multiskenario sebagai dasar penyusunan tata ruang yang responsif terhadap berbagai skenario iklim di masa depan.
- Melalui studi kasus bahaya genangan pesisir permanen di Provinsi Bali, Indonesia, hasil analisis spasial menunjukkan wilayah dengan tingkat kerawanan tinggi terkini (2024) hingga proyeksi 2045 terkonsentrasi di Kabupaten Jembrana (± 5.036 hektare; ha), Kabupaten Buleleng (± 4.937 ha), serta Kota Denpasar (± 741 ha).
- Sementara itu, hasil analisis spasial mengindikasikan pertumbuhan kawasan terbangun hingga 2045 akan tetap terkonsentrasi di Kota Denpasar serta Kabupaten Badung, Gianyar, dan Tabanan (Sarbagita). Kondisi tersebut diproyeksikan meningkatkan keterpaparan bangunan terhadap genangan pesisir permanen, dengan nilai kerugian Rp6 triliun–Rp20 triliun (2024) dan Rp14 triliun–Rp44 triliun (2045), atau 4,9–14,8 persen produk domestik regional bruto (PDRB) Provinsi Bali 2024.
- Karena itu, rencana tata ruang wilayah (RTRW) perlu mempertimbangkan sejumlah strategi penataan ruang yang adaptif, seperti penerapan relokasi terencana (*managed retreat*) dan solusi yang bersifat fleksibel dan siap beradaptasi terhadap perubahan kondisi (*no-regret options*), penetapan zona pembatasan pembangunan (*development restriction zones*), pengembangan sabuk hijau pesisir, integrasi solusi berbasis alam (*nature-based solutions*; NbS), serta penapisan risiko iklim (*climate risk screening*) pada kawasan strategis dan infrastruktur vital.

Ringkasan eksekutif

Konteks

Provinsi Bali merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang berpotensi terdampak perubahan iklim, terutama di kawasan pesisir yang menghadapi tekanan dari sejumlah faktor iklim dan dinamika penggunaan lahan. Kerentanan tersebut tecermin dari tingginya kejadian bencana hidrometeorologi selama satu dekade terakhir. Data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menunjukkan, sepanjang periode 2014–24, sekitar 54 persen kejadian bencana yang terjadi di Provinsi Bali merupakan bencana hidrometeorologi dan frekuensi kejadian cuaca ekstrem telah meningkat dari 5 kejadian pada 2014 menjadi 17 kejadian tahun 2024. Hal itu menunjukkan Provinsi Bali dihadapkan pada ancaman bahaya perubahan iklim dengan frekuensi dan intensitas yang diproyeksikan semakin meningkat di masa depan.

Meningkatnya ancaman tersebut mendorong urgensi adanya perencanaan tata ruang wilayah yang mampu mengantisipasi dampak perubahan iklim secara jangka panjang. Dalam konteks ini, pemahaman yang komprehensif mengenai berbagai skenario perubahan iklim di masa depan menjadi landasan penting dalam merumuskan strategi dan arah pemanfaatan ruang. Dengan demikian, rencana tata ruang yang dihasilkan tidak hanya berfokus pada upaya pengurangan dampak kondisi saat ini, tetapi juga antisipasi kondisi di masa depan melalui berbagai strategi adaptasi perubahan iklim. Strategi adaptasi tersebut mencakup, di antaranya, perlindungan dan rehabilitasi ekosistem pesisir, pembangunan infrastruktur perlindungan pantai, pengendalian pemanfaatan ruang pada kawasan yang rawan, serta penguatan instrumen perizinan dan penegakan hukum.

Dalam konteks tersebut, RTRW Provinsi Bali 2023–2043 masih berpeluang untuk diperkuat melalui integrasi informasi proyeksi bahaya iklim berbasis multiskenario perubahan iklim. Pemanfaatan informasi ini dapat membantu mengidentifikasi wilayah yang berpotensi mengalami peningkatan keterpaparan di masa depan. Dengan demikian, informasi tersebut dapat menjadi landasan perumusan strategi pengembangan wilayah yang bukan hanya responsif terhadap kondisi saat ini, melainkan juga adaptif terhadap risiko perubahan iklim serta mampu mengantisipasi dan meminimalkan potensi kerugian di masa mendatang.

Mengenai kertas kerja ini

Tujuan kertas kerja ini

- memetakan potensi kerawanan (*susceptibility*) Provinsi Bali terhadap genangan pesisir permanen pada kondisi terkini (2024) dan proyeksi multiskenario perubahan iklim hingga 2045;
- menganalisis potensi tingkat keterpaparan (*exposure*) dan kerugian yang dapat ditimbulkan melalui kerusakan bangunan di wilayah pesisir yang berpotensi terendam; dan
- menyusun rekomendasi penataan ruang yang lebih berketahanan iklim, khususnya kawasan terbangun (*built-up area*) yang berpotensi terpapar genangan pesisir permanen.

Proyeksi iklim yang digunakan pada studi ini didasarkan pada skenario Shared Socioeconomic Pathways (SSP) 2-4.5 (*moderate emission*) dan SSP5-8.5 (*high emission*). Kedua skenario ini merepresentasikan jalur pembangunan moderat dan tinggi emisi dan digunakan untuk membandingkan proyeksi tersebut dengan kondisi perencanaan tata ruang yang ada saat ini di Provinsi Bali (2023–43). Data yang digunakan pada studi ini mencakup data primer dan sekunder. Data sekunder diperoleh melalui telaah dokumen kebijakan tata ruang. Sementara itu, data primer diperoleh melalui analisis spasial, diskusi terpumpun (*focus group discussion*; FGD) dengan pemangku kepentingan terkait di Provinsi Bali, serta kunjungan lapangan di Kabupaten Jembrana dan Buleleng. Kedua kabupaten tersebut dipilih karena merupakan wilayah dengan jumlah kejadian banjir dan abrasi tertinggi di Provinsi Bali selama periode 2019–24 (BPBD Provinsi Bali 2024).

Temuan utama

Hasil analisis menunjukkan bahwa luas wilayah yang berpotensi mengalami genangan pesisir permanen di Provinsi Bali diproyeksikan terus meningkat dari 2024 hingga 2045. Area dengan tingkat kerawanan tertinggi terkonsentrasi di Kabupaten Jembrana (± 5.036 ha) dan Buleleng (± 4.937 ha), serta Kota Denpasar (± 741 ha). Kedalaman genangan di wilayah-wilayah tersebut umumnya berkisar 0,95–1,48 meter (m), dengan nilai tertinggi tercatat di Kabupaten Jembrana yang mencapai 1,48 m.

Perbedaan antarskenario iklim juga terlihat cukup jelas. Misalnya, pada skenario SSP5-8.5, hampir seluruh kecamatan pesisir di Bali diproyeksikan didominasi tingkat probabilitas genangan tinggi. Adapun pada skenario SSP2-4.5, beberapa wilayah pesisir timur—seperti Kecamatan Klungkung (352 ha), Gianyar (103 ha), dan Karangasem (50 ha)—masih didominasi tingkat probabilitas sedang.

Di sisi lain, tren pembangunan wilayah di Provinsi Bali berdasarkan RTRW 2023–2043 masih terkonsentrasi di Sarbagita, yang berpotensi meningkatkan keterpaparan sejumlah bangunan di wilayah pesisir terhadap genangan pesisir permanen. Hal ini tecermin dari analisis proyeksi yang menunjukkan bahwa total luas keseluruhan kawasan terbangun di wilayah pesisir di Provinsi Bali yang terendam

akan meningkat 25 persen dari sekitar 12.000 ha (2024) menjadi 15.000 ha (2045), dengan implikasi kenaikan potensi kerugian kerusakan bangunan dari dari Rp6 triliun (US$360 juta) – Rp20 triliun ($1,21 miliar) menjadi Rp14 triliun ($840 juta) –Rp44 triliun ($2,65 miliar) dalam skenario SSP2-4.5, setara 4,9–14,8 persen PDRB 2024.

Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis, studi ini merekomendasikan penguatan RTRW Provinsi Bali sebagai upaya mengurangi keterpaparan dan potensi dampak genangan pesisir permanen, khususnya dalam aspek rencana pola ruang, struktur ruang, dan kawasan strategis.

- **Rencana pola ruang**

  Cakupan rencana pola ruang

  - melakukan peninjauan ulang peruntukan ruang, khususnya pada kawasan budidaya, seperti kawasan permukiman, pergaraman, perikanan, pertanian, pariwisata, pertambangan dan energi, serta kawasan peruntukan industri yang berada dalam zona rawan genangan pesisir permanen;
  - mendorong penerapan prinsip relokasi terencana (*managed retreat*) dan solusi yang bersifat fleksibel dan siap beradaptasi terhadap perubahan kondisi (*no-regret options*) untuk kawasan yang diproyeksikan paling terpapar, baik secara genangan maupun kerugian kerusakan bangunan di wilayah pesisir;
  - menetapkan zona pembatasan pembangunan (*development restriction zones*), khususnya pada wilayah dengan proyeksi genangan lebih dari 0,7 m, seperti di Kabupaten Buleleng dan Jembrana, dan dialihfungsikan sebagai kawasan lindung berupa sabuk hijau pesisir; dan
  - mengintegrasikan solusi berbasis alam (NbS), meliputi restorasi mangrove, pemulihan sempadan pantai, dan rehabilitasi aliran sungai, dengan infrastruktur pengendali genangan pesisir dan tanggul yang ada saat ini di Kabupaten Gianyar, Karangasem, Klungkung, dan Tabanan.

- **Rencana struktur ruang**

  Cakupan rencana struktur ruang

  - memasukkan ketentuan penapisan risiko iklim (*climate risk screening*) dan standar ketahanan iklim sebagai prasyarat dalam perencanaan dan pengembangan infrastruktur di wilayah pesisir, termasuk rencana kontingensi layanan publik;
  - mengarahkan relokasi, redesain elevasi, ataupun perlindungan tambahan bagi jaringan infrastruktur yang diproyeksikan terpapar genangan pesisir permanen, seperti pelabuhan, pembangkit listrik, dan bandara, serta membatasi pembangunan infrastruktur baru di zona rawan tinggi pada beberapa wilayah di Kabupaten Badung, Buleleng, Gianyar, Jembrana, dan Klungkung, serta Kota Denpasar; dan
  - menetapkan kawasan pusat-pusat pertumbuhan yang berada di wilayah rendaman, yaitu Pusat Kegiatan Nasional Sarbagita, Pusat Kegiatan Wilayah Buleleng, dan Pusat Kegiatan Wilayah Jembrana, sebagai zona pengendalian ketat berbasis indeks kerawanan, melalui pembatasan intensitas pembangunan baru, dan penerapan standar bangunan berketahanan iklim.

- **Rencana kawasan strategis**

  Cakupan rencana kawasan strategis

  - mengintegrasikan analisis kerawanan dan potensi kerugian genangan pesisir permanen akibat perubahan iklim dalam penetapan dan pengelolaan kawasan strategis, termasuk menambah kawasan strategis untuk fungsi dan daya dukung lingkungan di beberapa wilayah pesisir yang rawan di Kabupaten Badung, Buleleng, Gianyar, Jembrana, dan Klungkung, serta Kota Denpasar; dan
  - memprioritaskan perlindungan kawasan dengan nilai ekonomi, budaya, dan ekologis tinggi melalui zonasi adaptasi dan pembatasan pemanfaatan ruang.

Pendahuluan

Latar belakang

Sebagai negara kepulauan dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia (lebih dari 95.181 kilometer; km), wilayah pesisir Indonesia memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap perubahan iklim (Bappenas 2021). Data Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas) (2021) mencatat bahwa terdapat 311 kabupaten/kota (60,5 persen dari total kabupaten/kota), 1.643 kecamatan (22,6 persen dari total kecamatan), dan 6.367 desa/kelurahan (7,6 persen dari total desa/kelurahan) di wilayah pesisir yang tergolong rentan terhadap perubahan iklim dan bencana hidrometeorologi yang terjadi akibat aktivitas cuaca, air, atau iklim seperti siklus hidrologi, curah hujan, angin, dan temperatur. Peningkatan kerentanan itu berimplikasi signifikan, dengan potensi kerugian ekonomi pada sektor kelautan dan pesisir diperkirakan mencapai Rp81,82 triliun pada 2024, atau sekitar 14,75 persen dari produk domestik bruto (PDB) sektor perikanan nasional sebesar Rp554 triliun (KKP 2025).

Risiko wilayah pesisir terhadap perubahan iklim tidak hanya dipengaruhi oleh bahaya iklim (*hazards*[1]), tetapi juga oleh dinamika pembangunan yang berlangsung di wilayah tersebut. Aktivitas pembangunan di wilayah pesisir yang mendorong perubahan penggunaan lahan, peningkatan tekanan urbanisasi, dan pertumbuhan jumlah penduduk dapat meningkatkan tingkat paparan (*exposure*[2]) dan kerentanan (*vulnerability*[3]) (IPCC 2007; Rosenzweig dan Solecki 2001).

Peningkatan jumlah atau kepadatan penduduk, perubahan guna lahan di wilayah hulu, dan ekspansi infrastruktur di wilayah pesisir dapat menjadi pendorong (*drivers*) yang menghasilkan berbagai tekanan (*pressures*), seperti peningkatan limpasan permukaan, beban polutan, serta perubahan kuantitas dan distribusi sedimen menuju wilayah pesisir. Tekanan-tekanan tersebut mengubah kondisi ekosistem pesisir yang pada akhirnya memengaruhi kapasitas sistem dalam menyediakan jasa perlindungan alami terhadap gelombang ekstrem, abrasi, hingga genangan pesisir permanen.

Pendekatan ini konsisten dengan analisis yang dikemukakan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) dalam Working Group II AR6 dan International Resource Panel (2020). Analisis tersebut memaparkan bahwa tekanan berbasis daratan (*land-based drivers*) memengaruhi jasa ekosistem pesisir melalui rantai sebab-akibat ekologis, bukan semata melalui perubahan langsung pada satu komponen ekosistem. Sebagai contoh, tekanan berbasis daratan akibat aktivitas manusia tersebut telah membuat Jakarta menjadi salah satu kota pesisir di Indonesia yang rentan terhadap perubahan iklim, seperti terjadinya banjir akibat limpasan air dari hulu hingga ke pesisir di bagian utara Provinsi DKI Jakarta.

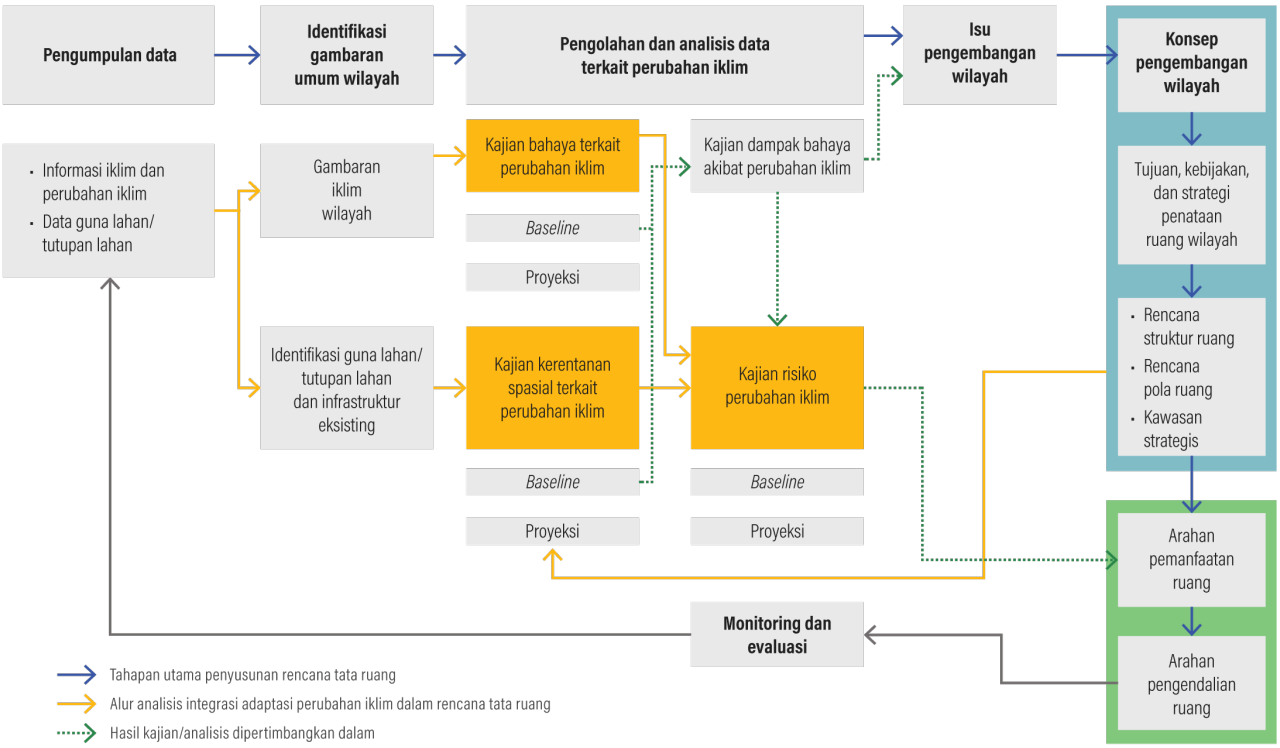
Menyadari besarnya dampak perubahan iklim yang dapat terjadi, Pemerintah Indonesia telah menempatkan ketahanan terhadap perubahan iklim sebagai bagian dari agenda pembangunan nasional. Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2025–2045 menargetkan penurunan kerugian ekonomi akibat bencana dari 0,14 persen pada 2025 menjadi 0,11 persen pada 2045 (Bappenas 2025). Arah kebijakan dan program prioritas yang terdapat pada dokumen RPJPN 2025–2045 tersebut telah menjadi mandat bagi penyusunan dokumen rencana pembangunan jangka panjang daerah (RPJPD) bagi setiap provinsi. Sebagai contoh, Provinsi Bali telah menyusun dokumen RPJPD 2025–2045 yang menempatkan resiliensi terhadap bencana dan perubahan iklim sebagai salah satu arah kebijakan dan program prioritas. Indikator utama yang digunakan ialah penurunan indeks risiko bencana dari 123,98 pada 2025 menjadi antara 101,04 dan 81,45 pada 2045 (Bappeda Provinsi Bali 2025).

Selain itu, komitmen Indonesia dalam penguatan adaptasi perubahan iklim juga tecermin dalam berbagai dokumen kebijakan nasional, seperti *nationally determined contribution* (NDC) dan Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050 (LTS-LCCR 2050), yang menitikberatkan pada upaya pengurangan risiko, peningkatan kapasitas adaptasi, penguatan ketahanan, dan penurunan kerentanan terhadap perubahan iklim. Komitmen tersebut kemudian diterjemahkan ke dalam kebijakan sektoral, salah satunya melalui Peraturan Menteri Agraria dan Tata Ruang/Kepala Badan Pertanahan Nasional Nomor 11 Tahun 2021 yang mewajibkan integrasi aspek perubahan iklim dalam penyusunan rencana tata ruang, serta diperkuat melalui Petunjuk Teknis Nomor 5/Juknis-HK.02.01/VI/2024 tentang Integrasi Adaptasi Perubahan Iklim ke dalam Perencanaan Tata Ruang.

Permasalahan, tujuan, dan pertanyaan studi

Meskipun kerangka kebijakan dan regulasi nasional telah mengamanatkan integrasi adaptasi perubahan iklim dalam pembangunan dan penataan ruang wilayah (Gambar 1), implementasi di tingkat daerah masih memerlukan dukungan informasi ilmiah yang mampu menggambarkan berbagai skenario perubahan iklim di masa depan. Sejumlah studi menunjukkan, keterbatasan pengetahuan, informasi, serta ketersediaan dan kualitas data masih menjadi tantangan dalam penguatan aspek analisis dalam perencanaan daerah (Wijaya et al. 2017). Untuk mengatasi hambatan tersebut, pengelolaan data, mulai dari pengumpulan, analisis, hingga penyajian data, menjadi kapasitas yang perlu ditingkatkan oleh pemerintah daerah. Upaya ini dapat didukung melalui penyediaan dan akses data yang lebih baik dari pemerintah pusat, serta kolaborasi dengan lembaga penelitian, akademisi, sektor swasta, dan organisasi nonpemerintah (Wijaya et al. 2017).

Gambar 1 | **Proses integrasi kajian risiko dan adaptasi perubahan iklim dalam dokumen rencana tata ruang di Indonesia**



Sumber: Kementerian ATR/BPN 2024..

Dalam konteks tersebut, analisis bahaya iklim berdasarkan multiskenario perubahan iklim beserta potensi dampaknya pada tingkat daerah dan lokal menjadi landasan penting dalam penyusunan konsep pengembangan wilayah yang lebih adaptif. Ketersediaan informasi tersebut diharapkan dapat mendukung pengambilan kebijakan berbasis bukti (*evidence-based policy making*) dan memperkuat upaya mewujudkan pembangunan yang berketahanan iklim.

Berangkat dari kebutuhan tersebut, studi ini bertujuan mendukung implementasi panduan teknis integrasi analisis dampak perubahan iklim ke dalam rencana tata ruang. Dukungan itu melalui penyajian contoh penerapan integrasi data dan informasi spasial bahaya terkait perubahan iklim untuk kondisi *baseline* dan proyeksi berdasarkan multiskenario perubahan iklim ke dalam proses perencanaan tata ruang. Dengan mengambil studi kasus wilayah pesisir Provinsi Bali, analisis ini mengilustrasikan pengaruh berbagai skenario iklim di masa depan terhadap probabilitas terjadinya bahaya akibat perubahan iklim serta tingkat keterpaparan pembangunan dan pemanfaatan ruang terhadap bahaya tersebut. Salah satu contoh dampak yang ditunjukkan ialah kerusakan bangunan di wilayah pesisir.

Wilayah pesisir Provinsi Bali dipilih sebagai studi kasus untuk dikembangkan sebagai contoh bagi daerah lain mengingat pesisir Pulau Bali termasuk wilayah yang rentan terhadap bencana akibat perubahan iklim. Sekitar 22 persen garis pantai (138 km) di Pulau Bali dikategorikan sangat rentan dan 26 persen (164 km) dikategorikan rentan tinggi terhadap kenaikan muka laut dan erosi pantai (Hastuti et al. 2022). Data BNPB sepanjang periode 1999–2019 juga mencatat abrasi pantai dan gelombang tinggi telah terjadi 22 kali dan merusak sekitar 332 ha lahan di pesisir Pulau Bali. Sepanjang tahun 2024 pun abrasi pantai telah merusak bangunan milik 180 keluarga di Kabupaten Jembrana (Denpost 2024), sementara Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) pada 2022 memperkirakan potensi banjir pesisir di 27 titik pantai di Bali (Detikcom 2022).

Di sisi lain, Provinsi Bali memiliki konsentrasi aktivitas ekonomi yang tinggi di wilayah pesisir, khususnya sektor pariwisata beserta infrastruktur pendukung dan permukimannya, yang menyumbang sekitar 19,93 persen terhadap produk domestik regional bruto (PDRB) (BPS Provinsi Bali 2025a). Konsentrasi ini meningkatkan keterpaparan aset ekonomi dan masyarakat terhadap berbagai bahaya iklim, seperti banjir pesisir, abrasi, dan gelombang

ekstrem. Selain itu, peningkatan kepadatan penduduk dan alih fungsi lahan yang pesat di wilayah pesisir turut memperbesar tingkat kerentanan terhadap dampak perubahan iklim. Tanpa mempertimbangkan skenario perubahan iklim dalam arah pembangunan, wilayah pesisir Pulau Bali berpotensi semakin rentan terhadap bencana alam seperti abrasi, banjir pesisir, dan genangan pesisir permanen.

Meskipun terdapat berbagai jenis bahaya iklim yang relevan di wilayah pesisir, studi ini secara khusus memfokuskan analisis pada genangan (*inundation*) pesisir permanen. Bahaya ini dipilih karena berpotensi menimbulkan dampak jangka panjang dan bersifat relatif tidak dapat dipulihkan (*irreversible*) dibandingkan dengan kejadian pesisir yang bersifat episodik, seperti banjir rob (*coastal flooding*) dan gelombang ekstrem (Flick et al. 2012). Genangan pesisir permanen dapat menyebabkan hilangnya lahan secara permanen, mengganggu fungsi ruang, serta mengancam kawasan dengan konsentrasi aktivitas ekonomi dan infrastruktur vital.

Selain meningkatkan risiko terhadap keberlanjutan fungsi kawasan, fenomena ini juga berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi yang besar, antara lain akibat kerusakan aset dan properti. Dalam studi ini, estimasi potensi tingkat kerawanan (*susceptibility*)[4] dan keterpaparan (*exposure*) dianalisis menggunakan skenario Shared Socioeconomic Pathways (SSP), yaitu skenario iklim global yang merepresentasikan berbagai kemungkinan jalur perkembangan sosial-ekonomi hingga 2045 dan memberikan gambaran mengenai kondisi masa depan yang berbeda pada setiap skenario.

Dalam konteks tersebut, proyeksi kerawanan genangan pesisir permanen dari 2024 hingga 2045, beserta tingkat keterpaparan kawasan terbangun di wilayah pesisir dan potensi kerugiannya jika terendam, dapat menjadi dasar penting dalam tahap evaluasi dan pembaruan dokumen perencanaan di Provinsi Bali, termasuk Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Provinsi Bali 2023–2043. Integrasi informasi tersebut diharapkan dapat memastikan arah pembangunan dan pemanfaatan ruang tidak hanya didasarkan pada kondisi iklim saat ini, tetapi juga mempertimbangkan proyeksi perubahan iklim di masa depan. Dengan demikian, kebijakan tata ruang yang dihasilkan diharapkan mampu mengurangi peningkatan keterpaparan aset dan aktivitas pembangunan terhadap bahaya perubahan iklim dalam jangka panjang.

Dengan kerangka tersebut, penelitian ini berupaya menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- Bagaimana tingkat kerawanan genangan pesisir permanen di wilayah Provinsi Bali terkini (2024) dan berdasarkan proyeksi hingga 2045?
- Bagaimana tingkat keterpaparan serta potensi kerugian akibat kerusakan bangunan yang disebabkan genangan pesisir permanen di Provinsi Bali terkini (2024) dan berdasarkan proyeksi hingga 2045?
- Strategi apa yang diperlukan untuk mengurangi keterpaparan kawasan terbangun di wilayah pesisir Bali terhadap genangan pesisir permanen pada 2024 hingga 2045?

Studi ini diharapkan dapat memberikan masukan bagi Pemerintah Provinsi Bali dalam mengevaluasi dan memperbarui RTRW Provinsi Bali yang ditinjau dan direvisi setiap lima tahun. Selain itu, studi ini juga diharapkan dapat menjadi contoh penerapan perencanaan tata ruang berbasis ketahanan iklim bagi pemerintah pusat ataupun daerah lain di Indonesia. Secara khusus, studi ini akan menyediakan

- informasi spasial rinci mengenai tingkat kerawanan genangan pesisir permanen di wilayah pesisir Provinsi Bali pada tahun dasar (2024) dan proyeksi hingga 2045;
- estimasi tingkat keterpaparan dan potensi kerugian kerusakan bangunan akibat genangan pesisir permanen di wilayah pesisir Provinsi Bali pada kondisi terkini (2024) dan proyeksi hingga 2045; dan
- strategi untuk mengurangi keterpaparan kawasan terbangun di wilayah pesisir Provinsi Bali terhadap genangan pesisir permanen hingga 2045.

Hipotesis studi

Seperti disebutkan sebelumnya, proyeksi genangan pesisir permanen hingga 2045 dalam studi ini dianalisis menggunakan kerangka SSP. Analisis difokuskan pada dua skenario, yaitu skenario moderat (SSP2-4.5) yang merepresentasikan pembangunan dengan tingkat emisi gas rumah kaca menengah, serta skenario pesimistis (SSP5-8.5) yang menggambarkan pembangunan yang masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil dengan tingkat emisi yang tinggi.

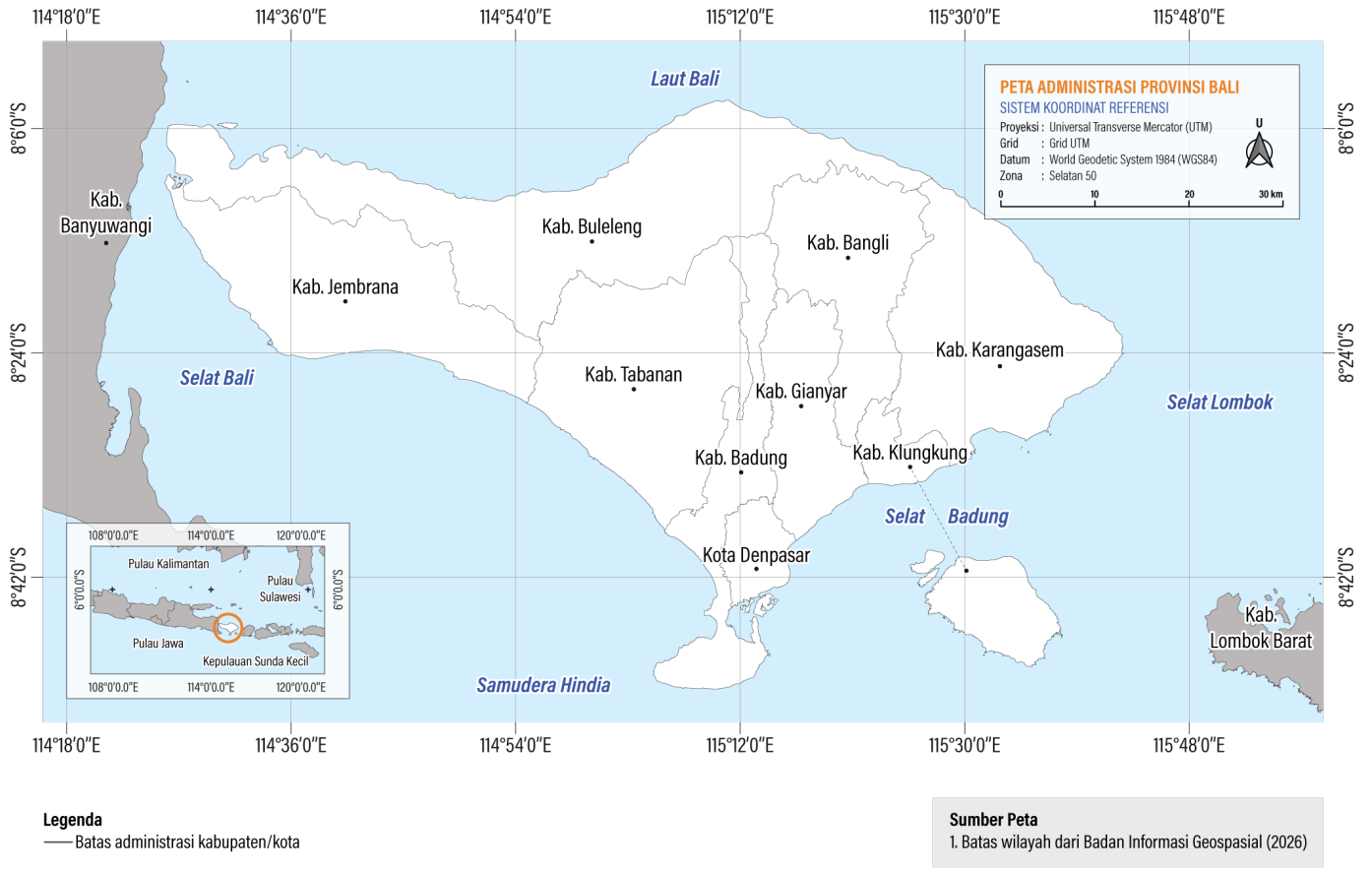
Berdasarkan kedua skenario tersebut, studi ini mengasumsikan wilayah pesisir Provinsi Bali akan menghadapi peningkatan kerawanan genangan pesisir permanen pada 2024 hingga 2045, dengan tingkat keterpaparan yang lebih besar pada skenario SSP5-8.5 (*high emission*). Peningkatan intensitas kerawanan tersebut diperkirakan akan memperluas keterpaparan kawasan terbangun di wilayah pesisir dan meningkatkan potensi kerugian kerusakan bangunan akibat perubahan iklim. Temuan ini mengindikasikan perlunya strategi berketahanan iklim dalam RTRW Provinsi Bali untuk mencegah meluasnya kawasan terbangun yang terpapar genangan pesisir permanen, baik melalui penyesuaian pola ruang, arahan pemanfaatan ruang, maupun penguatan kapasitas pada kawasan strategis yang diproyeksikan semakin terpapar.

Gambaran umum

Provinsi Bali terletak di antara Pulau Jawa dan Pulau Lombok dengan karakter topografi yang dibelah oleh jajaran pegunungan di bagian tengah yang membentuk dua wilayah geografis utama: dataran sempit dan curam di utara serta dataran landai yang lebih luas di selatan. Dengan luas wilayah 5.590,15 kilometer persegi (km^2), Provinsi Bali terbagi secara administratif ke dalam delapan kabupaten dan satu kota, yaitu Kota Denpasar sebagai ibu kota provinsi (Bappeda Provinsi Bali 2025) (Gambar 2). Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Bali (2025a) memperkirakan jumlah penduduk Bali pada tahun 2024 mencapai 4,43 juta jiwa pada tahun 2024, dengan sebagian besar populasi terkonsentrasi di wilayah pesisir yang mencakup 65 persen dari total kecamatan di Bali.

Perekonomian Bali didominasi sektor akomodasi dan penyediaan makan minum (19,93 persen dari PDRB); diikuti oleh sektor pertanian, kehutanan, dan perikanan (13,73 persen); serta sektor transportasi dan pergudangan (10,08 persen) (BPS Provinsi Bali 2025a). Dominasi sektor akomodasi ini perlu menjadi perhatian, mengingat sejumlah kawasan pariwisata serta perdagangan dan jasa berlokasi di wilayah pesisir Provinsi Bali. Karena itu sektor ini sangat rentan terhadap dampak perubahan iklim, seperti abrasi pantai, gelombang ekstrem, dan genangan pesisir permanen. Gangguan pada sektor ini berpotensi memberikan dampak lanjutan terhadap stabilitas ekonomi Bali secara keseluruhan.

Gambar 2 | **Peta administrasi Provinsi Bali**



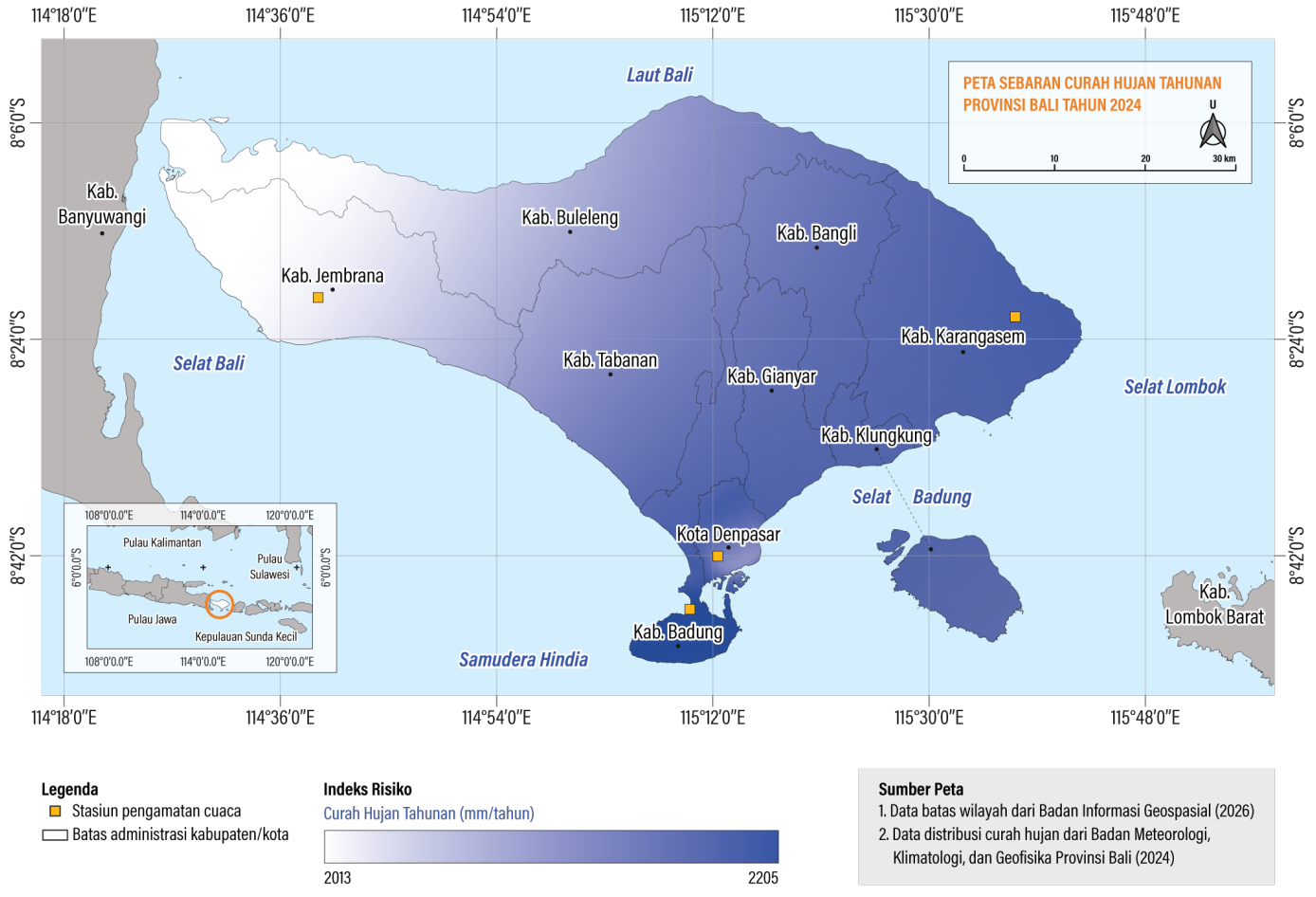
Sumber: Diadaptasi dari data Badan Informasi Geospasial (BIG) (2026).

Kondisi iklim dan temperatur Provinsi Bali

Berdasarkan data meteorologi tahun 2020 dari stasiun pengamatan BMKG, suhu udara rata-rata di Provinsi Bali berkisar 26,3°C hingga 28,2°C dengan suhu tertinggi tercatat sebesar 32,8°C di Kota Denpasar, sementara suhu terendah tercatat sebesar 22,8°C di Kabupaten Karangasem (Pemerintah Provinsi Bali 2023). Seperti wilayah Indonesia lainnya, Provinsi Bali memiliki iklim monsun tropis dengan dua musim utama, yaitu musim hujan dengan curah hujan tinggi berlangsung dari November hingga Maret, diikuti dengan musim kemarau dari April hingga Oktober (BNPB 2021).

Adapun curah hujan di Provinsi Bali menunjukkan variasi spasial. Wilayah sekitar Kota Denpasar, Kabupaten Badung, Kabupaten Gianyar, dan Kabupaten Tabanan (Sarbagita) umumnya memiliki curah hujan tinggi yang mencapai 2.205,18 milimeter (mm) di wilayah Kabupaten Badung pada 2024 (BMKG 2024) (Gambar 3). Namun, sebaliknya, pada musim kemarau, wilayah ini menjadi salah satu wilayah yang cukup kering dibandingkan dengan wilayah lainnya di Pulau Bali.

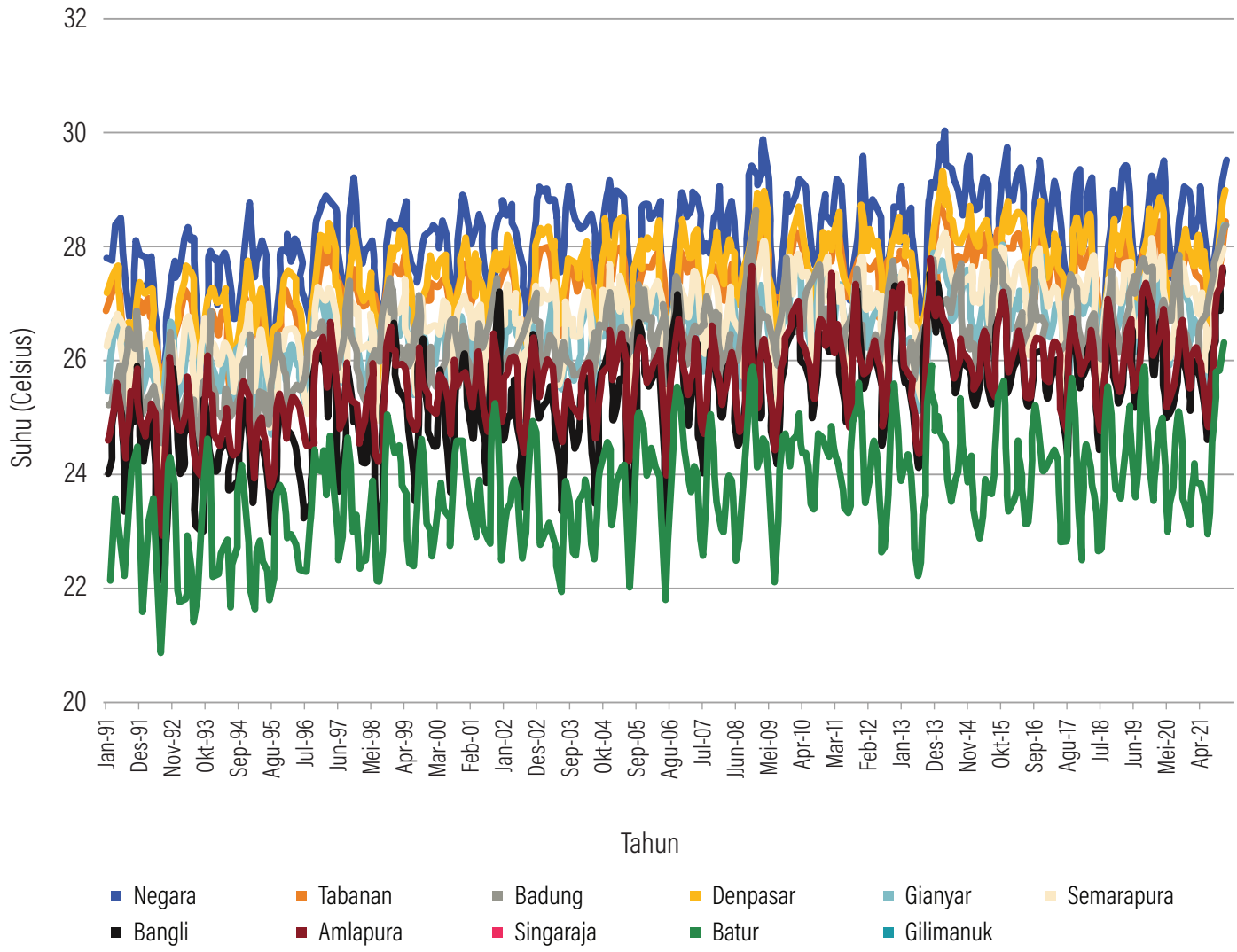
Gambar 3 | **Pola sebaran curah hujan tahunan Provinsi Bali tahun 2024**



Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Secara temporal, berdasarkan pengamatan selama periode 1991–2023, sekitar 79 persen wilayah di Provinsi Bali telah menunjukkan tren peningkatan curah hujan, meskipun beberapa kawasan dataran tinggi mengalami penurunan curah hujan (Hadiasuata dan Jendra 2024). Sebuah studi pada 2022 (Gambar 4) juga menunjukkan suhu permukaan di Bali selama periode 1991–2021 telah meningkat di seluruh wilayah dengan rata-rata suhu permukaan 26,6°C, dengan nilai maksimum 30,1°C di Kecamatan Gilimanuk pada Desember 2013 dan nilai minimum 21°C di Kecamatan Batur pada September 1992 (Toersilowati et al. 2022).

Gambar 4 | **Suhu permukaan di Provinsi Bali tahun 1991-2021**

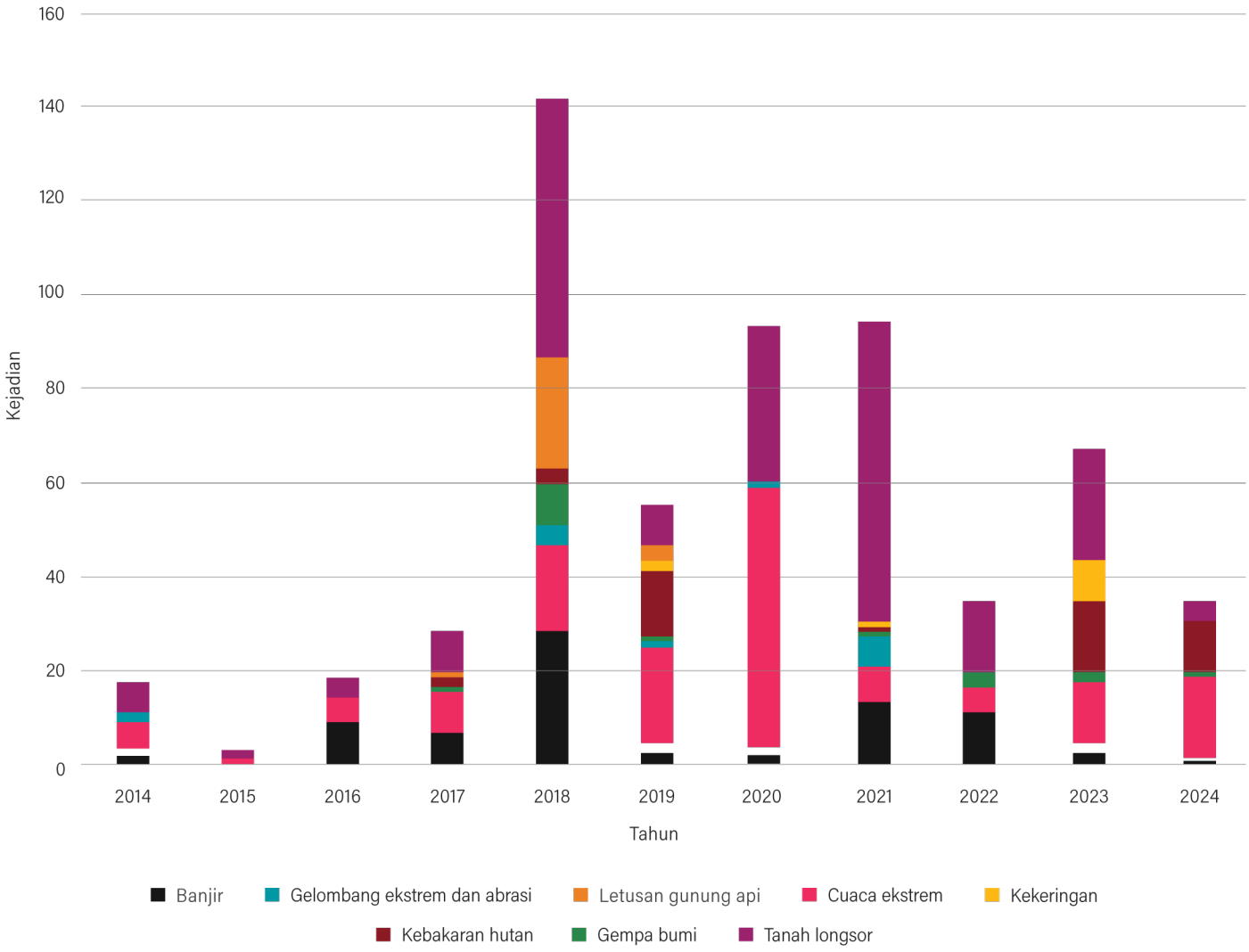


Sumber: Toersilowati et al. 2022.

Bencana terkait iklim di Provinsi Bali

Selama tahun 2014–24, Provinsi Bali telah mencatat 593 kejadian bencana (BNPB 2024) (Gambar 5). Dari total tersebut, lima jenis bencana hidrometeorologi menyumbang sekitar 54 persen dari keseluruhan kejadian yang tercatat dalam periode yang sama. Selain itu, tren beberapa tahun terakhir juga menunjukkan peningkatan frekuensi bencana iklim tertentu, seperti kebakaran hutan dan cuaca ekstrem.

Gambar 5 | **Kecenderungan kejadian bencana di Provinsi Bali tahun 2014-24**



Sumber: BNPB 2024.

Selain dari segi frekuensi, data BPBD Provinsi Bali menunjukkan bahwa dampak bencana iklim di Provinsi Bali sepanjang 1999–2019 juga cukup signifikan. Banjir memiliki dampak terbesar, baik dari sisi jumlah korban jiwa maupun kerusakan pada bangunan dan lahan (Tabel 1). Selain itu, terdapat beberapa jenis bencana iklim lain yang, meskipun terjadi dengan frekuensi lebih rendah, dampaknya justru cenderung lebih besar jika dibandingkan dengan jumlah kejadiannya. Contohnya kekeringan, misalnya yang disebabkan serangan panas (*heatwave*), yang telah menyebabkan lebih banyak kematian dan morbiditas daripada erupsi gunung berapi dan longsor. Demikian pula gelombang ekstrem dan abrasi pantai, yang walaupun hanya tercatat terjadi 22 kali telah menyebabkan kerusakan lahan seluas 332 ha, menjadikannya sebagai bencana dengan dampak kerusakan lahan terbesar ketiga di Provinsi Bali.

Tabel 1 | **Riwayat kejadian bencana di provinsi Bali tahun 1999-2019**

No.	Bencana	Jumlah kejadian	Korban Jiwa (orang)	Morbiditas (orang)	Hilang (orang)	Mengungsi (orang)	Bangunan rusak berat (unit)	Bangunan rusak ringan (unit)	Kerusakan lahan (ha)
1	Banjir	98	2.981	376	13	46.759	4.222	353	5348
2	Cuaca ekstrem (angin puting beliung)	117	48	334	11	820	4.662	53	1.026
3	Gelombang ekstrem dan abrasi	22	5	91	-	-	58	4	332
4	Gempa bumi	34	5	-	-	10.016	6	3	-
5	Kebakaran hutan	29	10	14	-	26	9	4	65
6	Kekeringan	27	493	362	1	625	218	-	17
7	Letusan gunung api	36	3	-	-	11.523	8	15	-
8	Tanah longsor	131	25	44	1	67.766	108	103	154
	Total	**494**	**3.570**	**1.221**	**26**	**137.535**	**9.291**	**535**	**6.942**

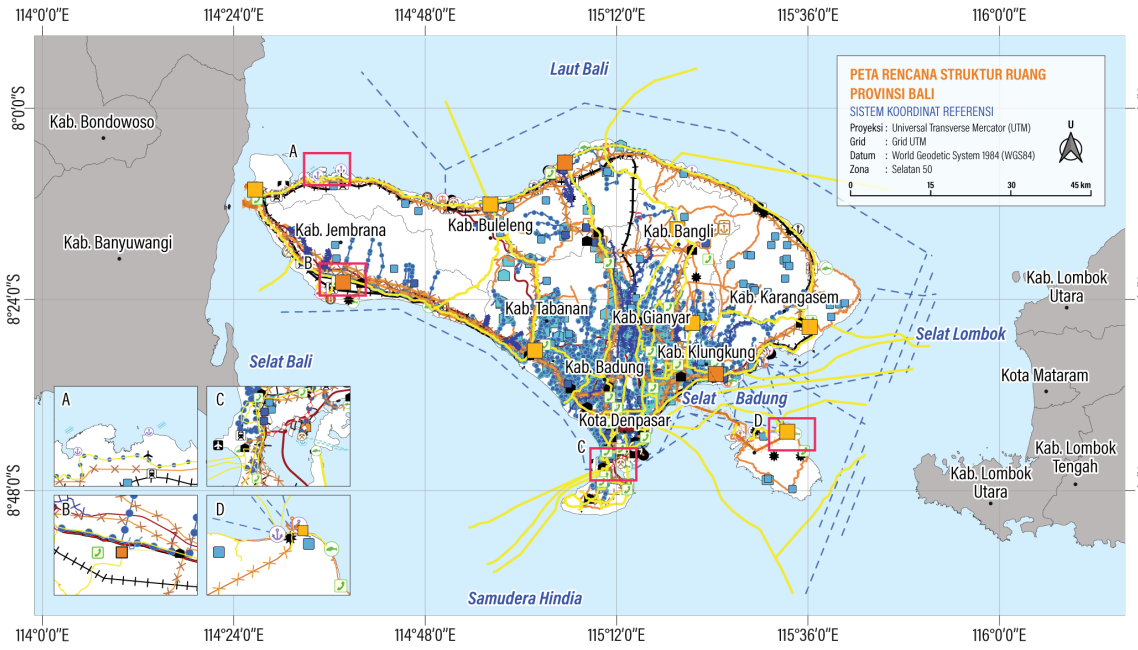
Sumber: BPBD Provinsi Bali 2024.

Rencana pengembangan wilayah Provinsi Bali

Pemerintah Provinsi Bali telah menyusun dokumen RTRW Provinsi Bali 2023–2043 berdasarkan Peraturan Daerah (Perda) Provinsi Bali Nomor 2 Tahun 2023. Dokumen ini menjadi acuan utama dalam mengarahkan pengembangan wilayah Bali secara spasial dan kewilayahan dengan berlandaskan nilai kearifan lokal *Sad Kerthi* dan *Tri Hita Karana*, yang menekankan keseimbangan hubungan antara manusia, alam, dan spiritualitas. Melalui landasan tersebut, penataan ruang di Provinsi Bali diarahkan untuk mewujudkan pembangunan yang mampu menjaga kelestarian lingkungan sekaligus mendukung pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat.

Secara spasial dan kewilayahan, RTRW tersebut mengarahkan pengembangan wilayah melalui penguatan struktur ruang yang bertumpu pada Pusat Kegiatan Nasional (PKN) Sarbagita sebagai pusat utama aktivitas ekonomi, pemerintahan, perdagangan, jasa, permukiman, dan pariwisata internasional (Gambar 6). Konsentrasi fungsi-fungsi strategis tersebut diikuti oleh pengembangan jaringan infrastruktur transportasi, utilitas, dan pelayanan publik yang sebagian besar terpusat di Bali selatan. Dengan arah kebijakan tersebut, pertumbuhan kawasan terbangun (*built-up area*) diperkirakan akan terus berkembang di koridor Sarbagita dan wilayah penyangganya, seiring meningkatnya kebutuhan ruang untuk mendukung aktivitas ekonomi dan pariwisata.

Gambar 6 | **Rencana struktur ruang Provinsi Bali 2023–43**



Legenda
- Batas administrasi kabupaten/kota

Sistem jaringan SDA
- Jaringan pengendalian banjir
- Jaringan irigasi

Sistem pusat permukiman
- Pusat kegiatan lokasl (PKL)
- Pusat kegiatan wilayah (PKW)
- Pusat kegiatan nasional (PKN)

Infrastruktur telekomunikasi
- Infrastruktur jaringan tetap

Sistem jaringan energi
- Jaringan minyak dan gas bumi
- Jaringan pipa/kabel bawah laut
- Jaringan transmisi tenaga listrik

Infrastruktur SDA
- Bangunan pengendalian banjir
- Bangunan sumber daya air

Sistem jaringan transportasi
- Alur-pelayaran khusus
- Alur-pelayaran masuk pelabuhan
- Alur-pelayaran sungai dan danau
- Alur-pelayaran umum dan perlintasan
- Jalan arteri primer
- Jalan kolektor primer
- Jalan tol
- Jalur pendaratan dan penerbangan di laut
- Jalur kereta api

Infrastruktur energi
- Gardu listrik
- Infrastruktur minyak dan gas bumi
- Infrastruktur pembangkitan tenaga listrik

Sistem jaringan prasarana lain
- Jaringan SPAL
- Jaringan SPAM

Sistem jaringan telekomunikasi
- Jaringan tetap

Infrastruktur prasarana lain
- Infrastruktur SPAL
- Infrastruktur SPAM
- Sistem jaringan persampahan
- Sistem pengelolaan limbah B3

Infrastruktur transportasi
- Bandar udara khusus
- Bandar udara pengumpul
- Jembatan timbang
- Pangkalan pendaratan ikan
- Pelabuhan pengumpan
- Pelabuhan pengumpul
- Pelabuhan penyeberangan
- Pelabuhan perikanan nusantara
- Pelabuhan sungai dan danau
- Pelabuhan utama
- Stasiun kereta api
- Terminal barang
- Terminal khusus
- Terminal penumpang tipe A
- Terminal penumpang tipe B

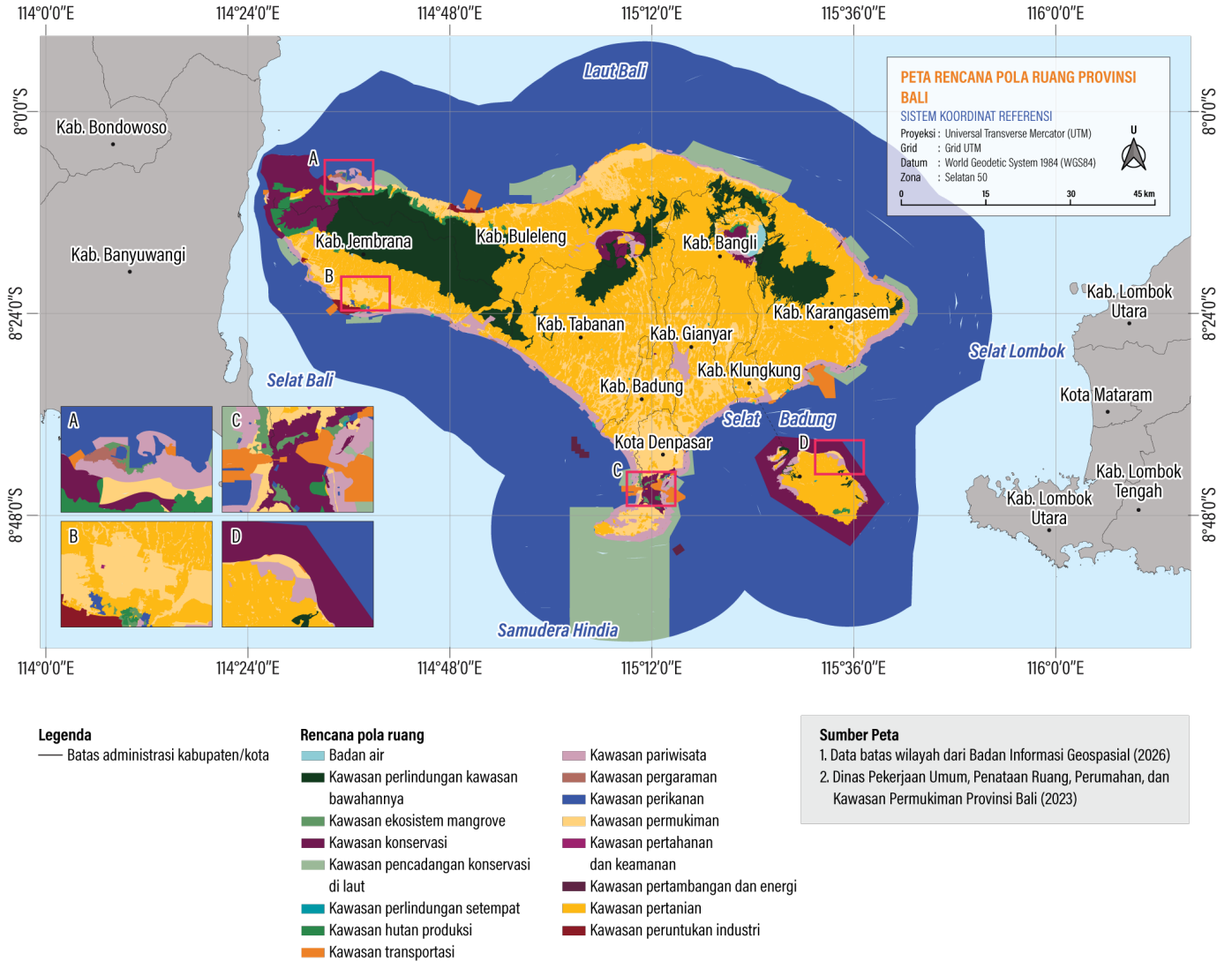
Sumber Peta
1. Data batas wilayah dari Badan Informasi Geospasial (2026)
2. Dinas Pekerjaan Umum, Penataan Ruang, Perumahan, dan Kawasan Permukiman Provinsi Bali (2023)

Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Di luar kawasan Sarbagita, RTRW juga mendorong pengembangan pusat-pusat pertumbuhan baru di wilayah pesisir melalui penguatan ekonomi kelautan dan konektivitas antarwilayah. Pengembangan ini mencakup berbagai tipe kawasan ekonomi pesisir, seperti pusat perikanan tangkap, budidaya akuakultur, industri pengolahan hasil laut, produksi garam, riset dan pengembangan akuakultur, hingga pariwisata bahari (Lampiran A). Berbagai pusat pertumbuhan tersebut tersebar di hampir seluruh kabupaten/kota dan didukung pengembangan infrastruktur strategis, termasuk Pelabuhan Benoa, Gilimanuk, Celukan Bawang, Padangbai, Amed, dan Nusa Penida. Arah pengembangan tersebut mengindikasikan tekanan pembangunan tidak hanya akan terkonsentrasi di Bali selatan, tetapi juga berpotensi meluas ke berbagai kawasan pesisir lainnya.

Dari sisi rencana pola ruang, wilayah pesisir Bali (khususnya pesisir selatan) juga didominasi kawasan peruntukan pariwisata yang menjadi salah satu penggerak utama perekonomian daerah (Gambar 7). Konsentrasi kawasan transportasi dan permukiman juga cenderung lebih tinggi di wilayah pesisir daripada di bagian tengah Pulau Bali, yang berupa bukit dan dataran tinggi, sehingga menunjukkan tingginya intensitas aktivitas sosial dan ekonomi di wilayah pesisir.

Gambar 7 | **Rencana pola ruang Provinsi Bali 2023–43**

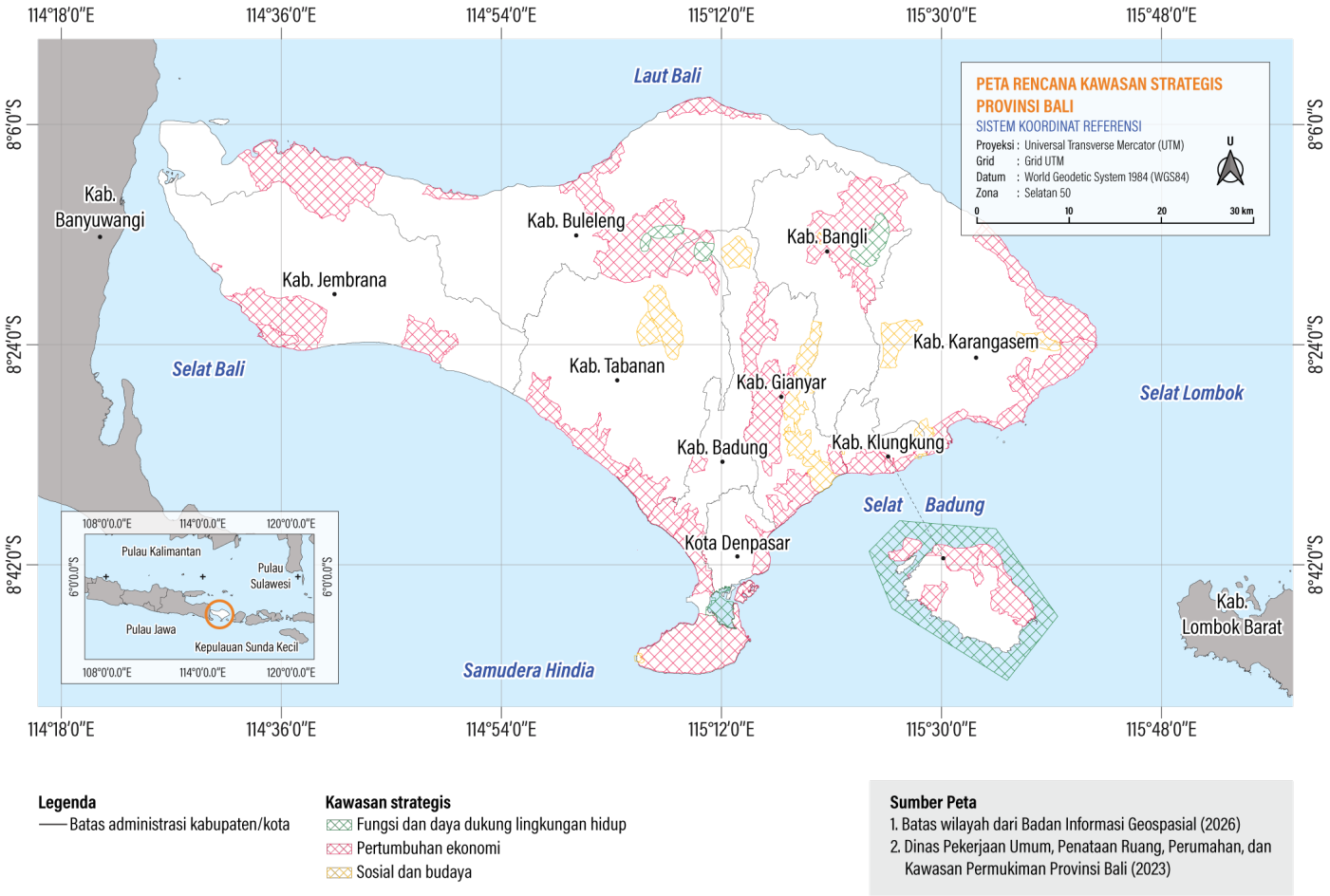


Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Arah pembangunan tersebut semakin diperkuat oleh rencana pengembangan berbagai kawasan strategis dengan fungsi ekonomi dan sosial budaya penting, seperti Kawasan Strategis Nasional (KSN) Sarbagita, Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Sanur, serta sejumlah Kawasan Strategis Pariwisata Nasional (KSPN) (Gambar 8). Kondisi ini mengindikasikan wilayah pesisir akan tetap menjadi pusat pertumbuhan dan investasi di Provinsi Bali dalam jangka panjang.

Di sisi lain, RTRW Provinsi Bali juga mengalokasikan berbagai kawasan lindung di wilayah pesisir, termasuk kawasan suaka alam laut dan ekosistem mangrove yang tersebar di Kabupaten Jembrana, Badung, Karangasem, Buleleng, dan Klungkung, serta Kota Denpasar. Keberadaan kawasan-kawasan tersebut menunjukkan wilayah pesisir Bali tidak hanya memiliki nilai ekonomi yang tinggi, tetapi juga berfungsi sebagai penyangga ekologis yang penting bagi ketahanan lingkungan dan perlindungan wilayah pesisir.

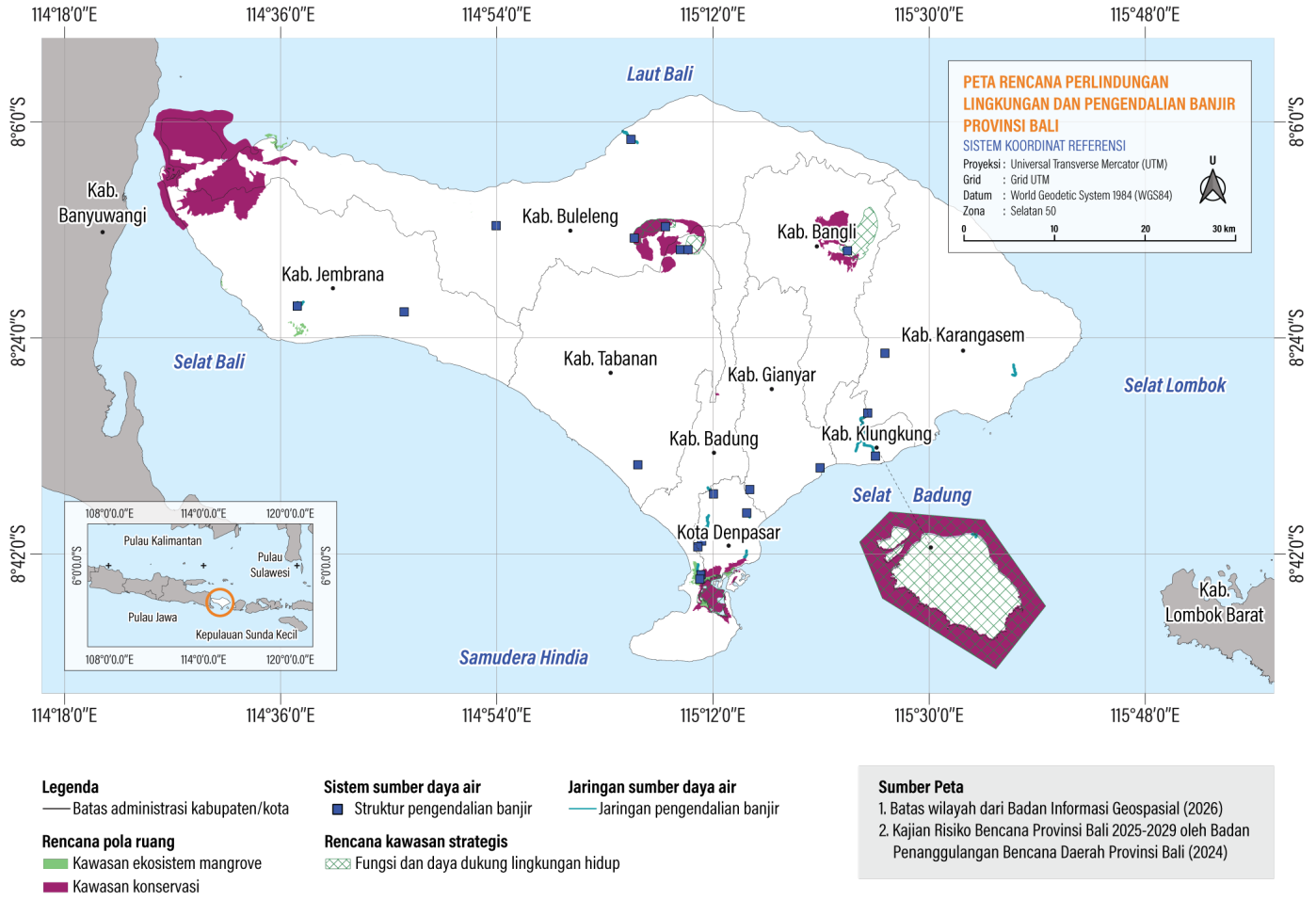
Gambar 8 | **Rencana kawasan strategis Provinsi Bali 2023–43**



Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Selain mengatur arah pertumbuhan ekonomi dan pengembangan wilayah, RTRW Provinsi Bali juga mengintegrasikan aspek mitigasi bencana dan adaptasi perubahan iklim ke dalam pemanfaatan ruang (Lampiran B). Hal ini diwujudkan melalui arahan konservasi hutan mangrove, pembangunan infrastruktur pengendali banjir pesisir, pembatasan alih fungsi lahan pada kawasan berisiko tinggi, serta pengaturan pemanfaatan ruang sempadan pantai berdasarkan karakteristik lokal dan tingkat risiko bencana (Gambar 9).

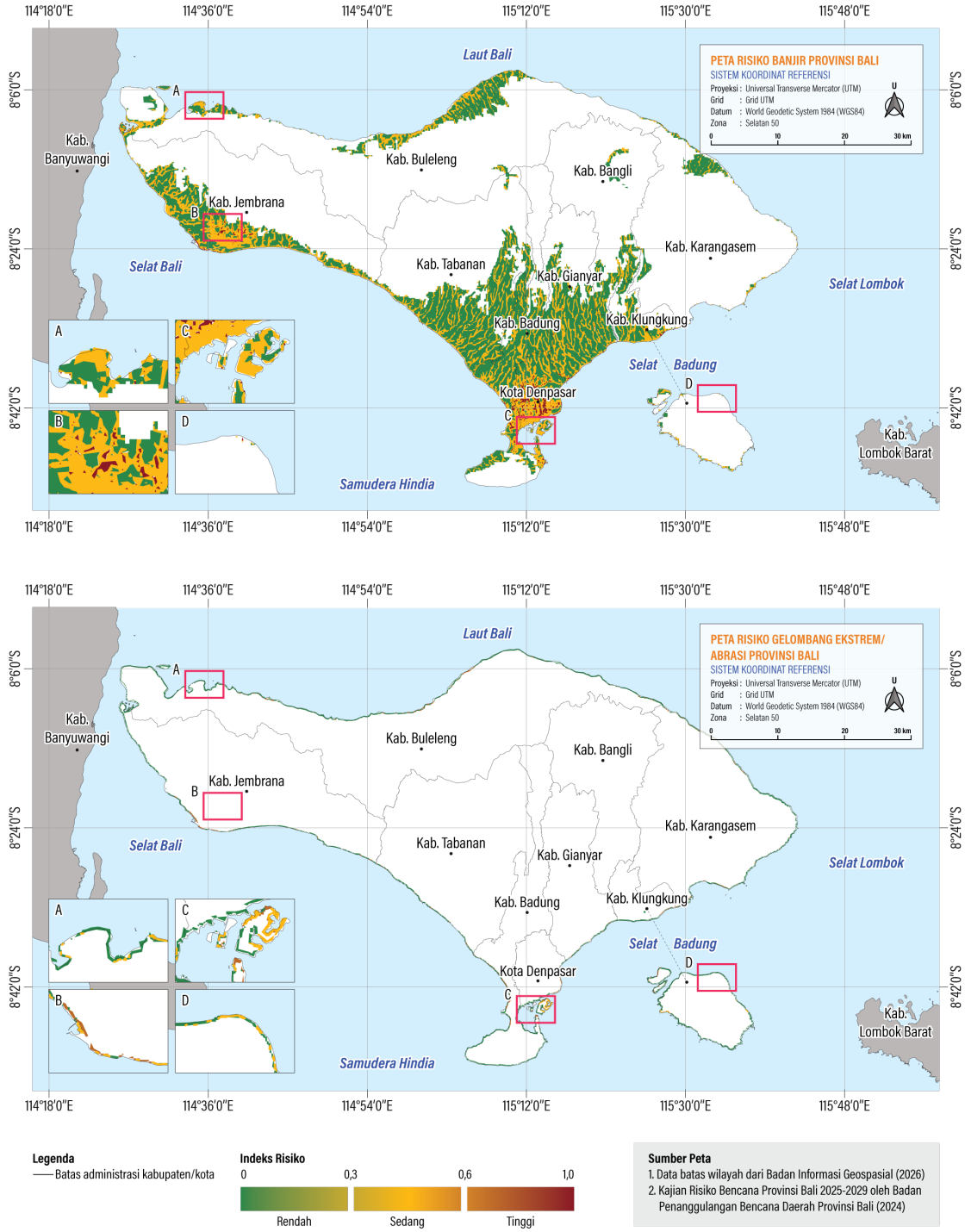
Gambar 9 | **Rencana infrastruktur pengendalian banjir, kawasan ekosistem mangrove, dan kawasan konservasi di Provinsi Bali untuk tahun 2023–43**



Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Hasil kajian risiko bencana oleh BPBD Provinsi Bali menunjukkan sebagian besar wilayah pesisir selatan Bali serta pesisir utara Kabupaten Buleleng memiliki tingkat kerentanan yang relatif tinggi terhadap banjir, abrasi, dan gelombang ekstrem (Gambar 10). Mengingat hal ini, pengendalian perkembangan kawasan terbangun menjadi salah satu instrumen penting untuk menjaga ketahanan wilayah pesisir Bali.

Gambar 10 | **Kawasan risiko bencana banjir dan gelombang ekstrem/abrasi**



Sumber: Analisis penulis (2025).

Meskipun demikian, arah pengembangan spasial dan kewilayahan yang menempatkan wilayah pesisir dan pusat-pusat ekonomi sebagai lokomotif pertumbuhan juga berpotensi meningkatkan tekanan terhadap alih fungsi lahan. Dalam praktiknya, ekspansi kawasan terbangun untuk mendukung aktivitas ekonomi dan pariwisata sering kali berkembang lebih cepat dibandingkan dengan kapasitas pengendalian ruang yang telah ditetapkan dalam RTRW. Pemberian izin pembangunan dan investasi di tingkat provinsi ataupun kabupaten/kota juga dapat mendorong pemanfaatan ruang yang tidak selalu selaras dengan peruntukan kawasan yang telah direncanakan.

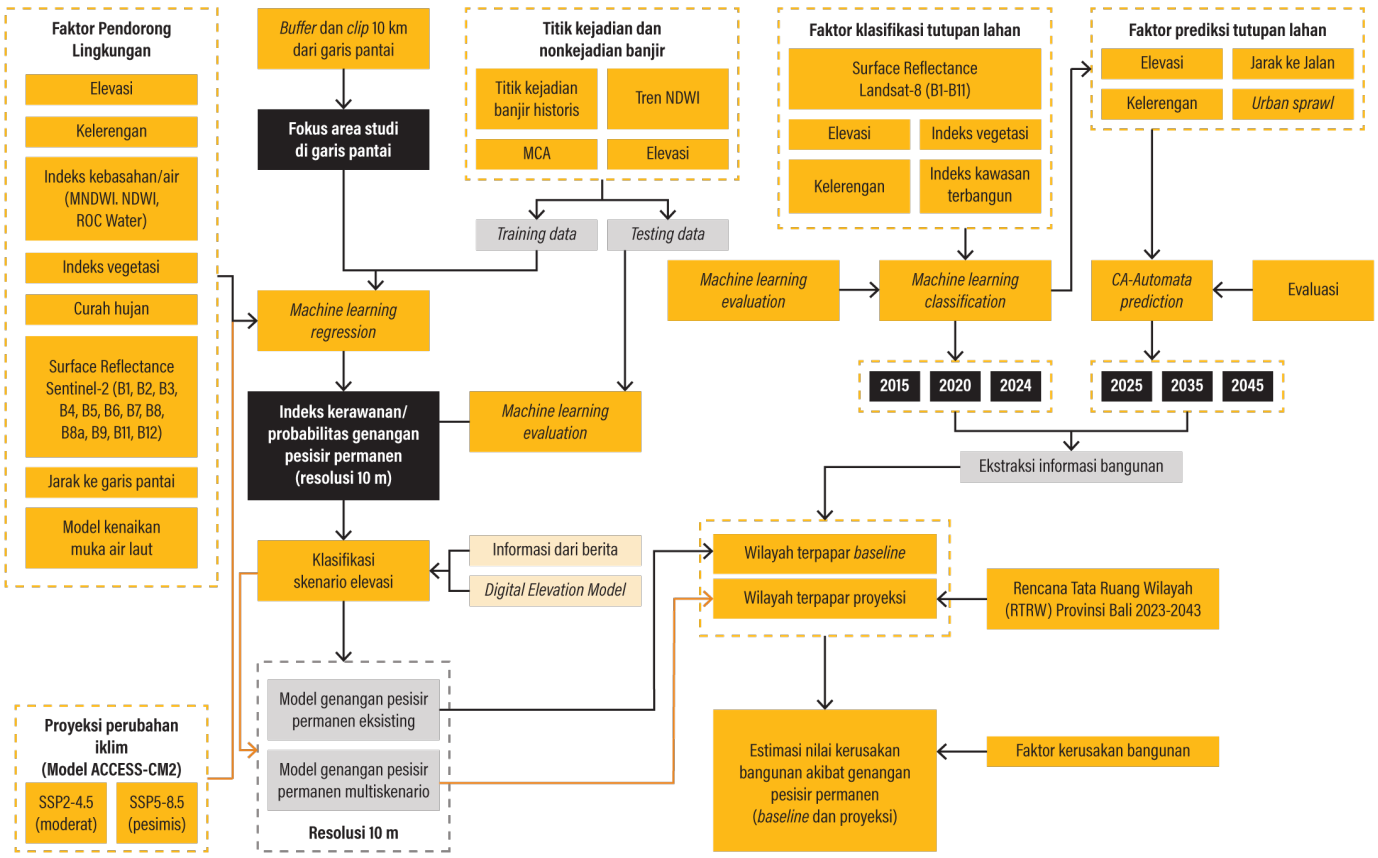
Dengan demikian, tantangan utama ke depan bukan hanya terletak pada penyusunan arah tata ruang yang telah mengakomodasi prinsip keberlanjutan dan ketahanan iklim, melainkan juga pada konsistensi implementasi dan pengendalian pemanfaatan ruang agar perkembangan kawasan terbangun, khususnya di wilayah pesisir, tetap berada dalam batas daya dukung lingkungan dan tidak meningkatkan risiko bencana di Bali.

Pendekatan dan metodologi

Pemodelan spasial genangan pesisir permanen

Studi ini memodelkan genangan pesisir permanen (*coastal inundation*) di wilayah pesisir Provinsi Bali dengan pendekatan spasial pada kondisi *baseline* dan proyeksi skenario perubahan iklim (Gambar 11). Kondisi *baseline* merepresentasikan kondisi tahun 2024, sedangkan skenario proyeksi disimulasikan secara bertahap pada interval lima tahunan untuk periode 2025–2045. Proyeksi iklim didasarkan pada keluaran model iklim global IPCC dengan mempertimbangkan dua trajektori emisi, yaitu moderat/menengah (SSP2-4.5) dan pesimistis/tinggi (SSP5-8.5). Pemodelan ini bertujuan untuk mengidentifikasi perbedaan spasial dan temporal kerawanan genangan pesisir permanen antara kondisi saat ini dan proyeksi ke depan, sekaligus menyediakan dasar ilmiah bagi perumusan strategi pengembangan wilayah yang berketahanan iklim di wilayah pesisir Bali.

Gambar 11 | **Kerangka konseptual dan metodologi studi**



Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Pada studi ini, kerawanan perubahan iklim direpresentasikan melalui pemodelan spasial probabilitas dan kedalaman genangan pesisir permanen pada kondisi *baseline* (2024) dan proyeksi (2025–2045), dengan mengintegrasikan faktor iklim, lingkungan, dan topografi wilayah pesisir. Faktor tersebut mencakup proyeksi curah hujan dan kenaikan muka air laut berbasis Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model 2 (ACCESS-CM2) pada skenario SSP2-4.5 dan SSP5-8.5, serta variabel elevasi, kelerengan, indeks air, indeks vegetasi, reflektansi permukaan, jarak ke garis pantai, dan data historis kejadian genangan atau banjir pesisir.

Keterpaparan kawasan terbangun di wilayah pesisir terhadap genangan pesisir permanen diperoleh melalui analisis tumpang tindih antara kawasan terbangun di dalam peta penutupan lahan dan genangan pesisir permanen pada 2024 hingga 2045. Peta penutupan lahan tersebut diperoleh melalui analisis citra satelit berdasarkan klasifikasi tutupan lahan tahun 2015, 2020, dan 2024; proyeksi tutupan lahan tahun 2025, 2035, dan 2045; dan ekstraksi area terbangun yang berada pada zona rawan tergenang. Kerentanan direpresentasikan melalui fungsi kerusakan bangunan berbasis kedalaman genangan sebagai pendekatan kerentanan fisik, dan nilai kerusakan bangunan diestimasi untuk menggambarkan potensi konsekuensi ekonomi.

Model genangan wilayah pesisir dikembangkan melalui beberapa pendekatan dan analisis spasial yang akan dipaparkan dalam sub-bagian berikut ini.

Delineasi wilayah studi

Cakupan spasial wilayah studi menggunakan *buffer* berjarak 10 km dari garis pantai ke arah daratan sebagai batas awal analisis untuk wilayah pesisir yang berpotensi terdampak genangan pesisir permanen. Penetapan jarak ini didukung temuan empiris pada beberapa wilayah pesisir Indonesia yang menunjukkan banjir pesisir dan banjir rob cenderung terkonsentrasi pada wilayah dekat pantai dan dataran rendah. Cahyadi et al. (2017) menunjukkan keterkaitan banjir rob di Pekalongan, Jawa Tengah, dengan karakteristik pesisir rendah, sementara Rudiarto et al. (2018) menunjukkan adanya konsentrasi kejadian banjir di pesisir utara Jawa Tengah dalam radius 10 km dari garis pantai, dengan kejadian banjir rob yang terkonsentrasi pada radius yang lebih dekat. Handayani et al. (2020) memperkuat konteks bahwa urbanisasi dan perubahan tutupan lahan pada daerah aliran sungai (DAS) pesisir dapat meningkatkan potensi terjadinya banjir, sedangkan Bennett et al. (2023) menunjukkan bahwa genangan pesisir di wilayah rendah seperti Jakarta dipengaruhi kombinasi proses pesisir, aliran sungai, dan topografi lokal. Temuan tersebut sejalan dengan Magnan et al. (2022), yang menekankan risiko kenaikan muka air laut terkonsentrasi pada wilayah pesisir rendah.

Buffer sebesar 10 km tidak diberlakukan seragam di seluruh pesisir Bali. Area tersebut diseleksi kembali dengan menggunakan kriteria elevasi dan kemiringan lereng, dengan mengeluarkan piksel yang memiliki nilai elevasi atau kemiringan lereng lebih tinggi daripada nilai maksimum yang teridentifikasi pada titik-titik kejadian genangan pesisir permanen sebelumnya. Dengan demikian, delineasi wilayah studi bersifat adaptif terhadap morfologi pesisir Bali dan lebih terfokus pada wilayah pesisir rendah hingga landai yang secara fisik lebih berpotensi mengalami akumulasi genangan.

Pengumpulan data latih (*training*) dan data uji (*testing*)

Data kejadian banjir berbentuk titik dikompilasi dari beberapa sumber sekunder, meliputi catatan resmi BPBD Provinsi Bali, arsip historis kejadian banjir global dari Global Active Archive of Large Flood Events yang dikembangkan Dartmouth Flood Observatory (Brakenridge 2017), serta titik indikatif berbasis perubahan temporal Normalized Difference Water Index (NDWI) tahun 2019–2024. Dataset yang digunakan terdiri atas 163 titik kejadian banjir di Bali, 45 titik kejadian abrasi dan gelombang ekstrem, 12 titik kejadian banjir historis global, serta 150 titik indikatif berbasis tren NDWI. Data kejadian banjir historis global digunakan sebagai pelengkap catatan BPBD dan indikator NDWI dalam pelabelan data latih dan data uji, bukan sebagai keluaran model prediksi banjir global. Karena itu, data tersebut dibedakan dari model iklim global ACCESS-CM2 yang digunakan pada tahap proyeksi curah hujan dan skenario iklim masa depan.

Seluruh titik kejadian kemudian diklasifikasikan ke dalam kelas tergenang dan tidak tergenang, lalu dibagi menjadi data latih dan data uji dengan proporsi 80 persen untuk pelatihan dan 20 persen untuk pengujian. Data latih digunakan untuk membangun hubungan antara variabel prediktor dan kejadian genangan, sedangkan data uji digunakan untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi model terhadap data yang tidak digunakan dalam proses pelatihan. Pembagian 80:20 digunakan karena merupakan salah satu skema umum dalam pemodelan *machine learning*, dengan tetap menyediakan jumlah data pelatihan yang memadai serta mempertahankan data independen untuk evaluasi model (Gholamy et al. 2018; Vrigazova 2021). Evaluasi model dapat dilihat lebih lanjut pada Lampiran D.

Penyusunan variabel prediktor

Variabel prediktor spasial disiapkan sebagai data input penyusunan model *machine learning* untuk mempelajari data titik kejadian banjir pesisir dan mengestimasi probabilitas genangan pesisir permanen antarwilayah di dalam wilayah studi. Parameter topografi seperti ketinggian (elevasi) dan kemiringan wilayah diperoleh melalui data *digital elevation model* (DEM) beresolusi 8 m untuk mendapatkan informasi

tingkat keterpaparan terhadap banjir berdasarkan kontur wilayah. Sensitivitas hidrologi diperoleh melalui analisis NDWI untuk mendapatkan karakteristik air permukaan dan kelembaban tanah. Selain itu, *Euclidean distance* dari setiap lokasi menuju garis pantai terdekat dihitung untuk menilai tingkat keterpaparan wilayah pesisir. Jarak ini merepresentasikan panjang garis lurus terpendek antara dua titik dalam ruang, yang dalam konteks studi ini menggambarkan jarak langsung dari suatu lokasi ke pantai tanpa mempertimbangkan kontur permukaan atau rute akses.

Variabel-variabel ini dipilih berdasarkan relevansi karakteristik fisiknya terhadap proses pembentukan genangan pesisir permanen dan kesesuaiannya dengan teknik atau algoritma *machine learning* yang dipilih, yaitu Random Forest (Lampiran C). Algoritma ini dipilih untuk pemodelan probabilitas genangan pesisir permanen karena dapat menangani hubungan nonlinier, interaksi kompleks antarvariabel, serta variabel prediktor yang heterogen seperti elevasi, NDWI, dan jarak ke pantai. Model dibangun dengan jumlah pohon keputusan (*number of trees*) 1000, kedalaman maksimum pohon (*max depth*) 15, dan jumlah variabel yang dipertimbangkan pada setiap *split* (*max features*) 3. Parameter optimal ditentukan melalui *5-fold cross-validation* untuk memaksimalkan performa prediksi sekaligus menjaga kemampuan generalisasi model. Variabel-variabel yang digunakan sebagai input untuk penyusunan model disajikan pada Tabel 2, beserta keterangan fungsi masing-masing data dalam proses pemodelan.

Tabel 2 | **Kebutuhan data pemodelan spasial kerawanan dan kedalaman bahaya genangan pesisir permanen di Provinsi Bali**

No.	Data	Produk	Tipe/resolusi	Tahun data	Sumber/referensi
1	Elevasi	NASA SRTM Digital Elevation 30m/ DEMNAS	Raster/30 m	2000	Farr et al. 2007
2	Kemiringan *(slope)*	NASA SRTM Digital Elevation 30m/ DEMNAS	Raster/30 m	2000	Farr et al. 2007
3	Surface Reflectance Sentinel-2	Harmonized Sentinel-2 MSI: Multi-spectral Instrument, Level-2A (SR)	Raster/10 m	2024	European Space Agency 2022
4	Kenaikan muka air laut	TOPEX/Poseidon Sea Level Data	Raster/6 km	1993–2020	Nerem et al. 2010
5	Titik kejadian banjir	Global Active Archive of Large Flood Events	Tabular	1985– 2021	Brakenridge 2017
6	Titik kejadian banjir	BPBD Provinsi Bali	Tabular	2019– 2025	BPBD Provinsi Bali 2025
7	Curah hujan	CHIRPS Daily	Raster/5 km	1981– 2025	Funk et al. 2015
8	Batas administrasi. wilayah	Database Global Administrative Areas	Vektor	2022	GADM 2022
9	Proyeksi iklim	ACCESS-CM2 SSP2-4.5 & SSP5-8.5	Raster/25 km	2030–2045	Bi et al. 2020; Huneke et al. 2025
10	Garis pantai	BIG	Vektor	2022	BIG 2022
11	*Night light*	VIIRS Nighttime Day/Night Band Composites Version 1	Raster/500 m	2014– 2025	Elvidge et al. 2013
12	Surface Reflectance Landsat-8	USGS Landsat 8 Collection 2 Tier 1 dan data real-time TOA Reflectance	Raster/30 m	2013–2024	EROS Center 2020
13	Jaringan jalan	Open Street Map (OSM)	Vektor	2025	OpenStreetMap *contributors* 2025

Sumber: Kompilasi literatur terkait oleh penulis (2025).

Pemilihan data curah hujan pada model proyeksi iklim global

Curah hujan digunakan sebagai salah satu faktor pendorong dalam pemodelan genangan pesisir permanen karena dapat memengaruhi akumulasi air pada wilayah pesisir rendah, baik pada kondisi historis maupun proyeksi. Data curah hujan historis diperoleh dari Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS), yang mengombinasikan estimasi curah hujan berbasis satelit dan data stasiun pengamatan, sehingga digunakan sebagai representasi kondisi baseline. Untuk kondisi masa depan, studi ini menggunakan proyeksi curah hujan dari ACCESS-CM2 dalam kerangka CMIP6/NEX-GDDP-CMIP6. Dua skenario digunakan, yaitu SSP2-4.5 untuk merepresentasikan trajektori emisi menengah dengan intervensi kebijakan iklim moderat dan SSP5-8.5 untuk merepresentasikan trajektori emisi tinggi dengan tingkat mitigasi iklim yang rendah atau skenario pesimistis.

Pemilihan ACCESS-CM2 didasarkan pada evaluasi model curah hujan bulanan di Indonesia yang menunjukkan model ini termasuk dalam kelompok model berkinerja tinggi dalam merepresentasikan pola curah hujan musiman Indonesia (Prasetya et al. 2026). Namun, karena keluaran model iklim global tetap berpotensi mengandung bias pada skala lokal, data proyeksi tersebut tidak digunakan sebagai representasi kondisi lokal Bali tanpa penyesuaian. Data tersebut diperlakukan sebagai input iklim yang telah melalui koreksi bias dan penyesuaian spasial terhadap kondisi *baseline*. Kontekstualisasi lokal dalam pemodelan diperkuat melalui integrasi variabel topografi, jarak dari garis pantai, indeks spektral, dan data kejadian genangan historis lokal.

Implementasi algoritma *machine learning* untuk pemodelan probabilitas genangan pesisir permanen

Studi menggunakan pendekatan *supervised machine learning* dengan memanfaatkan algoritma Random Forest untuk memetakan probabilitas genangan pesisir permanen secara spasial. Tahap berikutnya ialah melakukan uji akurasi menggunakan kurva Receiver Operating Characteristic (ROC) untuk menilai kemampuan model dalam membedakan antara kelas wilayah tergenang dan tidak tergenang (Fawcett 2006; Muschelli 2020; Sakti et al. 2024).

Pemodelan genangan pesisir berbasis topografi

Pendekatan klasifikasi berbasis topografi wilayah digunakan untuk mengestimasi tinggi kedalaman genangan pesisir permanen berdasarkan data elevasi wilayah. Informasi kedalaman genangan pesisir permanen diperoleh melalui pengambilan data dari berbagai situs web dan artikel berita daring karena keterbatasan data resmi dan observasi/aktual lapangan. Data elevasi dikategorikan menjadi lima kelas dan, kepada setiap kelas, dialokasikan nilai bobot berdasarkan probabilitas relatif genangan pesisir permanen. Pendekatan klasifikasi ini diimplementasikan sebagai fungsi spasial yang mengintegrasikan topografi ke dalam proses pemetaan probabilitas genangan pesisir permanen secara keseluruhan.

Klasifikasi kelas kerawanan

Nilai keluaran model Random Forest berupa probabilitas genangan pesisir permanen dengan rentang 0 hingga 1, yang menunjukkan probabilitas relatif suatu piksel untuk mengalami genangan. Untuk memudahkan interpretasi spasial dan penyajian hasil bagi kebutuhan pengambilan keputusan, probabilitas tersebut diklasifikasikan menjadi tiga kelas kerawanan. Kelas rendah mencakup nilai 0,000 sampai 0,333; kelas sedang mencakup nilai lebih dari 0,333 sampai 0,666; dan kelas tinggi mencakup nilai lebih dari 0,666 sampai 1. Penggunaan tiga kelas ini mengacu pada praktik pengkajian risiko bencana di Indonesia, termasuk Peraturan Kepala BNPB Nomor 2 Tahun 2012 dan kerangka inaRISK, yang menyajikan tingkat kerawanan secara operasional melalui kategori rendah, sedang, dan tinggi (BNPB 2012).

Dalam studi ini, pembagian kelas dilakukan dengan menggunakan metode interval yang sama agar setiap kelas merepresentasikan bagian yang proporsional dari rentang probabilitas model. Dengan demikian, ambang kelas tersebut digunakan sebagai klasifikasi operasional untuk interpretasi spasial, bukan sebagai ambang empiris dampak genangan.

Skenario proyeksi genangan pesisir permanen di masa mendatang

Untuk menilai dampak perubahan iklim pada kejadian genangan pesisir permanen di masa mendatang, model spasial ini menggunakan data proyeksi curah hujan berdasarkan dua jenis skenario proyeksi iklim, yaitu SSP2-4.5 dan SSP5-8.5, proyeksi kenaikan permukaan air laut berdasarkan interpolasi data historis 2000–2021, dan variabel prediktor lainnya dianggap statis. Dengan mengintegrasikan proyeksi perubahan curah hujan dan kenaikan permukaan air laut di masa mendatang, model spasial ini menghasilkan peta probabilitas genangan pesisir permanen setiap lima tahunan untuk periode 2025–2045.

Validasi model melalui diskusi bersama pemerintah daerah dan kunjungan lapangan

Untuk menilai akurasi luaran model spasial genangan pesisir permanen, dilakukan kegiatan *focus group discussion* (FGD) bersama pemerintah daerah di Provinsi Bali (Lampiran E) serta kunjungan lapangan di Kabupaten Jembrana dan Buleleng pada 23–25 Juli 2025. Kegiatan FGD bertujuan untuk memaparkan temuan awal dari pemodelan spasial

genangan pesisir permanen dan mengumpulkan data dan informasi terkait lokasi kejadian genangan pesisir permanen serta dokumen kebijakan terkait adaptasi dan ketahanan iklim.

Sementara itu, kunjungan lapangan bersama dengan BPBD Kabupaten Jembrana dan Buleleng dan perwakilan program Desa Tangguh Bencana ditujukan untuk memverifikasi titik kejadian genangan pesisir permanen dan mengunjungi lokasi-lokasi yang pernah mengalami kejadian banjir pesisir dalam kurun waktu satu tahun terakhir.

Pemodelan proyeksi lahan terbangun

Analisis wilayah yang terpapar genangan pesisir permanen di Provinsi Bali menggunakan pemodelan proyeksi lahan terbangun sebagai basis untuk menilai tingkat keterpaparan dan kerugian yang dapat ditimbulkan oleh kejadian genangan pesisir permanen, baik pada kondisi *baseline* maupun proyeksi di masa depan. Pemodelan ini memanfaatkan penggunaan lahan saat ini sebagai *baseline* dan rencana tata ruang Provinsi Bali untuk proyeksi di masa depan.

Pemodelan lahan terbangun diawali dengan klasifikasi citra Landsat-8 yang dipadukan dengan data ketinggian dari DEM. Penggunaan kombinasi reflektansi permukaan terbukti meningkatkan akurasi dalam membedakan kelas penutupan lahan, termasuk hutan, pertanian, perkebunan, lahan terbuka, badan air, dan kawasan terbangun (Mahmon et al. 2015; Swetanisha et al. 2022). Selanjutnya, digunakan indeks turunan seperti Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) dan Enhanced Vegetation Index (EVI). NDVI menilai kepadatan dan kesehatan vegetasi, sedangkan EVI lebih sensitif di wilayah dengan biomassa tinggi karena memasukkan koreksi atmosferik dan mengurangi efek latar belakang tanah (Dhakar dan Pahuja 2022; Kou et al. 2017; Vogiatzis dan Eleftheriadis 2023). Selain itu, Normalized Difference Built-up Index (NDBI) dimanfaatkan untuk mengidentifikasi kawasan terbangun dari kelas tutupan penutupan lahan lainnya (Andriani et al. 2018; Jothimani et al. 2022). Selanjutnya, proyeksi perubahan penutupan lahan dibangun menggunakan model Cellular Automata-Markov Chain[5]untuk memperoleh proyeksi kelas penutupan lahan di Provinsi Bali pada 2035 dan 2045 (Lampiran F).

Model *baseline* penutupan lahan disusun melalui simulasi klasifikasi untuk tiga tahun referensi: 2015, 2020, dan 2024. Titik tahun tersebut dipilih untuk menilai akurasi model dalam memproyeksikan klasifikasi lahan dibandingkan dengan kondisi aktual berdasarkan data Google Earth dengan menggunakan pendekatan *supervised learning*. Model baseline yang tervalidasi dan memiliki akurasi keseluruhan di atas 0,8 kemudian digunakan untuk memproyeksikan lahan terbangun pada 2035 dan 2045 (Senthilkumar et al. 2025). Estimasi cakupan dan luas wilayah yang terpapar dilakukan dengan melakukan analisis tumpang tindih (*overlay*) antara peta genangan pesisir permanen dan peta lahan terbangun untuk masing-masing skenario, baik kondisi *baseline* maupun proyeksi.

Analisis estimasi nilai kerusakan bangunan akibat terpapar genangan pesisir permanen

Studi ini mengestimasi nilai kerusakan bangunan yang terpapar genangan pesisir permanen menggunakan faktor kerusakan bangunan (*damage factor*) yang dikembangkan Huizinga et al. (2017), dengan penyesuaian berdasarkan studi Asian Development Bank (ADB) (2023), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3. Faktor kerusakan atau rasio kerusakan (*damage ratio*) merupakan persentase nilai aset yang hilang atau rusak akibat genangan pada kedalaman tertentu. Nilainya berada pada rentang 0–1 (atau 0–100 persen), yang artinya semakin tinggi nilai faktor kerusakan (mendekati satu), semakin besar pula proporsi kerugian atau biaya yang dibutuhkan untuk memulihkan bangunan ke kondisi semula. Fungsi ini menggambarkan hubungan antara kedalaman genangan (*flood depth*) dan tingkat kerusakan relatif pada bangunan, infrastruktur, atau aset lain (Huizinga et al. 2017).

Tabel 3 | **Faktor kerusakan untuk bencana banjir**

Kedalaman genangan (m)	Faktor kerusakan sektor permukiman
0-0,5	0,33
0,5-1,0	0,49
1,0-1,5	0,62
1,5-2,0	0,72
> 2,0	0,87

Sumber: ADB 2023.

Studi ini menggunakan asumsi faktor kerusakan yang terbatas pada sektor permukiman, mengingat model proyeksi tutupan lahan hanya mampu merepresentasikan satu klasifikasi area terbangun. Nilai kerugian maksimum kawasan permukiman dalam studi ini didasarkan pada penelitian Wijayanti et al. (2017) (Lampiran G) untuk kasus banjir di Jakarta tahun 2013. Studi tersebut memperkirakan kerugian sebesar US$5,13/m^2 hingga $15,54/m^2 atau berkisar Rp85.108/m^2–Rp257.662/m^2 dengan asumsi $1 = Rp16.580,59. Berdasarkan faktor kerusakan dan acuan nilai kerugian yang telah dijelaskan sebelumnya, estimasi kerugian bangunan dalam studi ini dihitung melalui pendekatan sebagai berikut:

Estimasi kerugian (Rp)=Faktor kerusakan x Nilai kerusakan(Rp/m^2) x Luas area tergenang(m^2)

Guna memastikan relevansi nilai kerusakan dengan kondisi saat ini, faktor inflasi digunakan dalam proses konversi nilai berdasarkan rumus berikut (Ladue 1993):

$$FV = PV(1+i)^n$$

Catatan:

FV = Nilai pada periode n (n periode dimasa depan)	*i = Inflasi*
PV = Nilai pada periode 0 (sekarang)	*n = Jumlah periode konversi*

Tingkat inflasi periode 2014–24 akan menggunakan data inflasi tahunan Kota Denpasar yang bersumber dari BPS (Tabel 4). Adapun untuk periode 2025–45 akan didasarkan pada target inflasi pemerintah, yaitu 2,5 ± 1% per tahun (Bank Indonesia 2025).

Tabel 4 | **Inflasi tahunan Kota Denpasar 2014–24**

No.	Periode	Inflasi y-o-y
1	2014	8,03
2	2015	2,70
3	2016	2,94
4	2017	3,31
5	2018	3,40
6	2019	2,37
7	2020	0,55
8	2021	2,01
9	2022	6,44
10	2023	2,54
11	2024	2,69

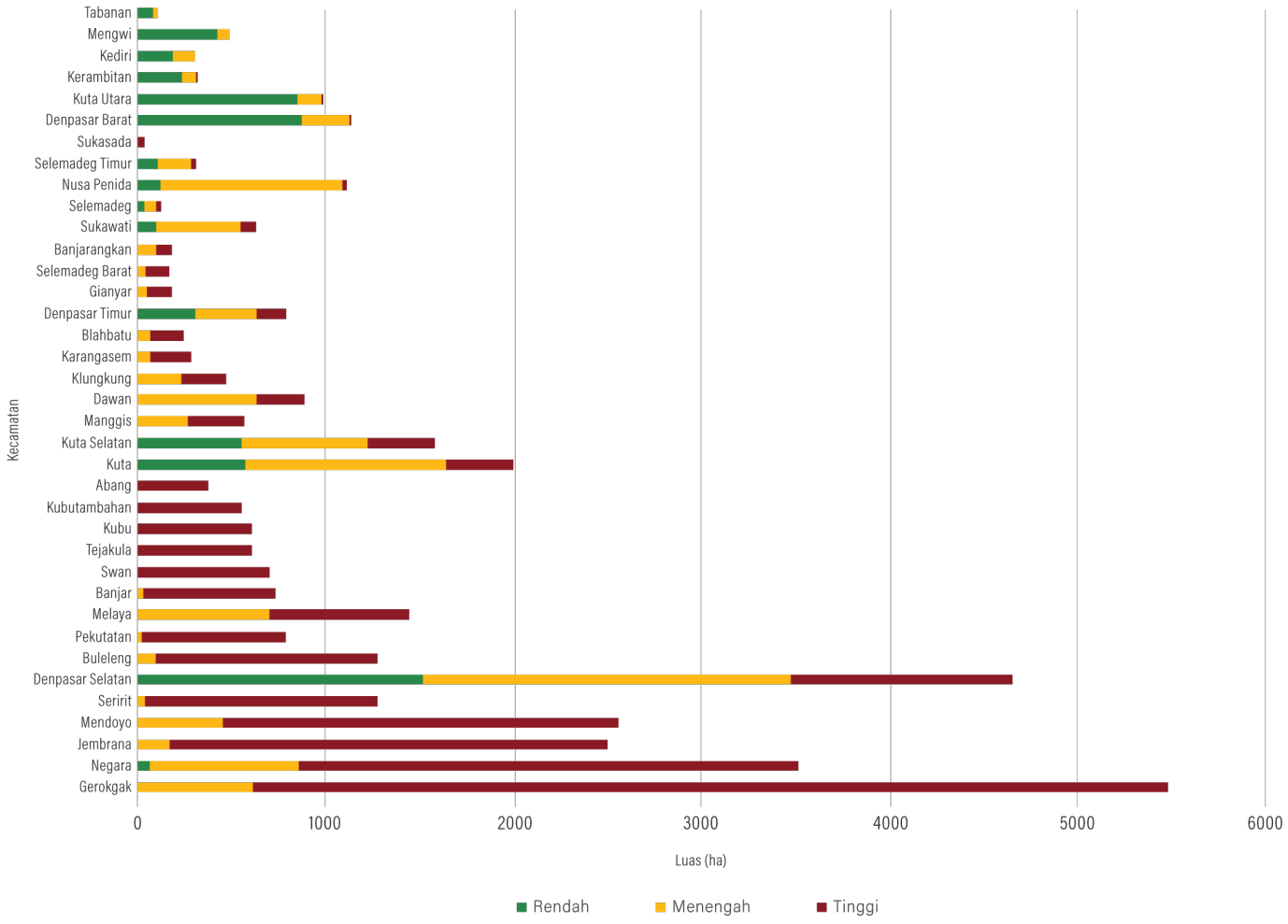
Sumber: BPS Kota Denpasar 2025.

Temuan studi

Pemetaan spasial genangan pesisir permanen pada kondisi *baseline*

Hasil pemodelan spasial probabilitas genangan pesisir permanen tahun 2024 menunjukkan variasi probabilitas kejadian antarwilayah di Provinsi Bali. Kecamatan Gerokgak di Kabupaten Buleleng memiliki area dengan probabilitas tinggi terluas (5.476 ha), diikuti Kecamatan Negara (3.519 ha), Mendoyo (2.555 ha), dan Jembrana (2.497 ha) di Kabupaten Jembrana (Gambar 12). Temuan ini mengindikasikan topografi datar, kedekatan dengan garis pantai, dan tingginya intensitas pemanfaatan lahan meningkatkan probabilitas genangan pesisir permanen.

Gambar 12 | **Luasan genangan pesisir permanen Provinsi Bali tahun 2024 berdasarkan kelas kerawanan**

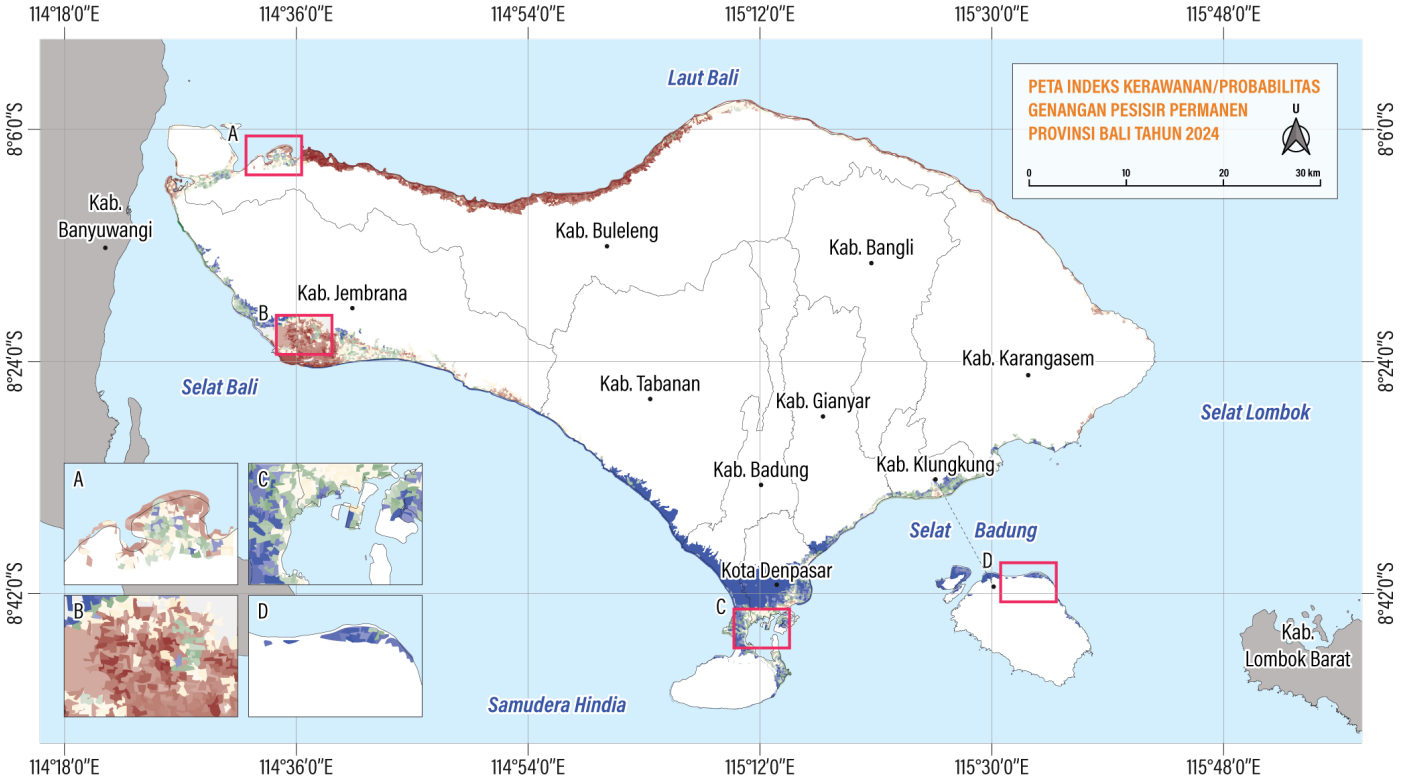


Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Sementara itu, wilayah dengan elevasi lebih tinggi dan lokasi yang lebih jauh dari pantai, seperti Kecamatan Tabanan, Kediri, dan Kuta Utara, cenderung memiliki probabilitas yang lebih rendah (Gambar 13). Di sisi lain, Kecamatan Kuta Selatan di Kabupaten Badung dan Kecamatan Dawan di Kabupaten Klungkung menunjukkan distribusi probabilitas kerawanan genangan pesisir permanen yang relatif seimbang pada kategori rendah, sedang, dan tinggi.

Pola ini mencerminkan heterogenitas karakteristik fisik wilayah, termasuk variasi kelas penggunaan lahan, serta interaksi dengan faktor fisik wilayah pesisir. Selain itu, meskipun tidak menempati peringkat tertinggi secara keseluruhan, Kecamatan Abang di Kabupaten Karangasem dan Kecamatan Tejakula di Kabupaten Buleleng tetap memiliki luasan area yang cukup signifikan pada kategori probabilitas tinggi.

Gambar 13 | **Probabilitas genangan pesisir permanen Provinsi Bali tahun 2024**



Legenda
Indeks kerawanan/probabilitas kejadian genangan pesisir permanen

0 — 1

Batas administrasi kabupaten/kota

Sumber Peta
1. Batas wilayah dari Badan Informasi Geospasial (2026)
2. Dinas Pekerjaan Umum, Penataan Ruang,Permukiman Provinsi Bali (2023)
3. Model elevasi digital NASA SRTM 30 m/DEMNAS (2000)
4. Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrumen Level-2A (SR) (2024)
5. Data ketinggian muka air laut TOPEX/Poseidon (1993-2020)
6. Global Active Archive of Large Flood Events (1985-2021)
7. Data titik banjir dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah Provinsi Bali (2019-2025)
8. Curah hujan harian dari CHIRPS (1981-2025)
9. ACCESS-CM2 SSP 2-4.5 & 5-8.5 (2030-2045)
10. Garis pantai dari Badan Informasi Geospasial (2022)

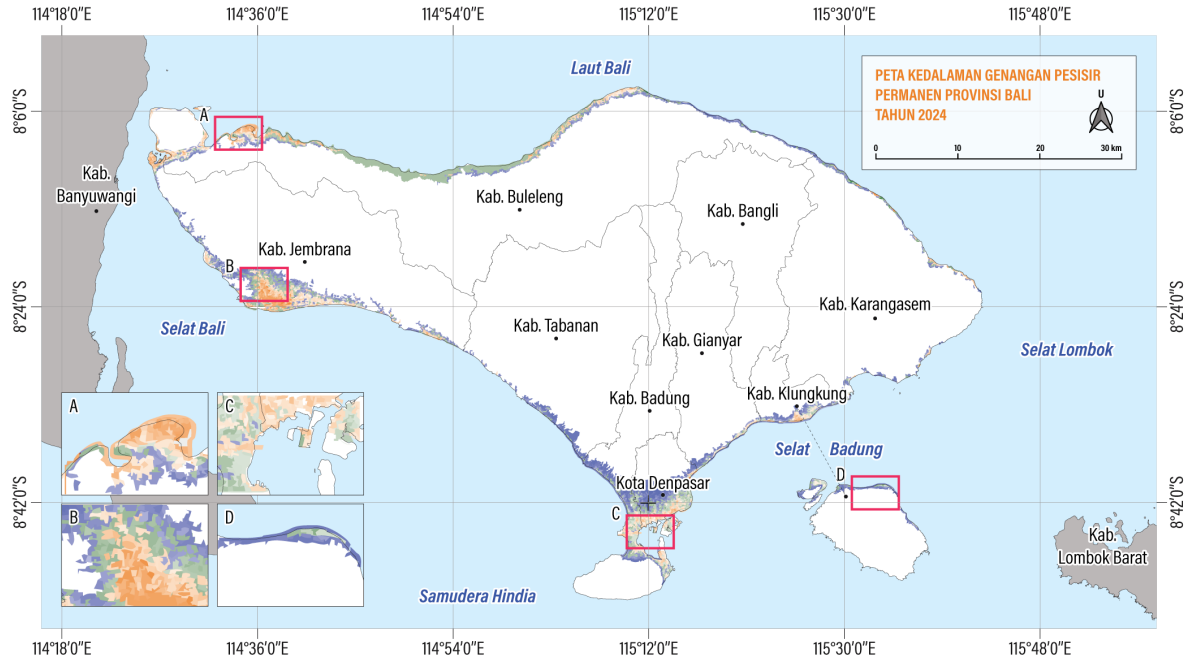
Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Selanjutnya, model spasial menunjukkan genangan pesisir permanen berpotensi memiliki kedalaman antara 0 hingga 2 m. Genangan dengan kedalaman rendah (0–0,5 m) umumnya terjadi di wilayah pesisir dengan kontur yang relatif curam, sedangkan genangan sedang hingga tinggi (1–2 m) lebih banyak ditemukan pada dataran rendah. Di bagian barat laut Bali, kedalaman genangan diperkirakan dapat mencapai 1,2–1,7 m, terutama pada kawasan permukiman pesisir dan lahan produktif.

Kondisi genangan pesisir permanen yang lebih parah teridentifikasi di Jembrana bagian selatan-barat, dengan kedalaman rata-rata 1,2–1,8 m. Hal ini diakibatkan kombinasi pasang laut dan aliran sungai sehingga wilayah genangan relatif luas. Sementara itu, Kota Denpasar serta Kecamatan Benoa dan Kecamatan Nusa Dua di Kabupaten Badung di bagian selatan Bali menjadi wilayah pesisir paling kritis dengan genangan pesisir permanen yang dapat mendekati kedalaman 2 m. Dampak genangan di bagian selatan Bali berpotensi jauh lebih signifikan karena luasan genangan dapat merendam pusat-pusat aktivitas ekonomi, pariwisata internasional, serta infrastruktur strategis. Sebaliknya, Nusa Penida menunjukkan potensi genangan lebih lokal dengan kedalaman 0,5–1,5 m. Namun demikian, dampaknya dapat tetap signifikan untuk masyarakat pesisir yang bergantung pada perikanan dan wisata.

Berdasarkan model spasial, 25–30 persen garis pantai Bali akan memiliki probabilitas genangan pesisir permanen dengan kedalaman lebih dari 0,5 m. Wilayah dengan genangan maksimum terkonsentrasi di Kabupaten Jembrana serta sejumlah wilayah di Denpasar, Benoa, dan Nusa Dua. Dengan asumsi perluasan genangan rata-rata hingga 1 km dari garis pantai (Gambar 14, segmen merah-oranye), total luasan lahan yang berpotensi tergenang di Bali diperkirakan melebihi 150 ha. Besarnya ancaman ini menandakan potensi paparan serius terhadap keberlanjutan sosial-ekonomi karena wilayah terpapar meliputi permukiman padat, infrastruktur strategis, dan destinasi wisata utama penopang ekonomi daerah.

Gambar 14 | **Kedalaman genangan pesisir permanen Provinsi Bali tahun 2024**



Legenda
Kedalaman genangan banjir pesisir permanen (meter)
0 — 2
Batas administrasi kabupaten/kota

Sumber Peta
1. Data batas wilayah dari Badan Informasi Geospasial (2026)
2. Dinas Pekerjaan Umum, Penataan Ruang, Permukiman Provinsi Bali (2023)
3. Model elevasi digital NASA SRTM 30 m/DEMNAS (2000)
4. Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrumen Level-2A (SR) (2024)
5. Data ketinggian muka air laut TOPEX/Poseidon (1993-2020)
6. Global Active Archive of Large Flood Events (1985-2021)
7. Data titik banjir dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah Provinsi Bali (2019-2025)
8. Curah hujan harian dari CHIRPS (1981-2025)
9. ACCESS-CM2 SSP 2-4.5 & 5-8.5 (2030-2045)
10. Garis pantai dari Badan Informasi Geospasial (2022)

Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Pemetaan spasial genangan pesisir permanen pada kondisi proyeksi

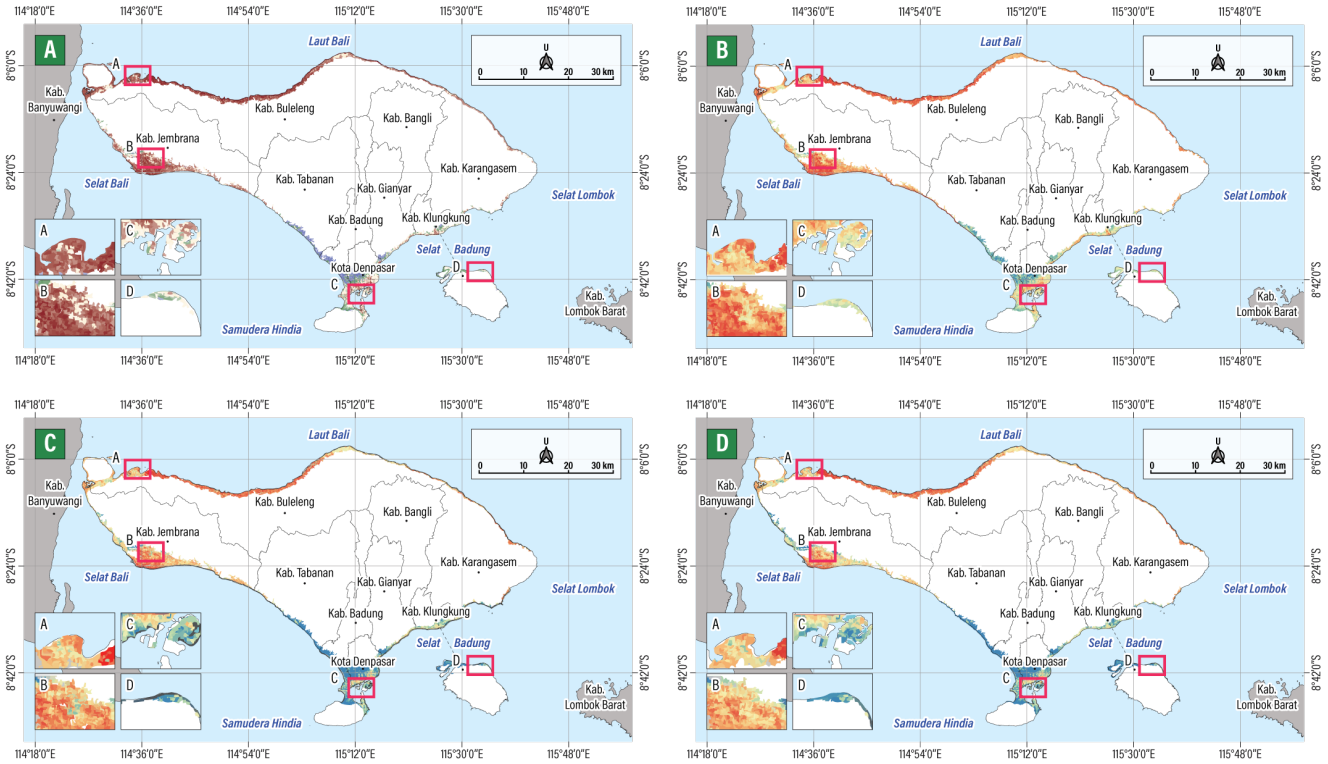
Berdasarkan skenario iklim moderat (SSP2-4.5) dan pesimistis (SSP5-8.5), hasil pemodelan spasial di Provinsi Bali menunjukkan tren peningkatan yang signifikan pada luas wilayah pesisir dengan kategori probabilitas genangan pesisir permanen tinggi. Sebaliknya, luas wilayah pesisir dengan kategori probabilitas genangan pesisir permanen rendah dan menengah cenderung menurun seiring dengan pergeseran area ke kategori probabilitas tinggi.

Pada 2030, yaitu awal periode proyeksi, Kecamatan Gerokgak di Kabupaten Buleleng serta Kecamatan Negara dan Jembrana di Kabupaten Jembrana telah menunjukkan luasan area dengan probabilitas tinggi yang melebihi 2.300 ha. Tren ini terus berlanjut hingga 2035, ditandai dengan perluasan area berprobabilitas tinggi ke wilayah pesisir utara, terutama Kecamatan Tejakula, Sawan, dan Kubutambahan di Kabupaten Buleleng. Selanjutnya, pada 2040, peningkatan luasan area dengan probabilitas menengah hingga tinggi juga mulai terlihat di Kecamatan Denpasar Selatan di Kota Denpasar dan Kecamatan Kuta Selatan di Kabupaten Badung. Temuan ini mengindikasikan kerawanan genangan pesisir permanen diproyeksikan semakin meluas dan mencakup lebih banyak wilayah pesisir Bali di masa mendatang.

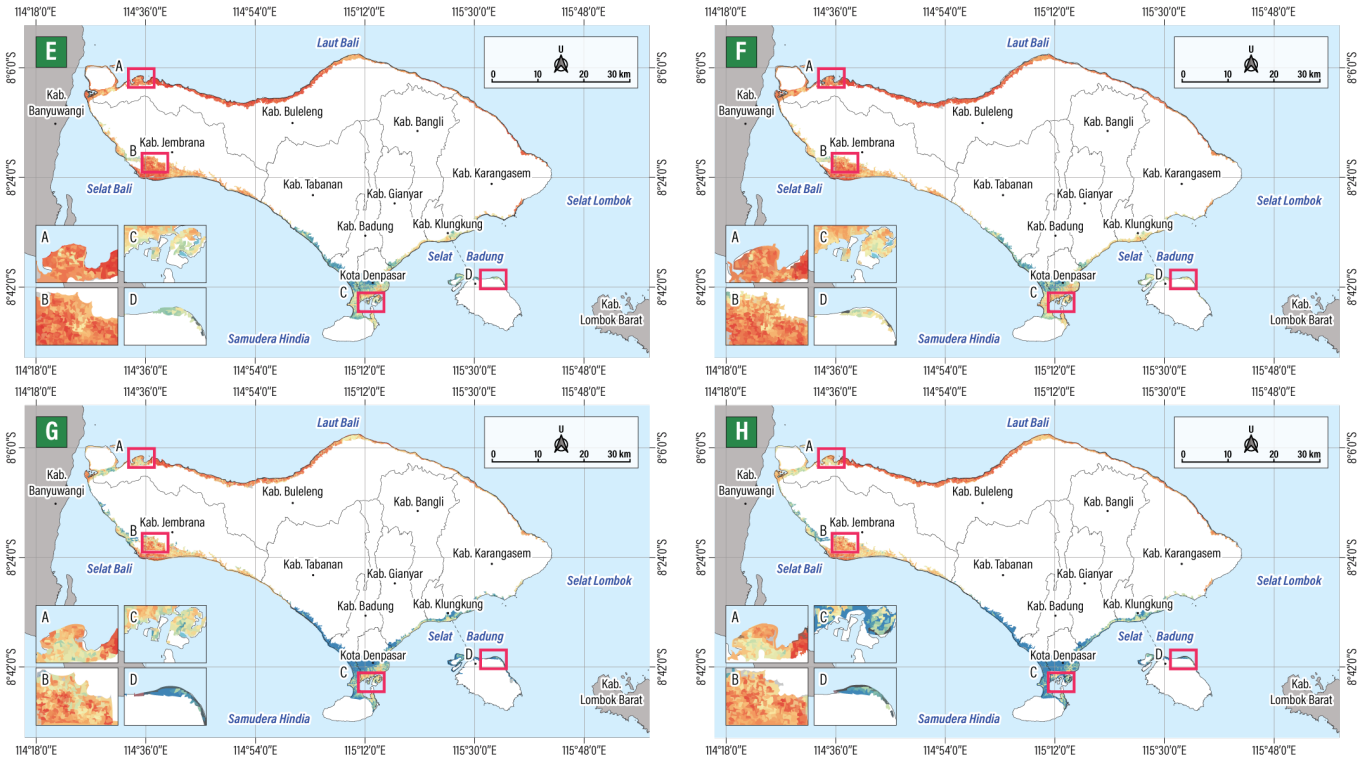
Pada 2045, yaitu akhir periode proyeksi, area dengan probabilitas genangan pesisir permanen yang tinggi di Kecamatan Denpasar Selatan diperkirakan akan meluas hingga lebih dari 741 ha pada 2045, terutama di bawah skenario SSP5-8.5. Di wilayah barat Bali, Kecamatan Negara dan Jembrana juga menunjukkan eskalasi yang signifikan dengan luas area berprobabilitas tinggi melebihi 5.036 ha. Sementara itu, di pesisir utara, Kecamatan Gerokgak diproyeksikan menjadi wilayah dengan luasan area berprobabilitas tinggi terbesar, mencapai lebih dari 4.937 ha pada 2045 (Gambar 15).

Perbedaan antara kedua skenario iklim semakin terlihat pada 2045. Di bawah skenario SSP5-8.5, hampir seluruh kecamatan pesisir di Provinsi Bali didominasi kategori probabilitas tinggi, yang mencerminkan percepatan intensitas akibat laju kenaikan muka laut yang lebih ekstrem. Sebaliknya, pada skenario SSP2-4.5, peningkatan probabilitas genangan tetap terjadi, tetapi dengan intensitas yang lebih moderat dan sebaran spasial yang lebih terbatas. Beberapa wilayah pesisir timur, seperti Kecamatan Klungkung di Kabupaten Klungkung, Kecamatan Gianyar di Kabupaten Gianyar, dan Kecamatan Karangasem di Kabupaten Karangasem, masih didominasi kategori probabilitas sedang dengan luasan berturut-turut sekitar 352 ha, 103 ha, dan 50 ha. Temuan ini menegaskan bahwa jalur pembangunan global dan tingkat ambisi mitigasi perubahan iklim akan sangat menentukan skala, sebaran, dan laju peningkatan probabilitas genangan pesisir permanen di Provinsi Bali pada masa mendatang.

Gambar 15 | **Proyeksi probabilitas genangan pesisir permanen di Provinsi Bali tahun 2030–45**



Gambar 15 | **Proyeksi probabilitas genangan pesisir permanen di Provinsi Bali tahun 2030–45 (lanjutan)**



Legenda

Indeks kerawanan/probabilitas kejadian genangan pesisir permanen

0 — 1

Batas administrasi kabupaten/kota

Sumber Peta

1. Data batas wilayah dari Badan Informasi Geospasial (2026)
2. Dinas Pekerjaan Umum, Penataan Ruang, Permukiman Provinsi Bali (2023)
3. Model elevasi digital NASA SRTM 30 m/DEMNAS (2000)
4. Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrumen Level-2A (SR) (2024)
5. Data ketinggian muka air laut TOPEX/Poseidon (1993-2020)
6. Global Active Archive of Large Flood Events (1985-2021)
7. Data titik banjir dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah Provinsi Bali (2019-2025)
8. CHIRPS harian (1981-2025)
9. ACCESS-CM2 SSP 2-4.5 & 5-8.5 (2030-2045)
10. Garis pantai dari Badan Informasi Geospasial (2022)

Catatan: A dan B = Proyeksi probabilitas genangan pesisir permanen Bali 2030 untuk SSP2-4.5 dan SSP5-8.5; C dan D = Proyeksi probabilitas genangan pesisir permanen Bali 2035 untuk SSP2-4.5 dan SSP5-8.5; E dan F = Proyeksi probabilitas genangan pesisir permanen Bali 2040 untuk SSP2-4.5 dan SSP5-8.5; G dan H = Proyeksi probabilitas genangan pesisir permanen Bali 2045 SSP2-4.5 dan SSP5-8.5. .

Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Sementara itu, hasil pemodelan proyeksi kedalaman genangan pesisir permanen di Provinsi Bali menunjukkan dinamika yang kompleks sepanjang periode 2024–45. Kedalaman genangan pesisir permanen dihitung berdasarkan kombinasi elevasi, tinggi muka air, dan skor probabilitas (0–1) sehingga mencerminkan peluang relatif terjadinya genangan sesuai karakteristik lokal.

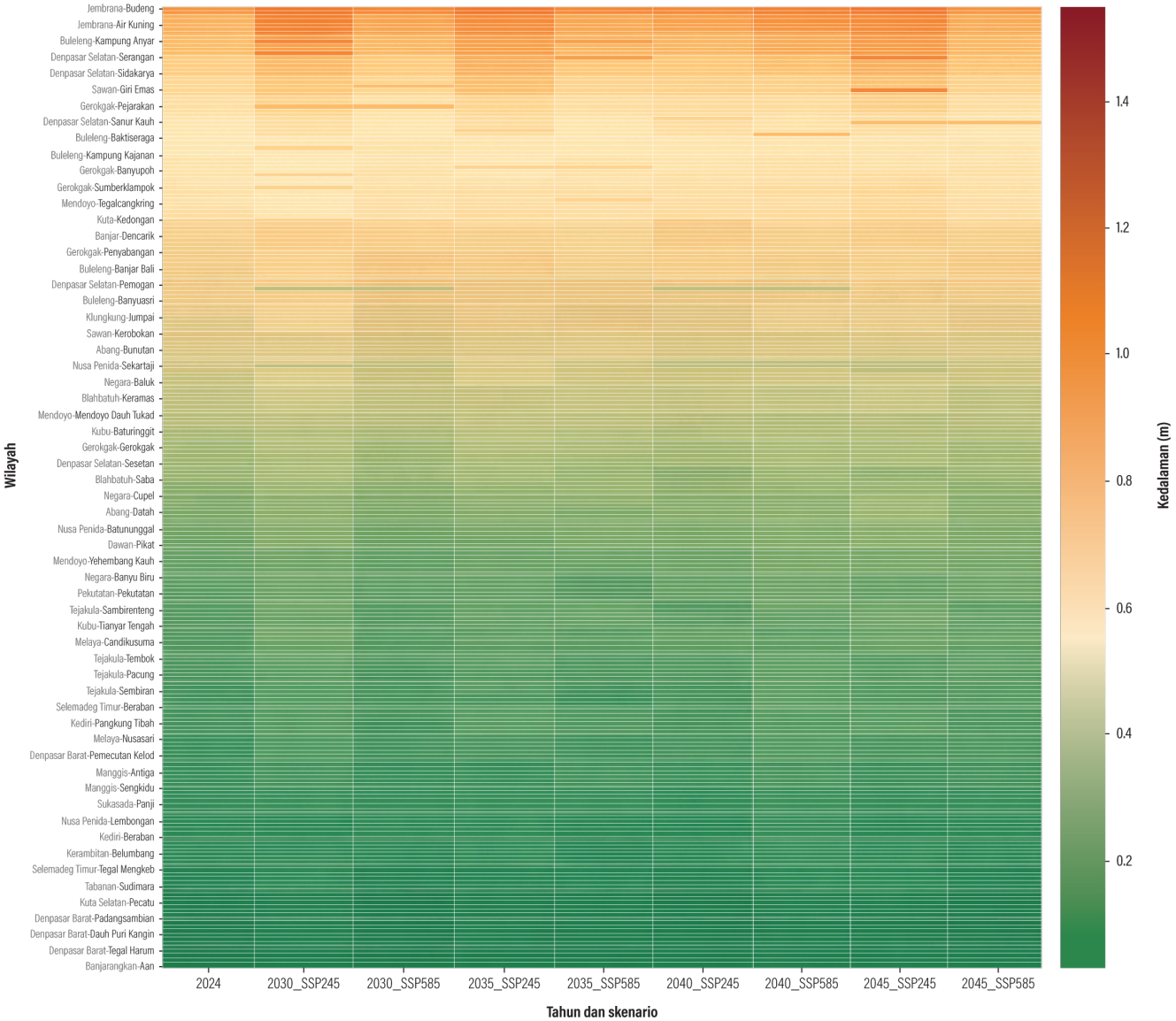
Pada 2024, sebagian besar wilayah pesisir diproyeksikan memiliki kedalaman genangan rata-rata 0,6–1,4 m. Nilai tertinggi terkonsentrasi di beberapa desa di Kabupaten Jembrana, seperti Budeng (1,47 m), Loloan Timur (1,19 m), dan Sangkaragung (1,19 m), sedangkan wilayah pesisir timur seperti Padangbai (0,58 m) dan Pesinggahan (0,59 m) menunjukkan kedalaman yang relatif lebih rendah. Pola ini mengindikasikan adanya perbedaan kerentanan yang cukup jelas antara pesisir barat-utara dan pesisir timur Bali.

Memasuki periode 2030–35, kedalaman genangan diproyeksikan meningkat di sebagian besar wilayah, terutama di pesisir utara dan barat. Desa Tangguwisia di Kecamatan Seririt, Kabupaten Buleleng, misalnya, diperkirakan mencapai kedalaman 1,20 m pada skenario SSP5-8.5, sementara kedalaman di Desa Budeng di Kabupaten Jembrana meningkat dari 1,47 m pada baseline tahun 2024 menjadi 1,51 m pada skenario SSP2-4.5. Pada skenario SSP5-8.5, peningkatan juga terlihat di Desa Kaliasem, Kecamatan Banjar, dan Kelurahan Gilimanuk, Kecamatan Melaya,

sedangkan wilayah selatan seperti Sanur dan Kuta mengalami kenaikan yang lebih moderat. Sebaliknya, sejumlah wilayah di pesisir timur, seperti Desa Tangkas di Klungkung dan Desa Lebih di Gianyar, cenderung menunjukkan perubahan yang lebih kecil (Gambar 16).

Tren tersebut semakin menguat pada periode 2040–45. Di bawah skenario SSP5-8.5, Desa Budeng di Kabupaten Jembrana tetap menjadi wilayah dengan kedalaman genangan pesisir permanen tertinggi, mencapai sekitar 1,48 m pada 2045. Wilayah pesisir utara, khususnya Kecamatan Gerokgak di Kabupaten Buleleng, juga menunjukkan kedalaman genangan pesisir permanen yang konsisten pada kisaran 0,95–1,03 m. Sementara itu, beberapa wilayah di pesisir timur dan tenggara, seperti Kecamatan Klungkung dan Sanur, cenderung mempertahankan kedalaman genangan pesisir permanen yang relatif lebih rendah. Temuan ini menunjukkan kerawanan kenaikan muka laut di Provinsi Bali bersifat spasial dan sangat dipengaruhi kombinasi kondisi topografi, karakteristik pesisir, dan pola pemanfaatan lahan.

Gambar 16 | **Kedalaman genangan pesisir permanen di Provinsi Bali menurut wilayah dan skenario**

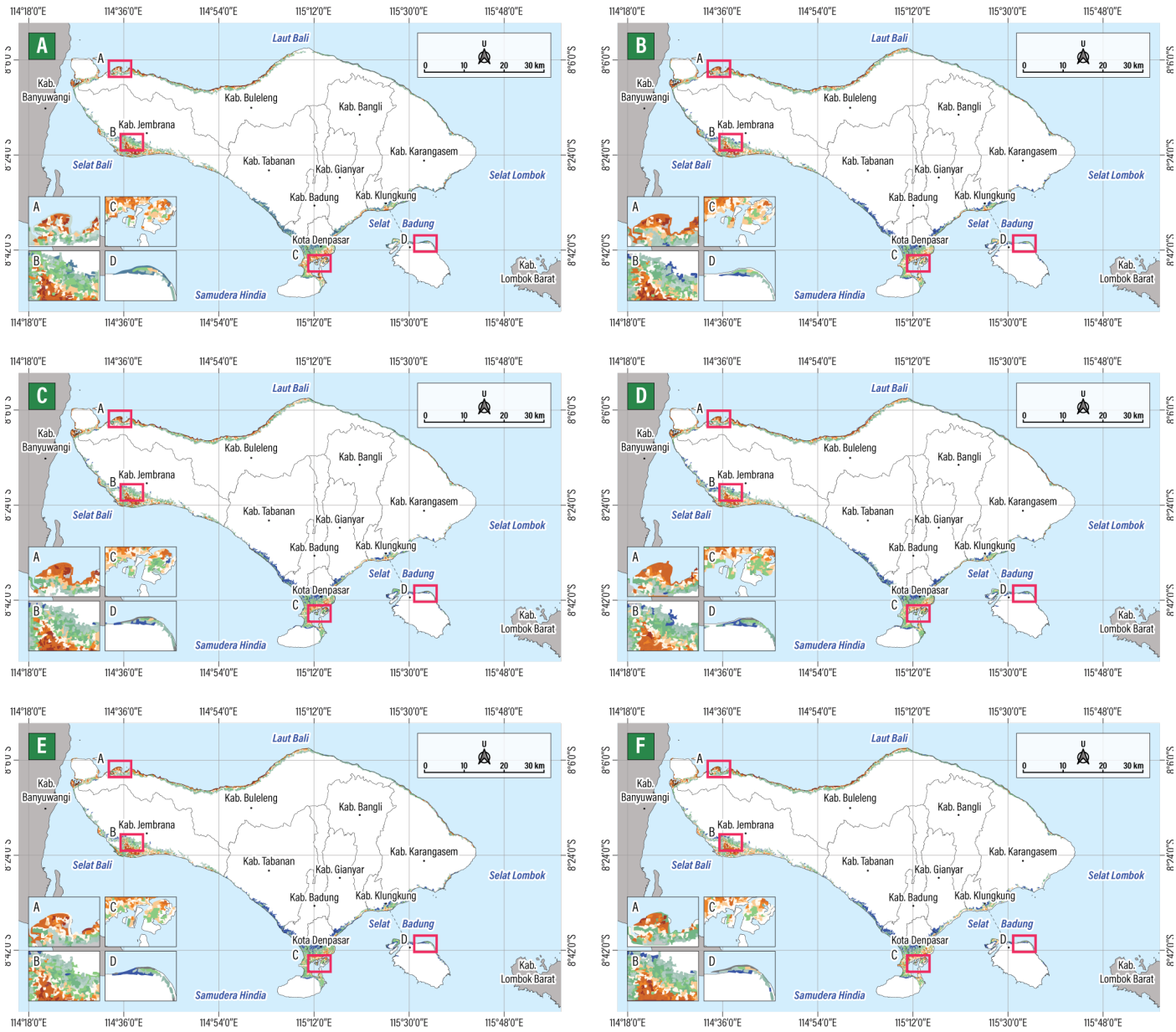


Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

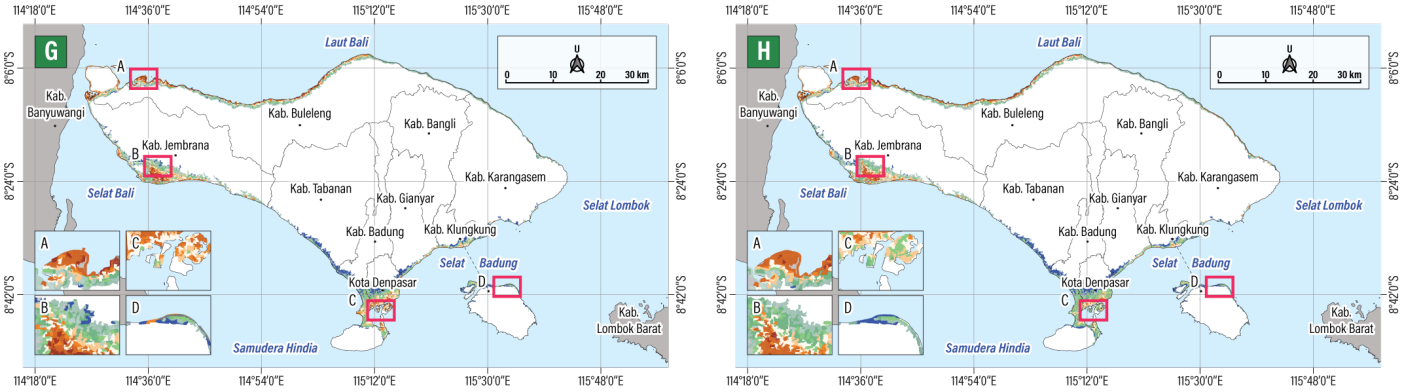
Secara keseluruhan, pola proyeksi ini menegaskan bahwa Kecamatan Jembrana (Desa Budeng, Loloan Timur, dan Air Kuning) dan Kecamatan Negara (Desa Lelateng dan Pengambengan) di Kabupaten Jembrana, serta Kecamatan Seririt di Kabupaten Buleleng (Desa Tangguwisia, Kalisada, dan Lokapaksa) secara konsisten menjadi wilayah pesisir dengan kedalaman genangan pesisir permanen yang tinggi sepanjang periode 2024–45, khususnya pada skenario iklim SSP5-8.5. Sebaliknya, wilayah pesisir dengan kedalaman genangan relatif rendah secara konsisten ditemukan di Bali bagian timur dan tenggara, seperti Padangbai di Kabupaten Karangasem, Tangkas dan Kusamba di Kabupaten Klungkung, serta Sanur di Kota Denpasar.

Perbedaan spasial kedalaman genangan pesisir permanen di Bali (Gambar 17) berimplikasi pada perbedaan strategi penanggulangannya. Wilayah barat-utara dengan tingkat kerawanan dan probabilitas tinggi memerlukan intervensi struktural dan nonstruktural, seperti pembangunan tanggul laut, sistem drainase terpadu, dan penguatan zona penyangga pesisir (IPCC 2023). Sebaliknya, wilayah timur-selatan yang memiliki probabilitas lebih rendah dan kapasitas ekosistem lebih tinggi lebih tepat diarahkan pada aksi berbasis ekosistem dan tata ruang adaptif, seperti restorasi mangrove dan pengaturan zonasi pembangunan (UNEP 2021).

Gambar 17 | **Proyeksi kedalaman genangan pesisir permanen di Provinsi Bali tahun 2030–45**



Gambar 17 | **Proyeksi kedalaman genangan pesisir permanen di Provinsi Bali tahun 2030–45 (lanjutan)**



Legenda

Kedalaman genangan banjir pesisir permanen (meter)

0 — 2

Batas administrasi kabupaten/kota

Sumber Peta

1. Data batas wilayah dari Badan Informasi Geospasial (2026)
2. Dinas Pekerjaan Umum, Penataan Ruang, Perumahan, dan Kawasan Permukiman Provinsi Bali (2023)
3. Model elevasi digital NASA SRTM 30 m/DEMNAS (2000)
4. Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrumen Level-2A (SR) (2024)
5. Data ketinggian laut TOPEX/Poseidon (1993-2020)
6. Global Active Archive of Large Flood Events (1985-2021)
7. Data titik banjir dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah Provinsi Bali (2019-2025)
8. CHIRPS harian (1981-2025)
9. ACCESS-CM2 SSP 2-4.5 & 5-8.5 (2030-2045)
10. Garis pantai dari Badan Informasi Geospasial (2022)

Catatan: A dan B = Proyeksi kedalaman genangan pesisir permanen Bali 2030 untuk SSP2-4.5 dan SSP5-8.5; C dan D = Proyeksi kedalaman genangan pesisir permanen Bali 2035 untuk SSP2-4.5 dan SSP5-8.5; E dan F = Proyeksi kedalaman genangan pesisir permanen Bali 2040 untuk SSP2-4.5 dan SSP5-8.5; G dan H = Proyeksi kedalaman genangan pesisir permanen Bali 2045 SSP2-4.5 dan SSP5-8.5.

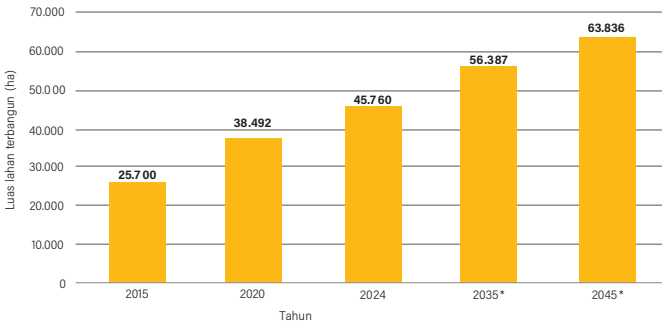
Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Estimasi keterpaparan dan potensi kerugian bangunan akibat genangan pesisir permanen

Selain potensi paparan terhadap rencana tata ruang Provinsi Bali, potensi kerugian ekonomi akibat kerusakan bangunan juga menjadi fokus studi ini guna memberikan gambaran intensitas paparan dan kerugian yang dapat terjadi apabila intervensi tidak dilakukan. Potensi kerugian ekonomi tersebut dihitung berdasarkan luas bangunan yang terpapar serta tinggi rendaman genangan. Untuk mengidentifikasi luas bangunan yang berpotensi terpapar genangan pada 2035 dan 2045, penelitian ini melakukan simulasi menggunakan Cellular Automata-Markov Chain.

Hasil pemodelan menunjukkan, luas lahan terbangun di Provinsi Bali diprediksi akan terus meningkat dari 45.760 ha pada 2024 menjadi 56.387 ha pada 2035, dan mencapai 63.836 ha pada 2045 (Gambar 18). Peningkatan sekitar 18.000 ha dalam dua dekade ini mencerminkan tren urbanisasi yang konsisten dengan pertumbuhan penduduk, peningkatan kebutuhan permukiman, serta pembangunan infrastruktur pendukung.

Gambar 18 | **Perkembangan luasan lahan terbangun di Provinsi Bali tahun 2015–45**

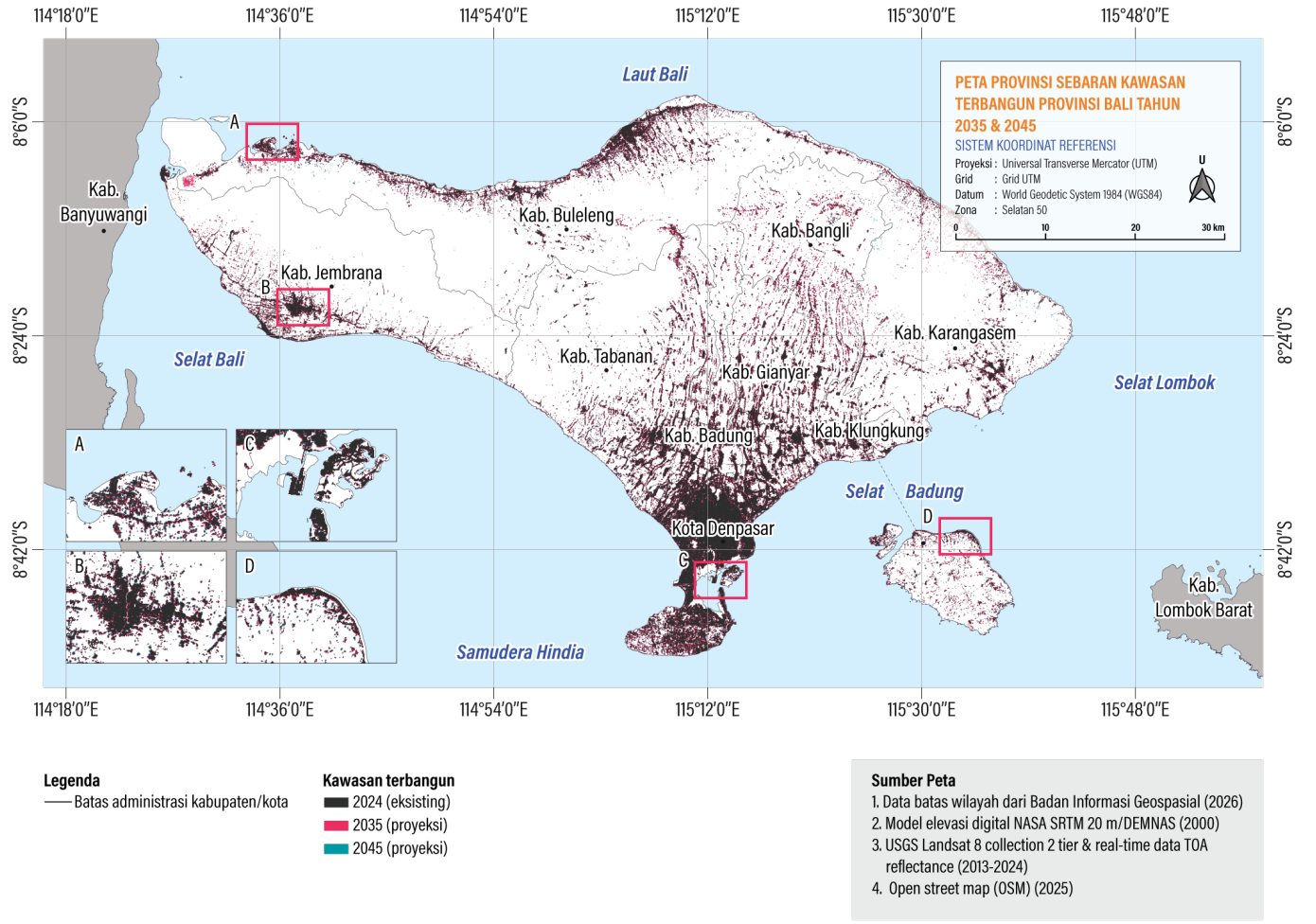


Catatan: * = proyeksi.

Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Secara sebaran spasial, ekspansi lahan terbangun di masa mendatang diproyeksikan masih akan terkonsentrasi di Kota Denpasar, Kabupaten Badung, dan Kabupaten Gianyar sebagai pusat kegiatan ekonomi, administratif, dan pariwisata (Gambar 19 bagian C). Padahal, berdasarkan hasil pemetaan genangan pesisir permanen, wilayah selatan Bali, terutama Kota Denpasar dan Kabupaten Badung, termasuk wilayah pesisir yang berpotensi tergenang. Selain itu, proyeksi juga menunjukkan munculnya klaster pembangunan baru di luar pusat utama yang turut berlokasi di wilayah rawan genangan pesisir permanen, seperti di Kecamatan Singaraja dan Kecamatan Gerokgak (Gambar 19 bagian A), serta Kabupaten Jembrana (Gambar 19 bagian B). Pertumbuhan ini didorong oleh tekanan kebutuhan ruang untuk permukiman dari bagian selatan Pulau Bali sekaligus oleh pengembangan infrastruktur dan aktivitas ekonomi regional.

Gambar 19 | **Proyeksi sebaran kawasan terbangun Provinsi Bali tahun 2035 dan 2045**



Catatan: A = Kecamatan Gerogak; B = Kecamatan Negara; C = Kecamatan Denpasar Selatan; D = Kecamatan Nusa Penida.
Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Kondisi ini mengindikasikan tren perkembangan ruang dan investasi masih belum sepenuhnya mempertimbangkan implikasi perubahan iklim dalam jangka panjang. Meskipun konsentrasi pembangunan di kawasan tersebut dapat mendorong pertumbuhan ekonomi dalam jangka pendek, tanpa upaya adaptasi perubahan iklim yang memadai, meningkatnya keterpaparan terhadap genangan pesisir permanen berpotensi menimbulkan kerugian yang semakin besar dan mengurangi keberlanjutan manfaat ekonomi yang dihasilkan.

Jika disandingkan dengan wilayah pesisir yang rawan mengalami genangan pesisir permanen, luas bangunan di wilayah pesisir yang berpotensi terendam genangan pesisir permanen menunjukkan tren kenaikan yang signifikan dari 2024 (Tabel 5). Luas genangan tercatat 12.396 ha pada 2024 dengan kedalaman rata-rata 0,57 m, yang kemudian meningkat menjadi 13.976 ha dengan kedalaman rata-rata 0,56 m pada 2035, dan pada akhirnya mencapai 15.295 ha dengan kedalaman rata-rata 0,55 m pada 2045 dalam skenario SSP2-4.5. Luasan bangunan terendam ini bahkan cenderung lebih tinggi pada skenario SSP5-8.5, dengan kedalaman genangan pesisir permanen tetap relatif stabil di kisaran 0,5–0,6 m.

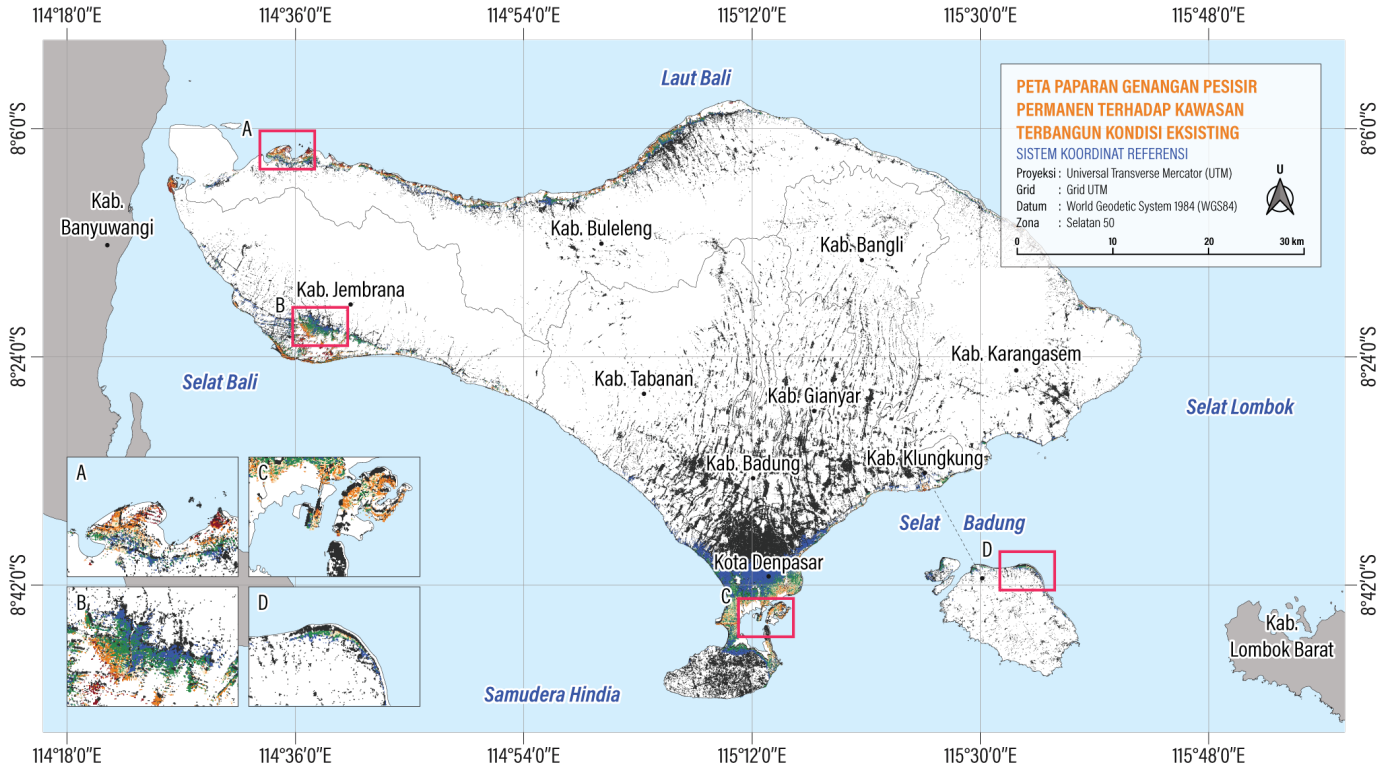
Tabel 5 | **Proyeksi luas bangunan di wilayah pesisir yang berpotensi terendam dan rata-rata kedalaman genangan pesisir permanen di Provinsi Bali**

Kabupaten/kota	Tahun									
	2024		2035				2045			
	Luas (ha)	Tinggi (m)	SSP2-4.5		SSP5-8.5		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
			Luas (ha)	Tinggi (m)	Luas (ha)	Tinggi (m)	Luas (ha)	Tinggi (m)	Luas (ha)	Tinggi (m)
Kabupaten Badung	2.831	0,45	3.137	0,53	3.176	0,56	3.351	0,61	3.394	0,56
Kabupaten Bangli	0,7	0,66	1,1	0,55	1,35	0,54	1,4	0,44	1,6	0,47
Kabupaten Buleleng	1.956	0,75	2.425	0,78	2.471	0,79	2.852	0,81	2.907	0,77
Kabupaten Gianyar	395	0,67	461	0,44	469	0,44	511	0,21	520	0,39
Kabupaten Jembrana	1.880	0,76	2.141	0,8	2.166	0,76	2.402	0,84	2.431	0,75
Kabupaten Karangasem	278	0,54	342	0,58	356	0,59	415	0,62	431	0,55
Kabupaten Klungkung	477	0,51	578	0,47	593	0,49	669	0,43	686	0,44
Kabupaten Tabanan	68	0,18	76	0,2	80	0,17	98	0,22	102	0,15
Kota Denpasar	4.506	0,63	4.810	0,7	4.848	0,56	4.991	0,77	5.030	0,42
Provinsi Bali	**12.396**	**0,57**	**13.976**	**0,56**	**14.165**	**0,54**	**15.295**	**0,55**	**15.507**	**0,50**

Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Dari semua kabupaten/kota di Provinsi Bali, wilayah pesisir di Kota Denpasar, Kabupaten Badung, dan Kabupaten Buleleng tercatat sebagai wilayah dengan tingkat keterpaparan terbesar baik pada kondisi baseline (Gambar 20 bagian A dan C) maupun pada proyeksi hingga 2045 (Gambar 21 bagian A dan C). Tingkat keterpaparan terluas adalah di Kota Denpasar, dengan proyeksi meningkat dari 4.506 ha pada 2024 menjadi 5.030 ha pada 2045 di bawah skenario SSP5-8.5 (Tabel 5). Sebaliknya, Kabupaten Bangli merupakan wilayah dengan luas bangunan terdampak genangan terkecil, yaitu sekitar 0,7 ha. Meskipun demikian, luas keterpaparan tersebut diproyeksikan terus meningkat hingga mencapai 1,6 ha pada 2045 di bawah skenario SSP5-8.5.

Gambar 20 | **Paparan genangan pesisir permanen terhadap kawasan terbangun pada kondisi eksisting**



Legenda

Batas administrasi kabupaten/kota

Kawasan terbangun yang tidak terendam

2024 (eksisting)

Kawasan terbangun yang terendam

Berdasarkan tinggi rendaman (m)

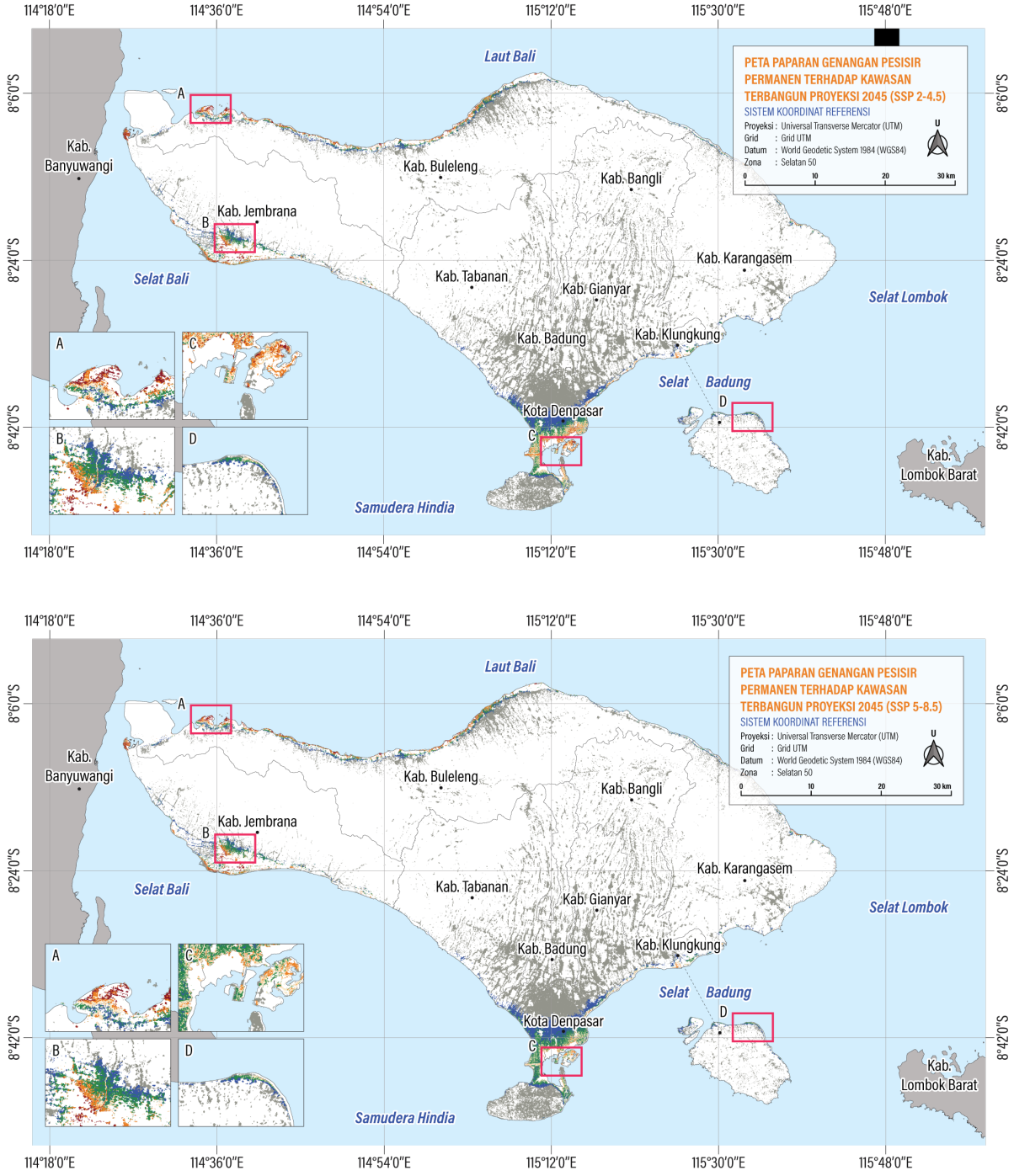
0,1 — 1,89

Sumber Peta

1. Data batas wilayah dari Badan Informasi Geospasial (2026)
2. Dinas Pekerjaan Umum, Penataan Ruang, Permukiman Provinsi Bali (2023)
3. Model elevasi digital NASA SRTM 30 m/DEMNAS (2000)
4. Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrumen Level-2A (SR) (2024)
5. Data ketinggian muka air laut TOPEX/Poseidon (1993-2020)
6. Data titik banjir dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah Provinsi Bali (2019-2025)
7. Data harian CHIRPS (1981-2025)
8. ACCESS-CM2 SSP 2-4.5 & 5-8.5 (2030-2045)
9. Garis Pantai dari Badan Informasi Geospasial (2022)
10. USGS landsat 8 collection 2 tier 1 & real-time data TOA reflectance (2013-2024)
11. Open street map (OSM) (2025)

Catatan: A = Kecamatan Gerogak; B = Kecamatan Negara; C = Kecamatan Denpasar Selatan; D = Kecamatan Nusa Penida.
Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Gambar 21 | **Paparan genangan pesisir permanen terhadap kawasan terbangun pada 2045**



Legenda
—— Batas administrasi kabupaten/kota

Kawasan terbangun yang tidak terendam
2045 (proyeksi)

Kawasan terbangun yang terendam
Berdasarkan tinggi rendaman (m)

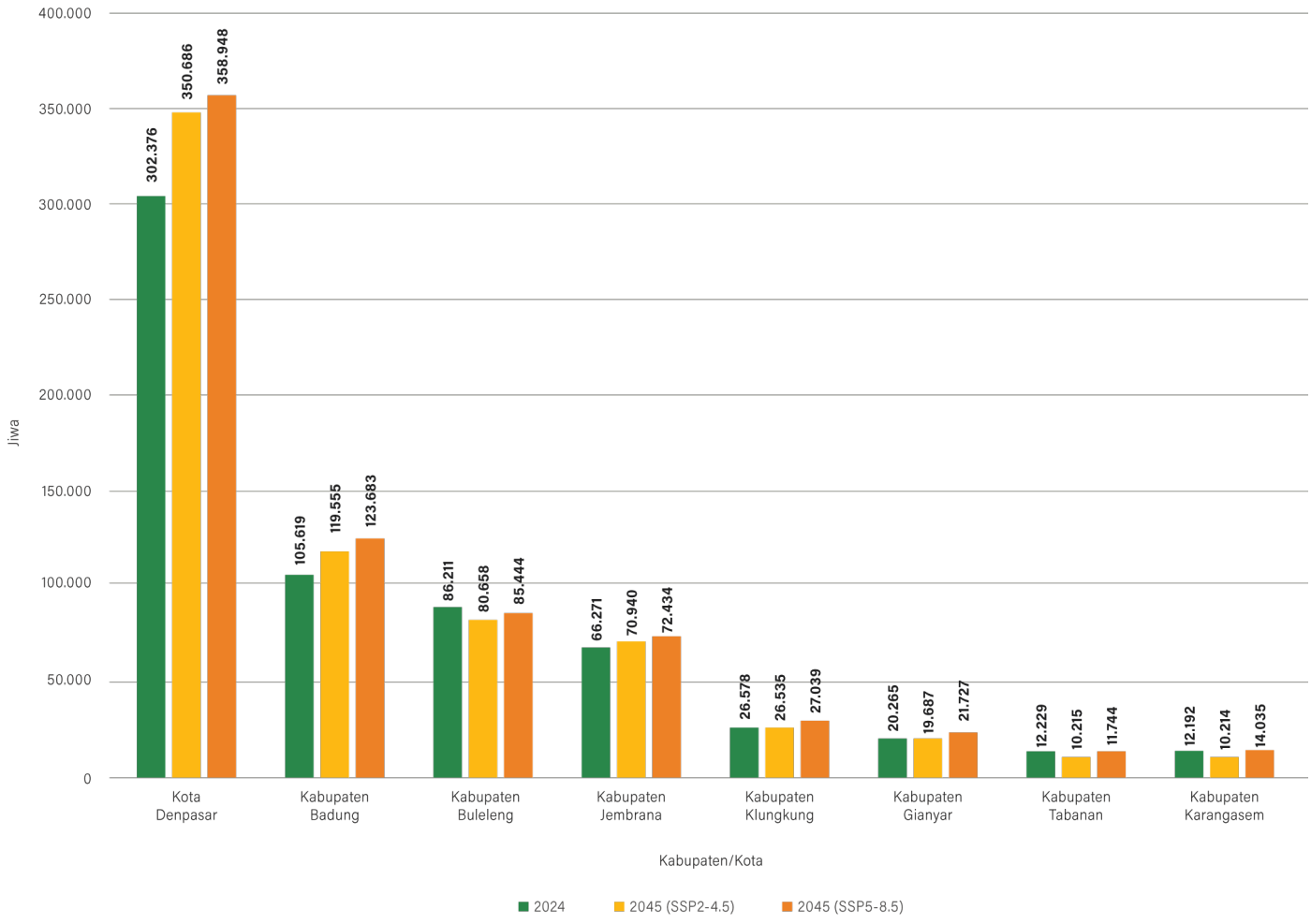
0,1 — 1,89

Sumber Peta
1. Data batas wilayah dari Badan Informasi Geospasial (2026)
2. Dinas Pekerjaan Umum, Penataan Ruang, Permukiman Provinsi Bali (2023)
3. Model elevasi digital NASA SRTM 30m/DEMNAS (2000)
4. Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrumen Level-2A (SR) (2024)
5. Data permukaan laut dari TOPEX/Poseideon (1993-2020)
6. Data titik banjir dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah Provinsi Bali (2019-2025)
7. Data harian CHIRPS (1981-2025)
8. ACCESS-CM2 SSP 2-4.5 & 5-8.5 (2030-2045)
9. Garis Pantai dari Badan Informasi Geospasial (2022)
10. USGS landsat 8 collection 2 tier 1 & real-time data TOA reflectance (2013-2024)
11. Open street map (OSM) (2025)

Catatan: A = Kecamatan Gerogak; B = Kecamatan Negara; C = Kecamatan Denpasar Selatan; D = Kecamatan Nusa Penida.
Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Sejalan dengan tingginya tingkat keterpaparan wilayah, jumlah penduduk pesisir yang terpapar genangan pesisir permanen juga diproyeksikan terus meningkat hingga 2045. Kota Denpasar serta Kabupaten Badung, Buleleng, dan Jembrana merupakan wilayah dengan jumlah penduduk pesisir terpapar terbesar di Provinsi Bali (Gambar 22). Di antara kabupaten/kota tersebut, Kota Denpasar memerlukan perhatian khusus karena memiliki jumlah penduduk terpapar paling tinggi. Pada 2024, sekitar 300.000 jiwa penduduk pesisir berpotensi terdampak genangan pesisir permanen. Jumlah tersebut diproyeksikan meningkat menjadi sekitar 350.000 jiwa tahun 2045 pada kedua skenario proyeksi iklim (Lampiran H). Angka ini hampir tiga kali lipat dari Kabupaten Badung yang berada di posisi kedua dan setara dengan sekitar 60 persen dari total penduduk pesisir Kota Denpasar.

Gambar 22 | **Jumlah penduduk yang terpapar genangan pesisir permanen tahun 2024 dan proyeksi tahun 2045 menurut kabupaten/kota**

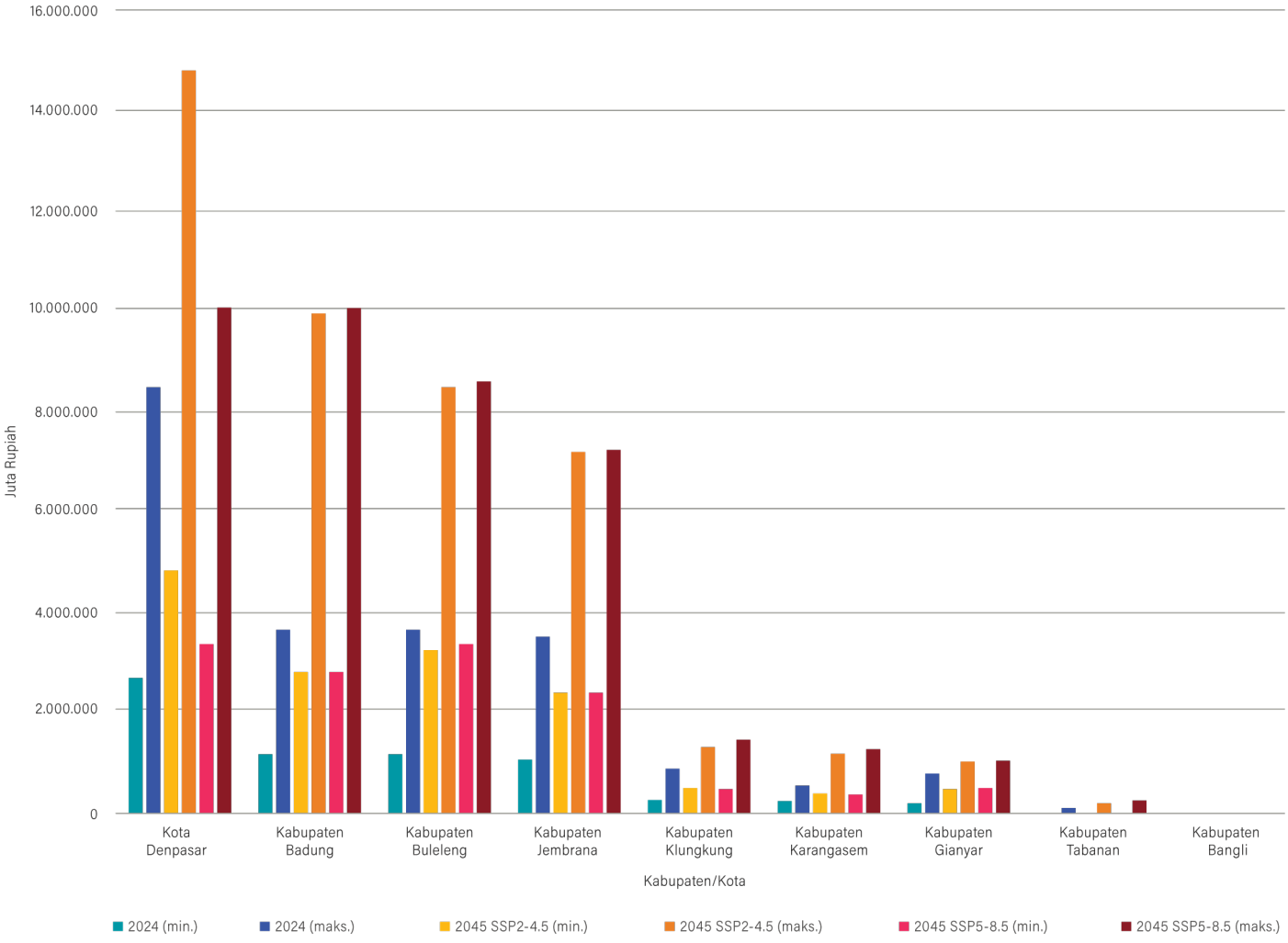


Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Berdasarkan temuan tersebut, apabila luas kawasan terbangun tergenang sesuai dengan prediksi studi, maka estimasi total kerugian bangunan di Provinsi Bali pada kondisi eksisting berkisar Rp6 triliun ($360 juta)–Rp20 triliun ($1,21 miliar) (Lampiran I) yang setara dengan 2,3-6,9 persen PDRB provinsi tahun 2024 (BPS Provinsi Bali 2025b). Angka ini diproyeksikan meningkat menjadi sekitar Rp14 triliun ($840 juta)–Rp44 triliun ($2,65 miliar) pada 2045 dalam skenario SSP2-4.5 dan setara dengan 4,9-14,8 persen PDRB (Gambar 23).

Dalam skenario emisi tinggi (SSP5-8.5), nilai kerugian pada 2045 diperkirakan sedikit lebih rendah, yakni berkisar Rp13 triliun–Rp39 triliun, tetapi tetap menunjukkan peningkatan yang substansial. Proyeksi yang lebih rendah ini terjadi karena pada beberapa wilayah, tinggi dan luasan genangan pada skenario SSP5-8.5 justru lebih rendah dibandingkan dengan SSP2-4.5, yang dapat diakibatkan oleh respons kenaikan muka laut yang bersifat heterogen serta pengaruh faktor fisik wilayah pesisir dan tata guna lahan. Kota Denpasar menanggung kerugian terbesar dengan proyeksi antara Rp3 triliun–Rp14 triliun pada 2045, disusul Kabupaten Badung (Rp3 triliun–Rp10 triliun), Buleleng (Rp2 triliun–Rp8 triliun), dan Jembrana (Rp2 triliun-Rp7 triliun).

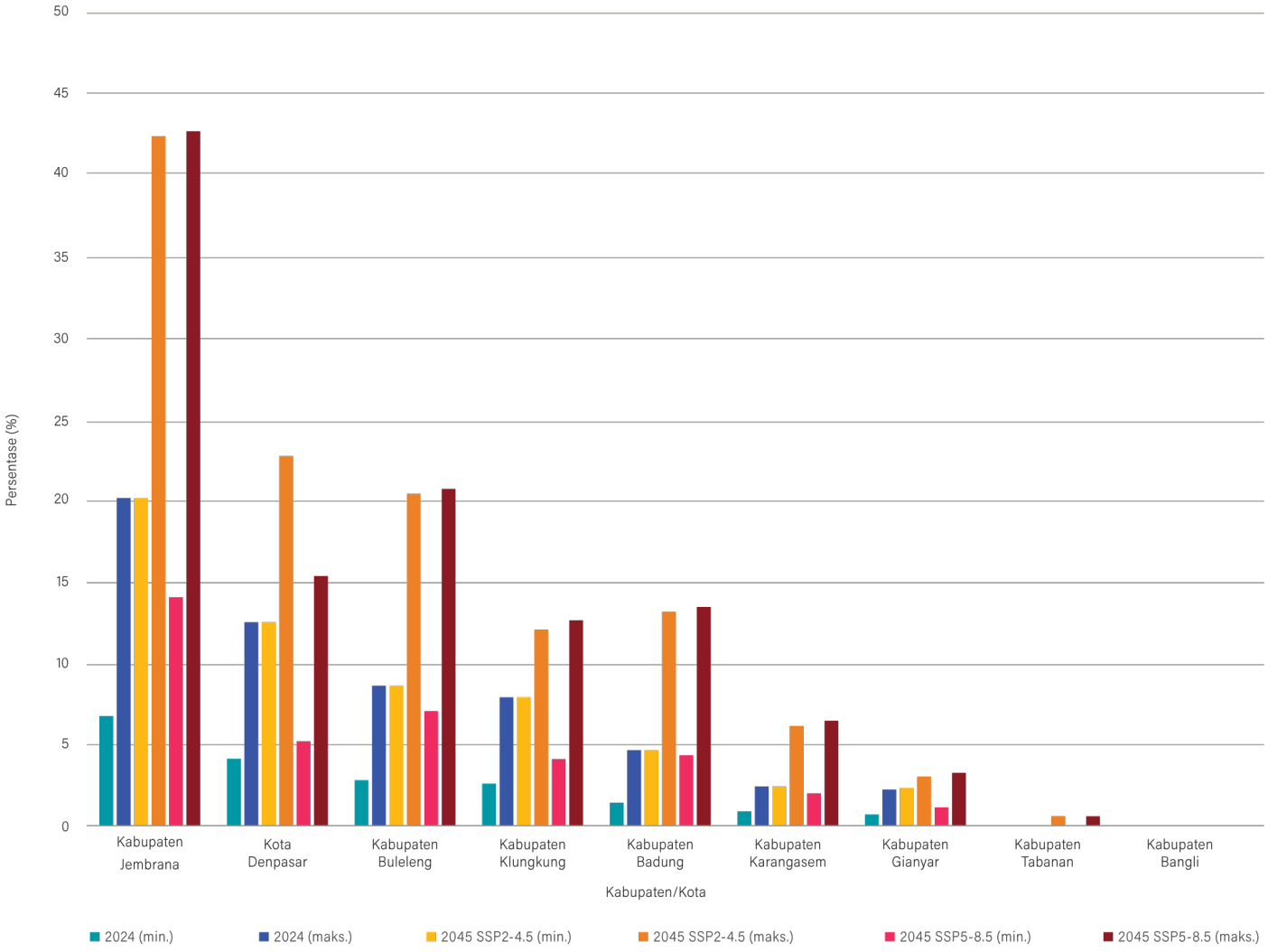
Gambar 23 | **Potensi kerugian kerusakan bangunan menurut kabupaten/kota**



Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Kendati demikian, jika dinormalisasi terhadap nilai PDRB atas dasar harga yang berlaku tahun 2024 per kabupaten/kota, Kabupaten Jembrana justru menunjukkan tingkat kerentanan ekonomi yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kabupaten/kota lainnya (Gambar 24). Potensi kerugian akibat genangan pesisir permanen di Jembrana diperkirakan setara dengan sekitar 20 persen PDRB pada 2024 dan meningkat menjadi lebih dari 40 persen pada 2045. Nilai tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kabupaten/kota lainnya, yang pada kondisi terburuk umumnya mencatat proporsi kerugian di bawah 25 persen dari PDRB wilayah. Sebaliknya, Kabupaten Badung, meskipun mencatat kerugian ekonomi total terbesar kedua, proporsi kerugiannya tahun 2045 terhadap PDRB wilayah masih di bawah 15 persen dan hanya menempati peringkat kelima. Dengan demikian, temuan ini perlu menjadi perhatian Pemerintah Kabupaten Jembrana. Meskipun nilai kerugian absolutnya bukan yang terbesar, dampaknya terhadap perekonomian daerah berpotensi lebih signifikan akibat tingginya proporsi kerugian terhadap kapasitas ekonomi wilayah.

Gambar 24 | **Rasio potensi kerugian kerusakan bangunan terhadap PDRB**



Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Melalui analisis ini, dapat ditarik kesimpulan bahwa genangan pesisir permanen di Provinsi Bali berpotensi menimbulkan kerugian maksimal sekitar Rp1,6 miliar per ha pada kondisi eksisting (2024) dan meningkat menjadi sekitar Rp2,8 miliar per ha tahun 2045 pada skenario SSP2-4.5. Nilai ini nyatanya masih lebih rendah dibandingkan dengan proyeksi di Jakarta Utara yang diperkirakan mencapai Rp4,76 triliun untuk area seluas 322 ha atau sekitar Rp14 miliar per ha (Purnama et al. 2015). Bahkan, studi oleh Suroso dan Firman (2018) mengestimasi potensi kerugian di seluruh wilayah pantai utara Jawa dapat mencapai hingga Rp74 miliar per ha.

Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh pendekatan yang digunakan dalam kedua studi tersebut yang mempertimbangkan nilai berbagai kelas penutupan lahan, seperti kawasan lindung, perikanan, pertanian, industri, hutan produksi, dan perkebunan. Adapun estimasi kerugian di Provinsi Bali pada studi ini hanya mempertimbangkan kawasan terbangun dengan hanya menggunakan nilai kerugian dari sektor permukiman. Dengan demikian, hasil yang diperoleh kemungkinan masih lebih rendah daripada potensi kerugian aktual apabila tutupan lahan lain turut diperhitungkan.

Rekomendasi strategi penataan ruang

Berdasarkan hasil pemodelan iklim, Provinsi Bali menghadapi persoalan tingginya potensi luas genangan pesisir permanen yang diprediksi akan terus meningkat seiring ekspansi lahan terbangun, yang akan menimbulkan kerugian akibat kerusakan bangunan yang cukup signifikan di masa depan. Jika orientasi pembangunan dan tata ruang masih berfokus pada perluasan kawasan produktif tanpa mempertimbangkan proyeksi perubahan iklim, maka kerugian ini akan terus meningkat. Dampak tersebut akan terasa lebih berat bagi komunitas pesisir yang umumnya memiliki kapasitas lebih terbatas daripada kelompok masyarakat lainnya. Dalam konteks ini, pergeseran menuju pembangunan yang berketahanan iklim melalui pendekatan *green economy*[6], pembangunan rendah emisi, dan pemulihan ekosistem menjadi semakin penting untuk memastikan keberlanjutan pembangunan jangka panjang.

RTRW Provinsi Bali 2023–2043 sebenarnya telah menetapkan tujuan penyelenggaraan tata ruang yang berkualitas, aman, nyaman, produktif, dan berkelanjutan dalam Pasal 5. Meski demikian, dimensi perubahan iklim belum sepenuhnya tecermin secara kuat dalam strategi yang ada. Padahal, integrasi informasi perubahan iklim ke dalam RTRW tidak hanya relevan untuk mengurangi potensi kerugian di masa depan, tetapi juga sejalan dengan tujuan dasar tata ruang, yaitu melindungi masyarakat, aset pembangunan, dan fungsi lingkungan. Sebagai contoh, informasi mengenai proyeksi genangan pesisir permanen dalam jangka panjang dapat digunakan sebagai salah satu pertimbangan dalam penetapan kawasan lindung (Pasal 9), pengendalian pemanfaatan ruang di kawasan rawan, ataupun penentuan prioritas lokasi intervensi.

Dalam konteks kawasan lindung, integrasi informasi spasial perubahan iklim menjadi penting karena kawasan-kawasan tersebut tidak hanya berfungsi menjaga keseimbangan ekologis, tetapi juga berperan sebagai benteng alami terhadap dampak perubahan iklim. Ekosistem pesisir seperti mangrove dapat membantu meredam energi gelombang, mengurangi laju abrasi, serta menurunkan dampak genangan pesisir terhadap permukiman dan infrastruktur di sekitarnya.

Karena itu, penggunaan informasi perubahan iklim dalam perencanaan tata ruang tidak hanya bertujuan untuk melindungi ekosistem dari tekanan pembangunan, tetapi juga untuk mempertahankan dan meningkatkan fungsi perlindungan ekosistem terhadap masyarakat dan aset ekonomi. Dengan demikian, integrasi analisis perubahan iklim ke dalam RTRW dapat memberikan manfaat ganda, yaitu memperkuat ketahanan ekosistem sekaligus mengurangi risiko bencana dan kerugian ekonomi di wilayah pesisir.

Berdasarkan hasil analisis kerawanan, keterpaparan, dan potensi kerugian akibat genangan pesisir permanen, studi ini merumuskan sejumlah strategi penataan ruang untuk mengurangi tingkat keterpaparan aset, penduduk, dan aktivitas ekonomi di wilayah pesisir Provinsi Bali yang kami bagi menjadi tiga aspek: rencana pola ruang, rencana struktur ruang, dan rencana kawasan strategis.

Rencana pola ruang

Sejumlah wilayah terbangun di sepanjang wilayah pesisir Provinsi Bali berpotensi terpapar genangan pesisir permanen, dengan estimasi kerugian kerusakan bangunan tertinggi terkonsentrasi di Kota Denpasar, serta Kabupaten Badung, Buleleng, dan Jembrana. Kondisi ini tidak hanya dipengaruhi tingkat kerawanan genangan, tetapi juga tingginya konsentrasi aset, permukiman, dan aktivitas ekonomi yang berada di kawasan pesisir.

Saat ini, RTRW Provinsi Bali 2023–2043 masih mengarahkan sebagian besar wilayah pesisir sebagai kawasan peruntukan pariwisata dan budidaya lainnya sebagai penggerak utama perekonomian daerah. Konsentrasi pembangunan tersebut berpotensi meningkatkan keterpaparan aset dan penduduk terhadap genangan pesisir permanen apabila tidak diimbangi dengan pengelolaan ruang yang mempertimbangkan proyeksi perubahan iklim. Karena itu, diperlukan peninjauan kembali terhadap peruntukan ruang pada kawasan yang berada dalam zona dengan tingkat kerawanan tinggi, khususnya kawasan transportasi, permukiman, pariwisata, pertanian, dan

peruntukan industri yang diproyeksikan semakin mungkin mengalami genangan pesisir permanen.

Penetapan zona pembatasan pembangunan (*development restriction zone*) perlu diterapkan pada kawasan dengan tingkat kerawanan tinggi untuk membatasi pembangunan baru dan mengurangi peningkatan paparan sehingga dapat difungsikan sebagai area penyangga. Selain itu, penerapan relokasi terencana (*managed retreat*) bagi masyarakat pesisir, bangunan, dan infrastruktur vital yang berada pada kawasan sangat rentan menuju ke area yang lebih aman dan tidak rentan, serta penerapan solusi yang bersifat fleksibel dan siap beradaptasi terhadap perubahan kondisi (*no-regret options*) dapat dipertimbangkan. Kawasan yang ditinggalkan selanjutnya dapat dialihfungsikan secara bertahap menjadi kawasan lindung atau sabuk hijau pesisir guna meningkatkan perlindungan ekosistem dan ketahanan wilayah pesisir.

Sementara itu, pada wilayah dengan tingkat kerawanan yang lebih rendah, khususnya di wilayah timur-selatan Pulau Bali, integrasi solusi berbasis alam (*nature-based solutions*), seperti rehabilitasi mangrove, pemulihan sempadan pantai, dan rehabilitasi aliran sungai, dengan infrastruktur pengendali banjir dan tanggul yang ada saat ini dapat menjadi strategi adaptasi yang efektif dan berkelanjutan.

Rencana struktur ruang

Proyeksi penutupan lahan menunjukkan ekspansi kawasan terbangun hingga 2045 masih akan terkonsentrasi di sekitar PKN Sarbagita, dengan munculnya pusat-pusat pertumbuhan baru di Kabupaten Buleleng dan Jembrana, sejalan dengan arah pengembangan wilayah dalam RTRW Provinsi Bali 2023–2043. Pola perkembangan ini berpotensi meningkatkan keterpaparan aset, penduduk, dan aktivitas ekonomi terhadap genangan pesisir permanen di masa mendatang, mengingat sebagian besar infrastruktur strategis dan pendukung terkonsentrasi di kawasan-kawasan tersebut. Infrastruktur yang berpotensi terdampak mencakup jaringan jalan, ketenagalistrikan, telekomunikasi, sistem penyediaan air minum, serta fasilitas strategis seperti pelabuhan, pembangkit listrik, dan Bandara Internasional I Gusti Ngurah Rai.

Tanpa mempertimbangkan skenario proyeksi perubahan iklim dalam proses perencanaan dan pembangunan daerah, ekspansi infrastruktur di wilayah pesisir Kabupaten Badung, Buleleng, Gianyar, Jembrana, Klungkung, dan Kota Denpasar berpotensi meningkatkan gangguan terhadap layanan publik dan aktivitas ekonomi akibat genangan pesisir permanen. Karena itu, RTRW perlu memperkuat penerapan penapisan risiko iklim (*climate risk screening*) dan standar ketahanan iklim dalam perencanaan infrastruktur pesisir, termasuk dengan menyusun rencana kontingensi untuk menjaga keberlanjutan layanan publik. Infrastruktur pada zona kerawanan tinggi perlu diprioritaskan untuk memperoleh perlindungan tambahan, peninggian elevasi, penyesuaian desain konstruksi, atau, apabila memungkinkan, direlokasi secara bertahap. Sementara itu, pembangunan infrastruktur baru pada kawasan sangat rawan perlu dikendalikan secara lebih ketat guna mencegah peningkatan keterpaparan terhadap genangan pesisir permanen dan potensi kerugian di masa mendatang.

Rencana kawasan strategis

Hasil analisis menunjukkan hampir seluruh kawasan terbangun di sepanjang pesisir Pulau Bali berpotensi terpapar genangan pesisir permanen hingga 2045. Kondisi ini perlu menjadi perhatian penting, mengingat RTRW Provinsi Bali 2023–2043 menetapkan sebagian besar wilayah pesisir sebagai kawasan strategis untuk kepentingan ekonomi, fungsi, dan daya dukung lingkungan hidup, serta sosial dan budaya.

Kawasan strategis ekonomi yang terkonsentrasi di pesisir selatan dan utara Bali, termasuk kawasan pariwisata dan pusat-pusat kegiatan ekonomi, berpotensi semakin terpapar genangan pesisir permanen. Selain itu, sejumlah kawasan strategis sosial dan budaya di Kabupaten Gianyar serta kawasan strategis fungsi dan daya dukung lingkungan hidup di Kabupaten Klungkung dan Badung berada pada wilayah yang diproyeksikan akan semakin rawan terhadap genangan. Karena itu, informasi mengenai skenario proyeksi perubahan iklim perlu diintegrasikan ke dalam proses penetapan, pengelolaan, dan evaluasi kawasan strategis.

Kabupaten Jembrana dan Buleleng, yang menunjukkan tingkat kerawanan dan potensi dampak yang relatif tinggi, dapat diprioritaskan untuk memperkuat fungsi perlindungan lingkungan dan ekosistem pesisir. Sementara itu, kawasan strategis yang memiliki nilai ekonomi, sosial-budaya, dan ekologis tinggi di Kota Denpasar, serta Kabupaten Badung, Buleleng, Gianyar, Jembrana, dan Klungkung perlu menjadi prioritas perlindungan melalui pengendalian pemanfaatan ruang yang lebih ketat, pembatasan pembangunan pada area rentan, serta penguatan ekosistem pesisir sebagai pelindung alami guna mengurangi potensi dampak genangan pesisir permanen di masa mendatang.

Kesimpulan

Hasil studi ini mendukung hipotesis utama bahwa, berdasarkan pemodelan skenario iklim moderat (SSP2-4.5) dan pesimistis (SSP5-8.5), sejumlah wilayah pesisir Provinsi Bali memiliki tingkat kerawanan yang tinggi terhadap genangan pesisir permanen. Luasan dan kedalaman genangan diproyeksikan meningkat signifikan hingga 2045, dengan dipengaruhi kombinasi faktor cuaca, karakteristik fisik wilayah pesisir, dan pola tata guna lahan. Dalam dinamika tersebut, Kabupaten Jembrana menjadi wilayah dengan kedalaman genangan pesisir permanen yang tinggi sepanjang periode proyeksi, terutama pada skenario SSP5-8.5. Sebaliknya, wilayah Bali bagian timur dan tenggara, seperti Kabupaten Karangasem dan Klungkung, serta Kota Denpasar, menunjukkan kedalaman genangan yang relatif lebih rendah.

Meski demikian, arah pembangunan wilayah Provinsi Bali hingga 2043 diproyeksikan masih terkonsentrasi di kawasan Sarbagita sehingga berpotensi meningkatkan keterpaparan kawasan terbangun dan infrastruktur strategis terhadap genangan pesisir permanen. Luas bangunan yang berpotensi terpapar diperkirakan meningkat 25 persen dari sekitar 12.000 ha pada 2024 menjadi 15.000 ha pada 2045. Sejalan dengan peningkatan ini, potensi nilai kerugian akibat kerusakan bangunan yang terendam juga diproyeksikan meningkat dari Rp6 triliun ($360 juta) – Rp20 triliun ($1,21 miliar) menjadi Rp14 triliun ($840 juta) –Rp44 triliun ($2,65 miliar) dalam skenario SSP2-4.5, atau setara dengan 4,9–14,8 persen PDRB Provinsi Bali tahun 2024. Kota Denpasar dan Kabupaten Badung diproyeksikan mengalami potensi kerugian ekonomi terbesar secara absolut. Di sisi lain, Kabupaten Jembrana diperkirakan menjadi wilayah yang paling terdampak, dengan potensi kerugian pada tahun 2045 mencapai sekitar 40 persen dari PDRB wilayah.

Berdasarkan hasil analisis, strategi penataan ruang perlu difokuskan pada pengendalian keterpaparan kawasan terbangun di wilayah pesisir yang memiliki potensi kerugian tertinggi, terutama di Kota Denpasar serta Kabupaten Badung, Buleleng, dan Jembrana. Pada wilayah-wilayah tersebut, diperlukan peninjauan kembali peruntukan ruang pada kawasan transportasi, permukiman, pariwisata, pertanian, dan peruntukan industri yang berada di zona kerawanan tinggi. Langkah-langkah yang dapat dipertimbangkan termasuk relokasi terencana dan solusi yang bersifat fleksibel dan siap beradaptasi terhadap perubahan kondisi, penetapan zona pembatasan pembangunan, serta pengembangan sabuk hijau pesisir. Sementara itu, di wilayah timur dan tenggara Bali seperti Kabupaten Karangasem, Klungkung, Gianyar, dan Tabanan, pengurangan keterpaparan dapat dilakukan melalui integrasi solusi berbasis alam, seperti rehabilitasi mangrove, pemulihan sempadan pantai, dan rehabilitasi aliran sungai yang dikombinasikan dengan infrastruktur pengendali genangan.

Dari sisi struktur ruang dan kawasan strategis, RTRW perlu diperkuat melalui penerapan penapisan risiko iklim dan standar ketahanan iklim pada infrastruktur yang terkonsentrasi di kawasan Sarbagita serta pusat pertumbuhan baru di Kabupaten Buleleng dan Jembrana. Hal ini penting mengingat jaringan jalan, listrik, telekomunikasi, air minum, pelabuhan, pembangkit listrik, dan Bandara Internasional I Gusti Ngurah Rai berpotensi terdampak genangan pesisir permanen. Selain itu, informasi skenario perubahan iklim perlu diintegrasikan ke dalam pengelolaan kawasan strategis di Kota Denpasar serta Kabupaten Badung, Buleleng, Gianyar, Jembrana, dan Klungkung melalui pengendalian pemanfaatan ruang yang lebih ketat, perlindungan kawasan bernilai ekonomi, sosial-budaya, dan ekologis tinggi, serta penguatan fungsi ekosistem pesisir sebagai pelindung alami wilayah pesisir.

Limitasi studi dan saran studi lanjutan

Meski memberikan gambaran komprehensif mengenai kerawanan dan keterpaparan genangan pesisir permanen di Provinsi Bali, studi ini memiliki sejumlah keterbatasan:

- **Data kedalaman dan sebaran genangan pesisir permanen masih bergantung pada sumber data sekunder.** Dengan demikian, terdapat ketidakpastian dalam akurasi spasial.
- **Model genangan dan proyeksi lahan terbangun masih menggunakan asumsi umum**. Studi ini belum sepenuhnya mempertimbangkan dinamika sosial-ekonomi serta faktor kebijakan daerah yang dapat memengaruhi arah ekspansi pembangunan.
- **Analisis dimensi kapasitas proteksi dari infrastruktur eksisting pengendali genangan pesisir belum dimodelkan sebagai komponen tersendiri**. Hal ini dapat mencakup keberadaan tanggul, mangrove, sistem drainase, dan infrastruktur pengendali genangan lainnya.
- **Model proyeksi iklim yang digunakan dalam studi ini masih berbasis skenario iklim global**. Skenario dalam analisis ini telah dilokalkan melalui proses koreksi bias dan penyesuaian spasial, namun belum sepenuhnya menangkap variasi iklim mikro, interaksi darat-laut lokal, dan dinamika oseanografi pesisir Bali pada resolusi yang lebih rinci.
- **Studi ini belum memasukkan penurunan muka tanah (*land subsidence*) sebagai variabel eksplisit**. Dengan demikian, hasil proyeksi genangan perlu dibaca dengan mempertimbangkan bahwa pengaruh penurunan muka tanah setempat belum tercakup secara langsung. Komponen ini penting karena genangan relatif di wilayah pesisir dapat dipengaruhi kombinasi kenaikan muka air laut, penurunan muka tanah, pasang ekstrem, gelombang

badai, curah hujan, serta perubahan drainase dan tata guna lahan.

- **Estimasi kerugian ekonomi hanya mencakup kerusakan bangunan permukiman**. Estimasi ini belum memperhitungkan nilai lokasi, fungsi lahan, serta kerugian tidak langsung sehingga hasilnya cenderung tidak sebesar potensi kerugian yang sesungguhnya.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, studi ini mengusulkan beberapa catatan dan rekomendasi untuk penelitian lanjutan

- **meningkatkan resolusi dan validasi data** melalui survei lapangan, termasuk wawancara dan kuesioner kepada masyarakat, untuk menghasilkan estimasi kerugian yang lebih akurat;
- **memanfaatkan data serta indikator sosial, ekonomi, dan spasial yang lebih komprehensif** guna memperkaya analisis keterpaparan, kerentanan, dan potensi kerugian;
- **memasukkan dimensi kapasitas infrastruktur pengendali genangan pesisir permanen**, seperti tanggul, mangrove, sistem drainase, dan infrastruktur proteksi lainnya, sehingga faktor-faktor yang dapat mengurangi risiko turut diperhitungkan dalam skenario adaptasi;
- **mengintegrasikan data penurunan muka tanah** berbasis Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) atau Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR) sebagai koreksi elevasi ataupun komponen kenaikan muka air laut relatif sehingga pengaruh penurunan muka tanah terhadap genangan pesisir dapat dianalisis secara lebih terukur;
- **mengembangkan model proyeksi multiskenario** yang mengintegrasikan simulasi iklim regional dengan skenario tata ruang, perkembangan wilayah, dan strategi adaptasi lokal;
- **melakukan pengujian berbagai opsi adaptasi berbasis spasial**, seperti NbS, pengaturan zonasi, serta infrastruktur adaptif, untuk menilai efektivitasnya dalam mengurangi risiko dan potensi kerugian ekonomi; dan
- **mengembangkan pendekatan yang dapat mendukung penyusunan dan penyempurnaan RTRW Provinsi Bali** agar lebih responsif terhadap risiko perubahan iklim, sekaligus memperkuat ketahanan iklim dan keberlanjutan sosial-ekologis wilayah pesisir.

Lampiran

Lampiran A. Ringkasan arahan pemanfaatan ruang pesisir Provinsi Bali

Tabel A-1 | **Ringkasan arahan pemanfaatan ruang pesisir Provinsi Bali**

Area fokus utama	Deskripsi program	Lokasi
Transportasi laut dan pengembangan pelabuhan	Perluasan dan pengembangan pelabuhan utama untuk logistik, penumpang, dan perikanan	Benoa, Gilimanuk, Celukan Bawang, Amed, Padangbai, Nusa Penida
	Peningkatan pelabuhan perikanan dan tempat pendaratan ikan untuk mendukung rantai pasokan makanan laut	Jembrana, Buleleng, Klungkung, Karangasem, Badung, Denpasar
	Peningkatan navigasi pesisir dan aksesibilitas untuk perdagangan dan pariwisata	Kawasan pariwisata dan industri pesisir utama
Mitigasi bencana pesisir dan perlindungan lingkungan	Infrastruktur pengendalian dan perlindungan banjir pesisir	Jembrana, Tabanan, Badung, Denpasar, Gianyar, Klungkung, Karangasem, Buleleng
	Konservasi dan rehabilitasi hutan bakau untuk ketahanan iklim	Denpasar, Badung, Buleleng
	Pembatasan perubahan tata guna lahan di wilayah pesisir yang berisiko tinggi	Dataran banjir berisiko tinggi dan kawasan konservasi
Pengelolaan sumber daya perikanan dan kelautan	Pengembangan pusat-pusat penangkapan ikan dan pusat-pusat akuakultur	Jembrana, Buleleng, Klungkung, Karangasem
	Konservasi sumber daya laut dan langkah-langkah keberlanjutan stok ikan	Perairan pesisir Bali
	Penguatan industri pengolahan ikan untuk meningkatkan nilai tambah produksi	Denpasar, Jembrana, Klungkung, Karangasem, Buleleng
Pengembangan pariwisata pesisir dan kelautan	Perluasan pariwisata pantai dan pulau	Semua kabupaten pesisir dan Denpasar
	Pengembangan destinasi wisata bawah laut	Jembrana, Karangasem, Buleleng
	Promosi olahraga air dan wisata petualangan	Jembrana, Tabanan, Badung, Gianyar, Denpasar
	Peningkatan infrastruktur untuk mendukung pariwisata (jalan, transportasi, fasilitas)	Kawasan pariwisata utama
Perencanaan wilayah pesisir dan regulasi tata ruang	Peraturan zonasi untuk pariwisata, industri, dan konservasi	Semua kabupaten pesisir dan Denpasar
	Pedoman konstruksi untuk infrastruktur adaptif iklim di daerah berisiko tinggi	Kawasan rawan tsunami dan banjir
	Integrasi kearifan lokal dalam pengelolaan pesisir	Kawasan pesisir berbasis masyarakat

Sumber: Pemerintah Provinsi Bali 2023.

Lampiran B. Ringkasan ketentuan khusus untuk kawasan rawan banjir dan abrasi pantai di Provinsi Bali

Tabel B-1 | **Ringkasan ketentuan khusus untuk kawasan rawan banjir dan abrasi pantai di Provinsi Bali**

Bencana	Lokasi	Tumpang tindih dengan	Ketentuan utama
Risiko banjir tinggi	**Semua kabupaten dan kota di Bali**	▪ Badan air ▪ Hutan bakau ▪ Hutan produksi ▪ Kawasan konservasi ▪ Kawasan perlindungan setempat	▪ Pelarangan alih fungsi ruang kecuali untuk kepentingan mitigasi ▪ Pembangunan dan pengembangan peringatan, jalur evakuasi, dan tempat evakuasi sementara ▪ Pembangunan dan pengembangan infrastruktur pengendali banjir
		▪ Permukiman ▪ Pariwisata ▪ Tambak garam ▪ Perikanan ▪ Industri ▪ Pertanian ▪ Zona transportasi	▪ Pemanfaatan dataran banjir bagi ruang terbuka hijau (RTH) dan pengendalian pembangunan fasilitas umum dengan kepadatan rendah ▪ Pelarangan kegiatan untuk fasilitas umum ▪ Pengendalian permukiman di kawasan rawan banjir ▪ Perbaikan sistem drainase serta pembuatan sumur resapan dan lubang resapan biopori ▪ Pemasangan sistem peringatan dini, papan info dan rambu peringatan, jalur evakuasi, dan tempat evakuasi sementara ▪ Pengembangan infrastruktur pengendali banjir
Risiko abrasi pantai	**Jembrana, Tabanan, Badung, Denpasar, Gianyar, Klungkung, Karangasem**	▪ Badan air ▪ Hutan produksi ▪ Kawasan konservasi ▪ Kawasan perlindungan setempat	▪ Pelarangan alih fungsi ruang kecuali untuk kepentingan mitigasi ▪ Pemeliharaan struktur fisik pengaman pantai yang telah dibangun melalui pengembangan groin atau krib, pembuatan bangunan pemecah gelombang sejajar pantai *(offshore breakwaters)*, penguatan tebing pantai dengan membangun tembok laut *(seawall)* atau revetment; dan penambahan suplai sedimen ke pantai *(sand nourishment)* ▪ Pemasangan pemecah gelombang dan/atau penahan gelombang ▪ Pengembangan hutan bakau/sabuk hijau sebagai pelindung alami ▪ Pemasangan sistem peringatan dini, papan informasi, rambu bahaya, serta jalur evakuasi
		▪ Pariwisata ▪ Tambak garam ▪ Perikanan ▪ Permukiman ▪ Industri ▪ Pertanian ▪ Zona transportasi	▪ Pemeliharaan struktur fisik pengaman pantai yang telah dibangun melalui pengembangan groin atau krib, pembuatan bangunan pemecah gelombang sejajar pantai, penguatan tebing pantai dengan membangun tembok laut atau *revetment*; dan penambahan suplai sedimen ke pantai ▪ Pengendalian ketat untuk kegiatan hunian, bangunan, infrastruktur penting, vital, dan strategis ▪ Pemanfaatan ruang wajib melakukan kajian pengurangan tingkat abrasi dan analisis risiko bencana ▪ Pemasangan pemecah gelombang dan/atau penahan gelombang ▪ Pengembangan hutan bakau/sabuk hijau sebagai pelindung alam ▪ Pemasangan sistem peringatan dini, papan informasi, rambu bahaya, serta jalur evakuasi

Sumber: Pemerintah Provinsi Bali 2023.

Lampiran C. Pemanfaatan algoritma Random Forest untuk pemodelan kerawanan genangan pesisir permanen

Algoritma Random Forest merupakan metode *ensemble* yang menggabungkan sejumlah pohon keputusan (*decision tree*) untuk meningkatkan akurasi prediksi, khususnya pada dataset yang kompleks, nonlinier, dan multivariat. Secara matematis, prediksi Random Forest untuk suatu titik x dapat dinyatakan sebagai rata-rata dari prediksi masing-masing *tree* (Breiman 2001; Breiman et al. 2003):

$$\hat{y} = \frac{I}{T} \sum_{t=1}^{T} h_t\left(x\right)$$

di mana T adalah jumlah *tree* dalam *forest*, ht(x) merupakan prediksi dari *tree* ke-t untuk input x. Selanjutnya, dataset dibagi menjadi data latih dan data uji menggunakan *stratified sampling* untuk menjaga kelas dan mengurangi bias model. Performa model dievalusi dengan menggunakan sebagai berikut:

$$\text{True Positive Rate}\left(\text{TPR}\right) = \frac{\text{TP}}{\text{TP}+\text{FN}}$$

$$\text{False Positive Rate}\left(\text{FPR}\right) = \frac{\text{FP}}{\text{FP}+\text{TN}}$$

Tahap berikutnya adalah melakukan uji akurasi menggunakan kurva ROC untuk menilai kemampuan model dalam membedakan antara kelas wilayah tergenang dan tidak tergenang (Fawcett 2006; Muschelli 2020; dan Sakti et al. 2023). Luas di bawah kurva ROC (area *under the curve*; AUC) secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut:

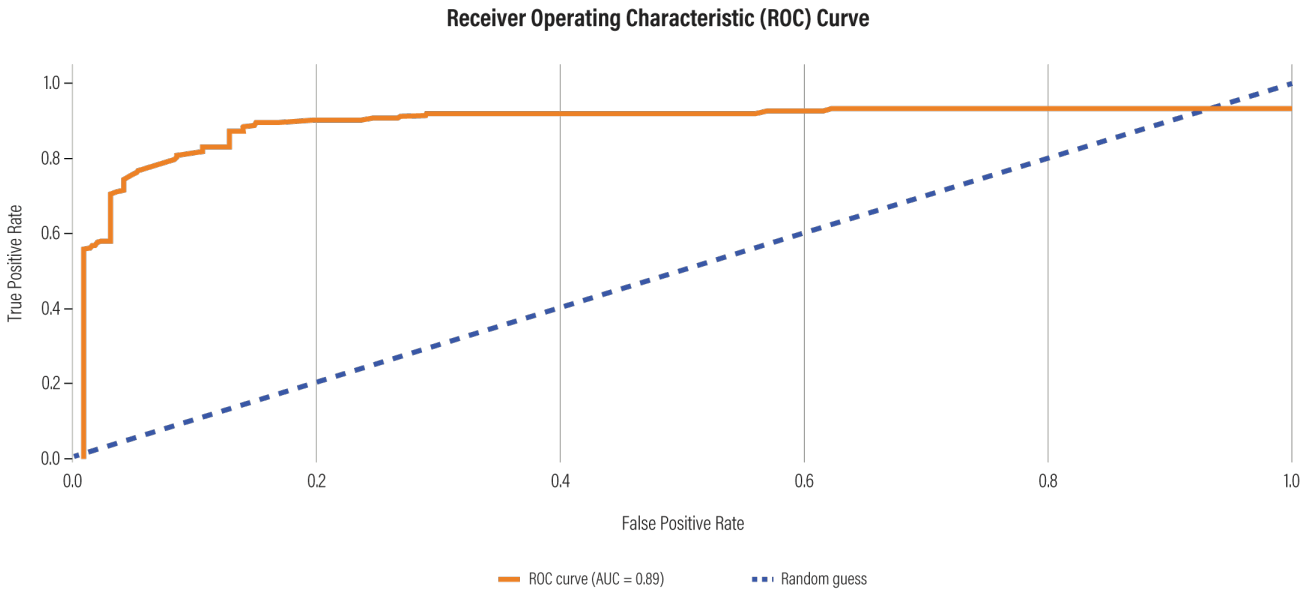
$$\text{AUC} = \int_0^1 \text{ROC}\left(t\right) dt$$

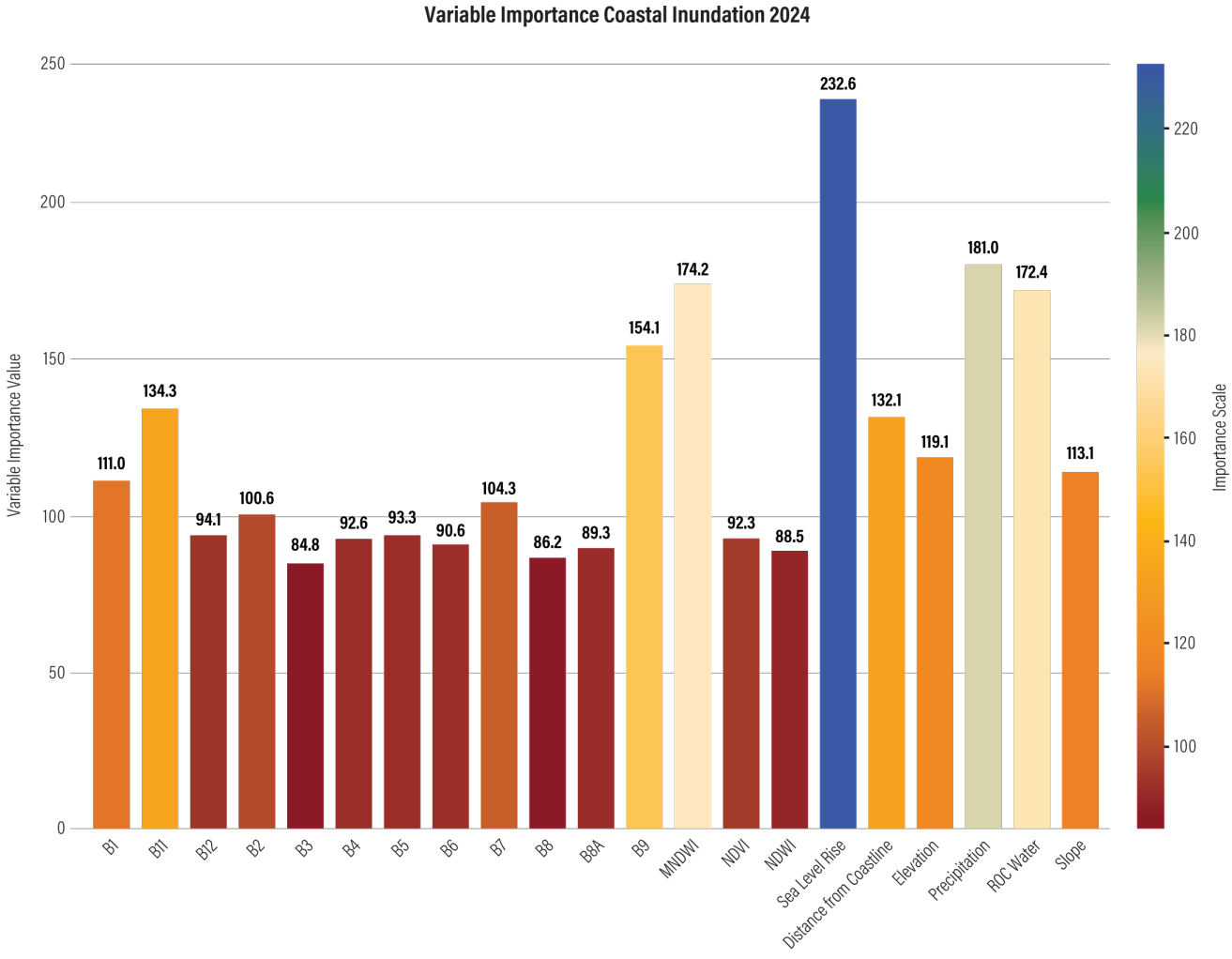
Lampiran D. Evaluasi model kerawanan dan kedalaman genangan pesisir permanen

Evaluasi pemodelan kerawanan genangan pesisir permanen di Bali tahun 2024 dilakukan menggunakan pendekatan kurva AUC-ROC dan analisis *variable importance*. Nilai AUC sebesar 0,89 menunjukkan kinerja klasifikasi yang sangat baik, dengan kemampuan prediktif mencapai 89 persen. Hasil ini menegaskan bahwa model mampu membedakan wilayah terdampak dan tidak terdampak secara andal, dengan keseimbangan yang kuat antara sensitivitas dan spesifisitas, serta jauh melampaui ambang klasifikasi acak (AUC = 0,5).

Analisis *variable importance* memperlihatkan bahwa kenaikan muka laut (232,6) merupakan faktor utama dalam menentukan tingkat kerentanan, diikuti oleh curah hujan (181,0), laju perubahan indeks air permukaan atau ROC water (172,4), dan jarak terhadap garis pantai (132,1). Faktor topografi, yaitu elevasi (119,1) dan kemiringan lereng (113,1), turut berkontribusi signifikan dalam memengaruhi akumulasi genangan. Selain itu, indeks berbasis penginderaan jauh seperti NDWI (92,3) dan MNDWI (174,2), serta parameter spektral Sentinel-2 (B9: 145,1; B11: 134,3; B1: 111,0), menunjukkan relevansi tinggi dalam mendeteksi kondisi hidrologis dan vegetasi.

Gambar D-1 | **Hasil evaluasi pemodelan berdasarkan AUC-ROC dan *variable importance***





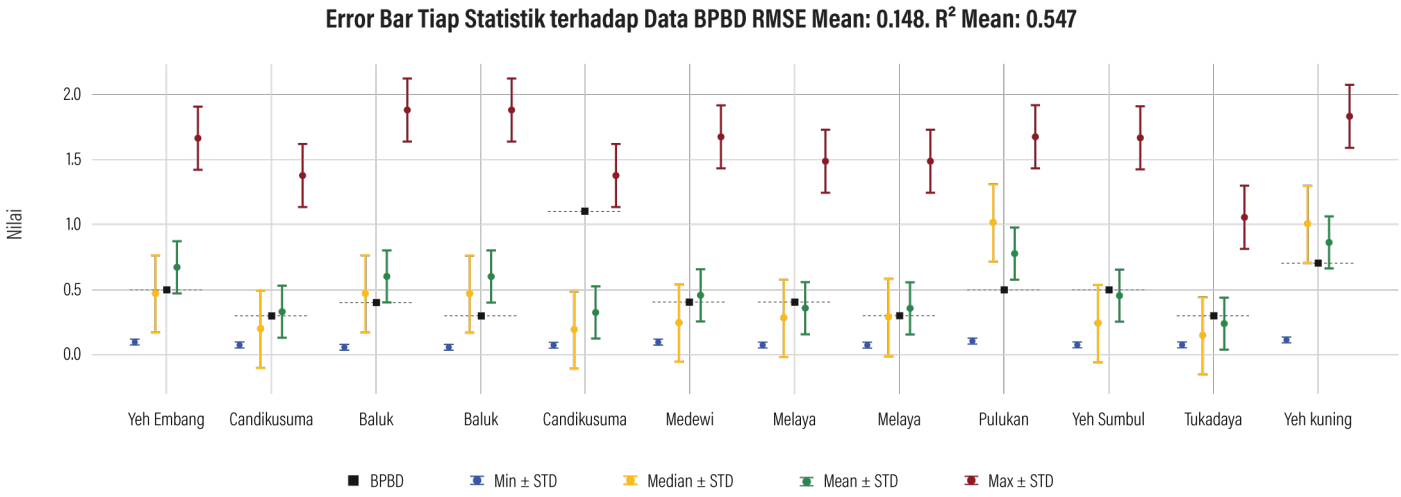
Sumber: Hasil analisis penulis(2025).

Hasil evaluasi model kerentanan genangan pesisir permanen di Bali tahun 2024 menunjukkan nilai *mean absolute error* (MAE) sebesar 0,12 dan *root mean square error* (RMSE) sebesar 0,15. Nilai ini mengindikasikan tingkat akurasi yang cukup baik, dengan deviasi prediksi terhadap data observasi BPBD relatif kecil. Sebagian besar selisih berada pada kisaran 0,18 sehingga dapat disimpulkan bahwa model memiliki stabilitas yang tinggi serta mampu menggambarkan kondisi lapangan dengan konsistensi yang memadai.

Pada sejumlah desa, hasil prediksi menunjukkan kesesuaian yang cukup baik dengan data observasi. Desa Yeh Embang mencatat rata-rata prediksi 0,675 dibandingkan dengan data observasi 0,5; Medewi menunjukkan nilai 0,458, berdekatan dengan 0,4; sementara Melaya memiliki rata-rata 0,355, yang mendekati kisaran observasi 0,3–0,4. Desa Yeh Sumbul dengan rata-rata 0,453 juga berada sangat dekat dengan nilai observasi 0,5. Konsistensi ini menegaskan bahwa model bekerja efektif pada wilayah dengan kondisi hidrologi dan topografi yang relatif seragam.

Sebaliknya, terdapat desa dengan deviasi prediksi lebih besar. Desa Candikusuma memiliki rata-rata prediksi 0,33, mendekati nilai 0,3, tetapi salah satu titik validasi menunjukkan observasi 1,1, di mana model cenderung meremehkan pada kondisi ekstrem. Desa Baluk mencatat prediksi rata-rata 0,601, lebih tinggi daripada observasi yang berkisar 0,3–0,4. Desa Pulukan juga menunjukkan kecenderungan lebih tinggi dengan rata-rata prediksi 0,782, sementara observasi tercatat 0,5. Perbedaan ini kemungkinan dipengaruhi oleh variasi kondisi lokal seperti topografi mikro, keterbatasan data input, dan dinamika lingkungan yang tidak sepenuhnya tercakup dalam parameter model.

Gambar D-2 | **Hasil evaluasi pemodelan berdasarkan AUC-ROC dan variable importance**



Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Lampiran E. Daftar instansi peserta FGD

- Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (Bappeda) Provinsi Bali
- Dinas Pekerjaan Umum, Penataan Ruang, Perumahan dan Kawasan Permukiman Provinsi Bali
- Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Bali
- Dinas Kelautan dan Perikanan Provinsi Bali
- Dinas Pariwisata Provinsi Bali
- Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Provinsi Bali
- Balai Besar Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Wilayah III Denpasar
- Balai Besar Wilayah Sungai Bali-Penida
- BPBD Kabupaten Badung
- BPBD Kabupaten Bangli
- BPBD Kabupaten Buleleng
- BPBD Kabupaten Gianyar
- BPBD Kabupaten Jembrana
- BPBD Kabupaten Karangasem
- BPBD Kabupaten Klungkung
- BPBD Kabupaten Tabanan
- BPBD Kota Denpasar

Lampiran F. Pemanfaatan algoritma Cellular Automata untuk pemodelan klasifikasi penutupan lahan

Dalam penyusunan model proyeksi perubahan lahan terbangun digunakan model Cellular Automata, di mana status setiap grid S_i^t+1 pada waktu t + 1 ditentukan oleh kondisi saat ini S_i^t, keadaan sel tetangga N_i^t, dan variabel prediktor P_i secara persamaan:

$$S_i^{t+1} = f(S_i^t, N_i^t, P_i)$$

Secara probabilistik, kemungkinan transisi sel ke kelas lahan tertentu dirumuskan sebagai berikut:

$$P\left(S_i^{t+1} = k \middle| S_i^t, N_i^t, P_i\right) = \frac{\sum_{j \in N_i} W_{ij} I\left(S_j^t = k\right) + \beta P_i^k}{\sum_{k=1}^{K}\left(\sum_{j \in N_i} W_{ij} I\left(S_j^t = k\right) + \beta P_i^k\right)}$$

Dalam persamaan tersebut, k merupakan kelas lahan target, misalnya lahan terbangun. Parameter Wij adalah bobot yang menggambarkan pengaruh sel tetangga j terhadap sel i. Fungsi indikator $I(S_j^t=k)$ bernilai 1 jika sel tetangga j memiliki kelas k, dan 0 jika tidak. Parameter ß merepresentasikan bobot pengaruh variabel prediktor Pi terhadap kemungkinan perubahan kelas sel. Adapun K menyatakan jumlah total kelas lahan yang ada dalam model. Variabel prediktor yang digunakan meliputi ketinggian wilayah, kemiringan wilayah, jarak ke jalan utama, dan *urban sprawl*.

Penilaian akurasi model dilakukan menggunakan sejumlah metrik statistik, termasuk *overall kappa*, *local kappa*, dan *kappa histogram*. Ketiga koefisien ini mencerminkan tingkat kesesuaian antara peta simulasi dan peta aktual, dengan nilai berkisar antara 0 hingga 1. Semakin mendekati 1, semakin tinggi akurasi spasial dari hasil simulasi. Secara matematis, nilai kappa dihitung dari matriks kesesuaian menggunakan persamaan berikut (Senthilkumar et al. 2025):

$$P(A) = \sum_{i=1}^{c} p_{ij}$$

$$P(E) = \sum_{i=1}^{c} p_{it} \cdot p_{tj}$$

$$P_{\max} = \min(p_{it} p_{tj})$$

$$K_O = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)}$$

$$K_{\text{Loc}} = \frac{P(A) - P(E)}{P_{\max} - P(E)}$$

$$K_{\text{Hist}} = \frac{P_{\max} - P(E)}{1 - P(E)}$$

Lampiran G. Asumsi nilai kerusakan bangunan

Nilai kerugian yang digunakan dalam studi ini merujuk pada penelitian yang dilakukan Wijayanti et al. (2017) yang berlandaskan peristiwa banjir di Jakarta pada 17–19 Januari 2013. Penelitian tersebut membandingkan estimasi kerugian sektor permukiman berdasarkan dua pendekatan. Pendekatan pertama dilakukan melalui survei terhadap 300 rumah tangga terdampak dengan hasil perhitungan model kerugian banjir. Sementara pendekatan kedua dilakukan melalui penilaian ahli melalui sebuah lokakarya ahli yang melibatkan perwakilan dari lembaga pemerintah, organisasi masyarakat, dan sektor swasta untuk memperkirakan tingkat kerusakan maksimum yang digunakan dalam model tersebut.

Berdasarkan hasil survei rumah tangga, diketahui kerugian aktual yang dialami masyarakat mencapai sekitar $308 per rumah tangga. Dengan asumsi rata-rata luas bangunan yang ditempati sebesar 60 m^2, nilai tersebut setara dengan sekitar $5,13/$m^2$. Sementara itu, berdasarkan pendapat para ahli, nilai kerusakan maksimum diperkirakan mencapai $155.400 per ha atau sekitar $15,54/$m^2$.

Perbedaan antara nilai aktual dan perkiraan ini juga ditemukan dalam studi-studi sebelumnya. Sebagai contoh, Jongman et al. (2012) menunjukkan bahwa kerugian banjir yang dilaporkan lebih tinggi dibandingkan dengan estimasi kerugian banjir yang dihasilkan dari tujuh model kerusakan banjir. Sementara itu, Chatterton et al. (2014) menemukan bahwa estimasi kerugian yang dihasilkan oleh dua model kerusakan banjir berbeda untuk sektor perumahan dan komersial di Inggris dapat mencapai 5–6 kali lipat. Perbedaan ini dapat disebabkan perbedaan metode dalam pengumpulan data kerusakan banjir dan dalam penetapan batas maksimal kerusakan banjir per objek, perbedaan tingkat analisis spasial, serta ketidakpastian dalam model kerusakan bangunan (Wijayanti et al. 2017).

Tabel G-1 | **Rata-rata kerugian banjir aktual per rumah tangga untuk peristiwa banjir di Jakarta pada 17–19 Januari 2013**

Kerugian	Nilai ($)	Persentase (%)
Langsung		
Kerusakan struktur	43	14
Kerusakan isi bangunan	193	63
Tidak langsung		
Biaya pembersihan	25	8
Kerugian pendapatan	30	10
Biaya evakuasi	12	4
Biaya kesehatan	5	2
Total	**308**	**100**

Sumber: Wijayanti et al. 2017.

Lampiran H. Tingkat keterpaparan penduduk terhadap genangan pesisir permanen di tahun 2024 dan 2045

Tabel H-1 | **Keterkaitan tingkat kerentanan genangan pesisir permanen dengan demografi di tahun 2024**

Kabupaten/kecamatan yang terpapar	Luas wilayah (km^2)	Rata-rata probabilitas kejadian genangan pesisir permanen	Luas probabilitas kerawanan genangan pesisir permanen (km^2)	Rata-rata kedalaman genangan pesisir permanen (m)	Fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Total penduduk (jiwa)	Total penduduk x fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Kepadatan penduduk (jiwa/km^2)	Kepadatan penduduk genangan pesisir permanen (jiwa/km^2)
Badung	**398,75**	**-**	**51**			**404.600**	**105.619**	**-**	**2.087**
Kuta	22,19	0,42	20	0,72	0,92	58.000	53.138	3.310	2.614
Kuta Selatan	101,45	0,42	16	0,65	0,15	122.760	18.768	1.213	1.210
Kuta Utara	34,72	0,2	9,99	0,18	0,29	89.990	25.893	2.657	2.592
Mengwi	81,82	0,22	4,78	0,17	0,06	133.850	7.820	1.632	1.636
Buleleng	**1.322,68**	**-**	**106**			**775.776**	**86.211**	**-**	**813**
Banjar	137,85	0,85	7,36	0,95	0,05	88.034	4.700	510	639
Buleleng	46,25	0,82	13	0,84	0,27	155.561	42.683	3.314	3.363
Gerokgak	405,74	0,77	54	0,79	0,13	103.158	13.783	289	254
Kubutambahan	118,47	0,72	5,63	0,53	0,05	74.411	3.536	629	628
Sawan	91,29	0,72	6,94	0,81	0,08	85.566	6.505	925	937
Seririt	123,1	0,85	13	0,84	0,10	94.880	9.912	849	771
Sukasada	160,96	0,85	0,21	0,41	0,00	95.223	124	551	592
Tejakula	98,35	0,72	6,19	0,32	0,06	78.943	4,969	804	803
Gianyar	**368**	**-**	**10**			**283.639**	**20.265**	**-**	**1.950**
Blahbatuh	39,7	0,64	2,47	0,69	0,06	73.673	4.584	1.856	1.856
Gianyar	50,59	0,63	1,66	0,81	0,03	101.383	3.327	2.005	2.004
Sukawati	55,02	0,44	6,26	0,36	0,11	108.583	12.354	1.974	1.974
Jembrana	**849,13**	**-**	**109**			**329.353**	**66.271**	**-**	**609**
Jembrana	89,58	0,79	25	0,99	0,28	63.982	17.799	714	714
Melaya	229,62	0,61	15	0,67	0,06	64.183	4.078	280	280
Mendoyo	297,41	0,67	26	0,69	0,09	70.003	6.129	235	235
Negara	97,56	0,72	36	0,74	0,36	100.074	36.476	1.026	1.026
Pekutatan	134,96	0,74	7,76	0,59	0,06	31.111	1.789	231	231

Tabel H-1 | **Keterkaitan tingkat kerentanan genangan pesisir permanen dengan demografi di tahun 2024 (lanjutan)**

Kabupaten/kecamatan yang terpapar	Luas wilayah (km^2)	Rata-rata probabilitas kejadian genangan pesisir permanen	Luas probabilitas kerawanan genangan pesisir permanen (km^2)	Rata-rata kedalaman genangan pesisir permanen (m)	Fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Total penduduk (jiwa)	Total penduduk x fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Kepadatan penduduk (jiwa/km^2)	Kepadatan penduduk genangan pesisir permanen (jiwa/km^2)
Karangasem	**839,317**	**-**	**18**			**345.925**	**12.192**	**-**	**678**
Abang	131,839	0,75	3,56	0,6	0,03	88.829	2.399	679	674
Karangasem	92,2	0,68	2,78	0,48	0,03	107.015	3.227	1.159	1.161
Kubu	231.148	0,72	6,09	0,47	0,03	91.935	2.422	401	398
Manggis	77.727	0,59	5,54	0,42	0,07	58.146	4.144	756	748
Klungkung	**315**	**-**	**26**			**223.730**	**26.578**	**-**	**1.012**
Banjarangkan	45,73	0,59	1,83	0,55	0,04	47.140	1.886	1.031	1.031
Dawan	37,38	0,54	8,92	0,62	0,24	43.700	10.428	1.169	1.169
Klungkung	29,05	0,6	4,65	0,6	0,16	67.070	10.736	2.309	2.309
Nusa Penida	202,84	0,4	11	0,4	0,05	65.820	3.527	325	324
Kota Denpasar	**125,98**	**-**	**66**			**501.127**	**302.376**	**-**	**4.609**
Denpasar Barat	23,46	0,2	11	0,19	0,47	191.337	89.878	8.156	8.156
Denpasar Selatan	49,98	0,42	46	0,68	0,93	187.111	173.372	3.750	3.744
Denpasar Timur	25,93	0,39	8,27	0,27	0,32	122.679	39.127	4.731	4.731
Tabanan	**839,33**	**-**	**13**			**280.320**	**12.229**	**-**	**914**
Kediri	53,6	0,28	3,06	0,2	0,06	90.260	5.153	1.684	1.684
Kerambitan	42,39	0,27	3,19	0,21	0,08	43.520	3.275	1.026	1.027
Selemadeg	52,05	0,46	1,24	0,24	0,02	22.380	533	430	430
Selemadeg Barat	120,15	0,66	1,64	0,4	0,01	22.230	303	185	185
Selemadeg Timur	54,78	0,37	3,25	0,24	0,06	24.620	1.461	449	449
Tabanan	51,4	0,24	1	0,15	0,02	77.310	1.504	1.504	1.504

Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Tabel H-2 | **Keterkaitan tingkat kerentanan genangan pesisir permanen dengan demografi di tahun 2045 berdasarkan skenario SSP2-4.5**

Kabupaten/kecamatan yang terpapar	Luas wilayah (km^2)	Rata-rata probabilitas kejadian genangan pesisir permanen	Luas probabilitas kerawanan genangan pesisir permanen (km^2)	Rata-rata kedalaman genangan pesisir permanen (m)	Fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Laju pertumbuhan penduduk (%/tahun)	Proyeksi jumlah penduduk (jiwa)	Total penduduk x fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Kepadatan penduduk (jiwa/km^2)	Kepadatan penduduk genangan pesisir permanen (jiwa/km^2)
Badung	**398,75**	**-**				**0,91**	**481.917**	**119.555**	**-**	
Kuta	22,19	0,49	20,02	0,82	0,90		69.083	62.174	3.113	3.105
Kuta Selatan	101,45	0,51	15,06	0,78	0,14	**0,91**	146,219	20.470	1.441	1.359
Kuta Utara	34,72	0,22	9,53	0,20	0,27		107.187	28.940	3.087	3.036
Mengwi	81,82	0,23	4,51	0,17	0,05		159.428	7.971	1.948	1.767
Buleleng	**1.322,68**	**-**				**0,15**	**799.489**	**80.658**	**-**	
Banjar	137,85	0,83	6,72	0,93	0,04		90.087	3.603	653	536
Buleleng	46,25	0,87	12,4	0,85	0,26		160.461	41.719	3.469	3.364
Gerokgak	405,74	0,95	57,69	0,81	0,14		106.407	14.896	262	258
Kubutambahan	118,47	0,76	5,47	0,56	0,04	**0,15**	76.754	3.070	647	561
Sawan	91,29	0,75	6,72	0,84	0,07		88.261	6.178	966	919
Seririt	123,1	0,83	12,66	0,82	0,10		97.868	9.786	795	772
Sukasada	160,96	0,87	0,19	0,43	0,001		98.222	98	610	515
Tejakula	98,35	0,79	5,90	0,34	0,05		81,429	4.071	827	690
Gianyar	**368**	**-**				**0,57**	**337.276**	**19.687**	**-**	
Blahbatuh	39,7	0,63	2,35	0,71	0,05		82.491	4.124	2.077	1.754
Gianyar	50,59	0,62	1,58	0,78	0,03	**0,57**	113.518	3.405	2.243	2.155
Sukawati	55,02	0,38	5,98	0,35	0,10		121.580	12.158	2.209	2.033
Jembrana	**849,13**	**-**				**0,66**	**374.998**	**70.940**	**-**	
Jembrana	89,58	0,82	24,42	1	0,27		72.849	19.669	813	805
Melaya	229,62	0,65	13,83	0,75	0,06		73.078	4.384	318	316
Mendoyo	297,41	0,75	24,85	0,77	0,08	**0,66**	79.705	6.376	267	256
Negara	97,56	0,77	34,03	0,75	0,34		113.944	38.740	1.167	1.138
Pekutatan	134,96	0,76	7,50	0,59	0,05		35.422	1.771	262	236

Tabel H-2 | **Keterkaitan tingkat kerentanan genangan pesisir permanen dengan demografi di tahun 2045 berdasarkan skenario SSP2-4.5 (lanjutan)**

Kabupaten/kecamatan yang terpa-par	Luas wilayah (km^2)	Rata-rata probabilitas kejadian genangan pesisir permanen	Luas probabilitas kerawanan genangan pesisir permanen (km^2)	Rata-rata kedalaman genangan pesisir permanen (m)	Fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Laju pertumbuhan penduduk (%/tahun)	Proyeksi jumlah penduduk (jiwa)	Total penduduk x fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Kepadatan penduduk (jiwa/km^2)	Kepadatan penduduk genangan pesisir permanen (jiwa/km^2)
Karangasem	**839.317**	**-**				**0,50**	**382.246**	**10.214**	**-**	
Abang	131,839	0,78	2,99	0,63	0,02	**0,50**	98.156	1.963	744	656
Karangasem	92,2	0,66	2,50	0,48	0,02		118.251	2.365	1.282	946
Kubu	231.148	0,80	5,45	0,52	0,02		101.588	2.031	439	372
Manggis	77.727	0,54	5,37	0,39	0,06		64.251	3.855	826	717
Klungkung	**315**	**-**				**0,33**	**239.232**	**26.535**	**-**	
Banjarangkan	45,73	0,54	1,75	0,55	0,03	**0,33**	50.406	1.512	1.102	864
Dawan	37,38	0,48	8,75	0,59	0,23		46.728	10.747	1.250	1.228
Klungkung	29,05	0,54	4,49	0,56	0,15		71.717	10.757	2.468	2.395
Nusa Penida	202,84	0,36	10,63	0,37	0,05		70.381	3.519	346	331
Kota Denpasar	**125,98**	**-**				**0,92**	**597.943**	**350.686**	**-**	
Denpasar Barat	23,46	0,22	11,2	0,22	0,47	**0,92**	228.303	107.302	9.731	9.580
Denpasar Selatan	49,98	0,49	45,43	0,79	0,90		223.260	200.934	4.466	4.422
Denpasar Timur	25,93	0,34	7,58	0,25	0,29		146.380	42.450	5.645	4.281
Tabanan	**839,33**	**-**				**0,32**	**299.154**	**10.215**	**-**	
Kediri	53,6	0,26	2,91	0,19	0,05	**0,32**	96.325	4.816	1.797	1.654
Kerambitan	42,39	0,28	2,89	0,21	0,06		46.444	2.786	1.095	964
Selemadeg	52,05	0,41	1,03	0,21	0,01		23.883	238	458	231
Selemadeg Barat	120,15	0,67	1,57	0,42	0,01		23.723	237	197	150
Selemadeg Timur	54,78	0,33	2,97	0,21	0,05		26.274	1.313	479	442
Tabanan	51,4	0,23	0,76	0,14	0,01		82.505	825	1.605	1.085

Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Tabel H-3 | **Keterkaitan tingkat kerentanan genangan pesisir permanen dengan demografi di tahun 2045 berdasarkan skenario SSP5-8.5**

Kabupaten/kecamatan yang terpa-par	Luas wilayah (km^2)	Rata-rata probabilitas kejadian genangan pesisir permanen	Luas probabilitas kerawanan genangan pesisir permanen (km^2)	Rata-rata kedalaman genangan pesisir permanen (m)	Fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Laju pertumbuhan penduduk (%/tahun)	Proyeksi jumlah penduduk (jiwa)	Total penduduk x fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Kepadatan penduduk (jiwa/km^2)	Kepadatan penduduk genangan pesisir permanen (jiwa/km^2)
Badung	**398,75**	**-**				**0,91**	**481.917**	**123.683**	**-**	
Kuta	22,19	0,37	20,02	0,64	0,90		69.083	62.174	3.113	3.105
Kuta Selatan	101,45	0,41	15,22	0,63	0,15	**0,91**	146,219	21.932	1.441	1.440
Kuta Utara	34,72	0,19	9,55	0,17	0,28		107.187	30.012	3.087	3.142
Mengwi	81,82	0,20	4,69	0,15	0,06		159.428	9.565	1.948	2.039
Buleleng	**1.322,68**	**-**				**0,15**	**799.489**	**85.444**	**-**	
Banjar	137,85	0,85	7,09	0,96	0,05		90.087	4.504	653	635
Buleleng	46,25	0,84	12,47	0,85	0,27		160.461	43.234	3.469	3.474
Gerokgak	405,74	0,77	53,15	0,80	0,13		106.407	13.832	262	260
Kubutambahan	118,47	0,78	5,42	0,58	0,05	**0,15**	76.754	3.837	647	707
Sawan	91,29	0,77	6,77	0,86	0,07		88.261	6.178	966	912
Seririt	123,1	0,86	12,51	0,84	0,10		97.868	8.786	795	702
Sukasada	160,96	0,90	0,20	0,45	0,001		98.222	98	610	490
Tejakula	98,35	0,80	5,93	0,35	0,06		81,429	4.885	827	823
Gianyar	**368**	**-**				**0,57**	**317.589**	**21.727**	**-**	
Blahbatuh	39,7	0,56	2,40	0,64	0,06		82.491	4.949	2.077	2.062
Gianyar	50,59	0,55	1,63	0,72	0,03	**0,57**	113.518	3.405	2.243	2.088
Sukawati	55,02	0,35	6,09	0,31	0,11		121.580	13.373	2.209	2.195
Jembrana	**849,13**	**-**				**0,66**	**374.998**	**72.434**	**-**	
Jembrana	89,58	0,78	24,42	0,98	0,27		72.849	19.669	813	805
Melaya	229,62	0,60	13,94	0,69	0,06		73.078	4.384	318	314
Mendoyo	297,41	0,70	24,99	0,72	0,08	**0,66**	79.705	6.376	267	255
Negara	97,56	0,70	34,41	0,72	0,35		113.944	39.880	1.167	1.158
Pekutatan	134,96	0,72	7,56	0,57	0,06		35.422	2.125	262	281

Tabel H-3 | **Keterkaitan tingkat kerentanan genangan pesisir permanen dengan demografi di tahun 2045 berdasarkan skenario SSP5-8.5 (lanjutan)**

Kabupaten/kecamatan yang terpa-par	Luas wilayah (km^2)	Rata-rata probabilitas kejadian genangan pesisir permanen	Luas probabilitas kerawanan genangan pesisir permanen (km^2)	Rata-rata kedalaman genangan pesisir permanen (m)	Fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Laju pertumbuhan penduduk (%/tahun)	Proyeksi jumlah penduduk (jiwa)	Total penduduk x fraksi wilayah rawan genangan pesisir permanen	Kepadatan penduduk (jiwa/km^2)	Kepadatan penduduk genangan pesisir permanen (jiwa/km^2)
Karangasem	**839.317**	**-**				**0,50**	**382.246**	**14.035**	**-**	
Abang	131,839	0,80	3,5	0,64	0,03	**0,50**	98.156	2.944	744	841
Karangasem	92,2	0,73	2,74	0,54	0,03		118.251	3.547	1.282	1.294
Kubu	231.148	0,82	5,97	0,54	0,03		101.588	3.047	439	510
Manggis	77.727	0,58	5,37	0,41	0,07		64.251	4.497	826	837
Klungkung	**315**	**-**				**0,33**	**239.232**	**27.039**	**-**	
Banjarangkan	45,73	0,50	1,75	0,52	0,04	**0,33**	50.406	2.016	1.102	1.152
Dawan	37,38	0,46	8,75	0,55	0,23		46.728	10.747	1.250	1.228
Klungkung	29,05	0,50	4,50	0,52	0,15		71.717	10.757	2.468	2.390
Nusa Penida	202,84	0,34	10,66	0,35	0,05		70.381	3.519	346	330
Kota Denpasar	**125,98**	**-**				**0,92**	**597.943**	**358.948**	**-**	
Denpasar Barat	23,46	0,24	11,5	0,23	0,49	**0,92**	228.303	111.868	9.731	9.727
Denpasar Selatan	49,98	0,40	45,43	0,64	0,91		223.260	203.166	4.466	4.472
Denpasar Timur	25,93	0,30	7,67	0,22	0,30		146.380	43.914	5.645	5.725
Tabanan	**839,33**	**-**				**0,32**	**299.154**	**11.744**	**-**	
Kediri	53,6	0,24	2,94	0,17	0,05	**0,32**	96.325	4.816	1.797	1.638
Kerambitan	42,39	0,24	3,09	0,18	0,07		46.444	3.251	1.095	1.052
Selemadeg	52,05	0,37	1,22	0,20	0,02		23.883	477	458	390
Selemadeg Barat	120,15	0,57	1,58	0,36	0,01		23.723	237	197	150
Selemadeg Timur	54,78	0,29	2,99	0,19	0,05		26.274	1.313	479	439
Tabanan	51,4	0,20	0,93	0,12	0,02		82.505	1.650	1.605	1.774

Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Lampiran I. Estimasi kerugian kerusakan bangunan akibat genangan pesisir permanen

Tabel I-1 | **Estimasi kerugian minimal dari kerusakan bangunan akibat genangan pesisir permanen di Provinsi Bali tahun 2024, 2035, dan 2045**

Kabupaten/kota	2024 (Rp Juta)	2035 (Rp Juta)		2045 (Rp Juta)	
	Eksisting	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Kota Denpasar	2.698.062	3.912.741	3.716.101	4.897.785	3.324.192
Kabupaten Badung	1.171.756	2.404.796	2.434.972	3.288.473	3.330.612
Kabupaten Buleleng	1.141.898	1.972.959	1.894.484	2.799.149	2.852.199
Kabupaten Jembrana	1.126.167	1.742.030	1.660.575	2.357.401	2.385.737
Kabupaten Klungkung	285.824	307.745	306.591	442.165	453.828
Kabupaten Karangasem	236.804	278.822	273.359	407.379	423.322
Kabupaten Gianyar	166.695	245.547	242.367	338.068	344.134
Kabupaten Tabanan	27.622	40.940	41.300	65.356	67.953
Kabupaten Bangli	407	927	1.035	925	1.057
Provinsi Bali	**6.855.236**	**10.906.507**	**10.570.783**	**14.596.702**	**13.183.035**

Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Tabel I-2 | **Estimasi kerugian maksimal dari kerusakan bangunan akibat genangan pesisir permanen di Provinsi Bali tahun 2024, 2035, dan 2045**

Kabupaten/kota	2024 (Rp Juta)	2035 (Rp Juta)		2045 (Rp Juta)	
	Eksisting	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Kota Denpasar	8.168.301	11.162.297	11.250.381	14.827.894	10.063.890
Kabupaten Badung	3.547.456	5.628.474	5.735.493	8.474.339	8.634.946
Kabupaten Buleleng	3.457.062	7.280.446	7.371.802	9.955.750	10.083.327
Kabupaten Jembrana	3.409.435	4.969.676	5.027.339	7.136.960	7.222.745
Kabupaten Klungkung	865.324	904.285	928.195	1.338.642	1.373.950
Kabupaten Karangasem	716.916	721.521	733.758	1.023.491	1.041.855
Kabupaten Gianyar	504.664	795.426	827.587	1.233.326	1.041.855
Kabupaten Tabanan	83.626	120.300	125.036	197.865	205.726
Kabupaten Bangli	1.233	2.645	3.133	2.801	3.201
Provinsi Bali	**20.754.015**	**31.585.070**	**32.002.723**	**44.191.067**	**39.911.235**

Sumber: Hasil analisis penulis (2025).

Daftar singkatan

ACCESS-CM2	Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model 2
ADB	Asian Development Bank
ATR/BPN	Agraria dan Tata Ruang/Badan Pertanahan Nasional
AUC	*area under the curve*
Bappenas	Badan Perencanaan Pembangunan Nasional
BIG	Badan Informasi Geospasial
BMKG	Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika
BNPB	Badan Nasional Penanggulangan Bencana
BPBD	Badan Penanggulangan Bencana Daerah
BPS	Badan Pusat Statistik
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
DEM	*digital elevation model*
EVI	Enhanced Vegetation Index
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KEK	Kawasan Ekonomi Khusus
KSN	Kawasan Strategis Nasional
KSP	Kawasan Strategis Provinsi
KSPN	Kawasan Strategis Pariwisata Nasional
NbS	*nature-based solutions*
NDBI	Normalized Difference Built-up Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
MAE	*mean absolute error*
PDB	produk domestik bruto
PDRB	produk domestik regional bruto
PKN	Pusat Kegiatan Nasional
PKW	Pusat Kegiatan Wilayah
PRB-API	Pengurangan Risiko Bencana-Adaptasi Perubahan Iklim
PS-InSAR	Persistent Scatterer InSAR
RAD-API	Rencana Aksi Daerah Adaptasi Perubahan Iklim
RMSE	*root mean square error*
RCP	*representative concentration pathways*
ROC	Receiver Operating Characteristic
RPJMD	Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah
RPJPN	Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional
RTRW	Rencana Tata Ruang Wilayah
SSP	Shared Socioeconomic Pathways

Catatan akhir

1. *Hazard* atau bahaya adalah kemungkinan terjadinya suatu peristiwa atau tren fisik, baik yang disebabkan oleh alam maupun oleh manusia, yang dapat mengakibatkan korban jiwa, cedera, atau dampak kesehatan lainnya, serta kerusakan dan kerugian pada harta benda, infrastruktur, mata pencaharian, penyediaan layanan, ekosistem, dan sumber daya lingkungan.
2. *Exposure* atau keterpaparan adalah keberadaan manusia; mata pencaharian; spesies atau ekosistem; fungsi, jasa, dan sumber daya lingkungan; infrastruktur; atau aset ekonomi, sosial, atau budaya di tempat-tempat dan lingkungan yang berpotensi terkena dampak negatif.
3. *Vulnerability* atau kerentanan adalah kecenderungan untuk mengalami dampak negatif. Kerentanan mencakup berbagai konsep dan unsur, termasuk sensitivitas dan kerawanan terhadap bahaya serta kurangnya kemampuan untuk mengatasi dan beradaptasi.
4. *Susceptibility* atau kerawanan adalah kecenderungan fisik manusia, infrastruktur, dan lingkungan untuk terpengaruh oleh suatu fenomena berbahaya akibat kurangnya ketahanan, serta kecenderungan masyarakat dan ekosistem untuk mengalami kerugian sebagai akibat dari kondisi intrinsik dan kontekstual yang membuat kemungkinan besar bahwa sistem-sistem tersebut, jika terkena dampaknya, akan runtuh atau mengalami kerugian dan kerusakan besar akibat pengaruh suatu peristiwa bahaya.
5. Cellular Automata-Markov Chain adalah model dinamis berbasis grid yang digunakan untuk menganalisis perubahan penggunaan lahan secara spasial. Model ini bekerja dengan membagi wilayah menjadi sel-sel diskrit serta mempertimbangkan perubahan dalam ruang dan waktu. Pendekatan ini memungkinkan analisis terhadap kualitas, perluasan, transformasi, dan distribusi berbagai jenis guna lahan.
6. *Green economy* atau pertumbuhan ekonomi hijau merujuk pada suatu konsep di mana perekonomian suatu negara dijalankan dengan mempertimbangkan aspek lingkungan dalam mendorong pertumbuhan ekonomi untuk mewujudkan prinsip keberlanjutan sebagai salah satu tujuan utama.

Daftar pustaka

ADB (Asian Development Bank). 2023. Flood Management in North Java Project: Report and Recommendation of the President. https://www.adb.org/projects/documents/ino-51157-001-rrp.

Andriani, D.D.A., D.D.A. Putranto, A.K. Affandi, dan E. Ibrahim. 2018. "Interpretation of Land Use and Land Cover at Lowland Area Using by NDVI and NDBI." *Ecology, Environment and Conservation* 24 (2): 651–657.

Bappeda (Badan Perencanaan Pembangunan Daerah) Provinsi Bali. 2025. Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah Semesta Berencana Provinsi Bali Tahun 2025–2029. https://www.baliprov.go.id/web/rencana-pembangunan-jangka-menengah-daerah-tahun-2025-2029/.

Bappenas (Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Badan Perencanaan Pembangunan Nasional). 2021. *Executive Summary: Climate Resilience Development Policy 2020–2024*.

Bappenas. 2025. Rancangan Akhir RPJPN Tahun 2025–2045. Jakarta. https://drive.google.com/file/d/1BvGbA2pC7O8pGKiYmRHT9KWVD7FSQbG5/view.

Bennett, W.G., H. Karunarathna, Y. Xuan, M.S.B. Kusuma, M. Farid, A.A. Kuntoro, H.P. Rahayu, B. Kombaitan, D. Septiadi, T.N.A. Kesuma, R. Haigh, dan D. Amaratunga. 2023. "Modelling Compound Flooding: A Case Study from Jakarta, Indonesia." *Natural Hazards* 118: 277–305. https://doi.org/10.1007/s11069-023-06001-1.

Bank Indonesia. 2025. "Indikator Moneter." https://www.bi.go.id/id/statistik/indikator/Default.aspx.

Bi, D., M. Dix, S. Marsland, S. O'Farrell, A. Sullivan, R. Bodman, R. Law, I. Harman, J. Srbinovsky, H.A. Rashid, P. Dobrohotoff, C. Mackallah, H. Yan, A. Hirst, A. Savita, F.B. Dias, M. Woodhouse, R. Fiedler, dan A. Heerdegen. 2020. "Configuration and Spin-Up of ACCESS-CM2, the New Generation Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model." *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science* 70 (1): 225–251. https://doi.org/10.1071/ES19040.

BIG (Badan Informasi Geospasial). 2022. "Garis Pantai Indonesia Skala 1:25.000 Tahun 2022." https://geoservices.big.go.id/rbi/rest/services/GARISPANTAI/GarisPantai_25K/MapServer.

BIG. 2026. "Batas Wilayah Administrasi Kecamatan/Distrik Edisi Juni 2026." https://geoportal.big.go.id/#/katalog.

BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika). 2024. "Data Online BMKG." https://dataonline.bmkg.go.id/dataonline-home.

BNPB (Badan Nasional Penanggulangan Bencana). 2012. *Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana Nomor 2 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana*. Jakarta: BNPB.

BNPB. 2021. Dokumen Kajian Risiko Bencana (KRB) Provinsi Bali Tahun 2022–2026. Jakarta: BNPB. https://inarisk.bnpb.go.id/pdf/Bali/Dokumen%20KRB%20Prov.%20Bali_final%20draft.pdf.

BNPB. 2024. "Data Informasi Bencana Indonesia. Dataset DIBI, BNPB." https://dibi.bnpb.go.id/superset/dashboard/1/?standalone=0&expand_filters=0.

BPBD (Badan Penanggulangan Bencana Daerah) Provinsi Bali. 2024. "Kajian Risiko Bencana Provinsi Bali Tahun 2025–2029." https://drive.google.com/drive/folders/1OWgUBW-FSy64SrDITxsajGy5pYJGcKT6.

BPBD Provinsi Bali. 2025. *Laporan Kejadian/Bencana* 2019–2025.

BPS (Badan Pusat Statistik) Kota Denpasar. 2025. "Inflasi Tahunan Kota Denpasar dan Nasional (Persen), 2023." https://denpasarkota.bps.go.id/id/statistics-table/2/MjYxIzI=/inflasi-tahunan-kota-denpasar-dan-nasional--persen-.html.

BPS Provinsi Bali. 2025a. *Provinsi Bali Dalam Angka 2024*. https://bali.bps.go.id/id/publication/2024/02/28/98fe74bb8f73f0d1c2cdda7a/provinsi-bali-dalam-angka-2024.html.

BPS Provinsi Bali. 2025b. "PDRB Kabupaten/Kota di Provinsi Bali Atas Dasar Harga Berlaku." https://bali.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTcwIzI=/pdrb-kabupaten-kota-di-provinsi-bali-atas-dasar-harga-berlaku.html.

Brakenridge, G.R. 2017. "Global Active Archive of Large Flood Events." http://gee-community-catalog.org/projects/flood/#data-quality

Breiman, L. 2001. "Random Forests." *Machine Learning* 45 (1): 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

Breiman, L., M. Last, dan J. Rice. 2003. "Random Forests: Finding Quasars." dalam *Statistical Challenges in Astronomy* 243–254. https://doi.org/10.1007/0-387-21529-8_16.

Cahyadi, A., M.A. Marfai, D. Mardiatno, dan F. Nucifera. 2017. *Pemodelan Spasial Bahaya Banjir Rob Berdasarkan Skenario Perubahan Iklim dan Dampaknya di Pesisir Pekalongan*.

Chatterton, J., E.C. Penning-Rowsell, dan S.J. Priest. 2014. "The Many Uncertainties in Flood Loss Assessments." Dalam *Applied Uncertainty Analysis for Flood Risk Management*, editor oleh E.C. Penning-Rowsell dan G.M.P.M.R.R.H.L.T. Tapsell, 335–356. London: Imperial College Press. https://doi.org/10.1142/9781848162716_0013.

Denpost. 2024. "Cuaca Buruk, Abrasi Kian Parah, Nelayan di Pebuahan Cemas." https://www.denpost.id/bali/105512197881/cuaca-buruk-abrasi-kian-parah-nelayan-di-pebuahan-cemas.

Detikcom. 2022. "Waspada! 27 Pantai di Bali Berpotensi Banjir Rob 27-29 Oktober 2022." https://www.detik.com/bali/berita/d-6372406/waspada-27-pantai-di-bali-berpotensi-banjir-rob-27IPC-29-oktober-2022.

Dhakar, N.K., dan R. Pahuja. 2022. "Analysis of Landsat 8 Imagery for Landform Classification and Change Detection." *ECS Transactions* 107 (1): 249. https://iopscience.iop.org/article/10.1149/10701.0249ecst.

Dinas Pekerjaan Umum, Penataan Ruang, Perumahan dan Kawasan Permukiman Provinsi Bali. 2023. *Rencana Tata Ruang Wilayah Provinsi Bali Tahun 2023–2043*. Denpasar: Dinas Pekerjaan Umum, Penataan Ruang, Perumahan dan Kawasan Permukiman Provinsi Bali. https://tarubali.baliprov.go.id/rtrw-provinsi-bali/.

Elvidge, C.D., K.E. Baugh, M. Zhizhin, dan F.C. Hsu. 2013. "Why VIIRS Data Are Superior to DMSP for Mapping Nighttime Lights." *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network* 35: 62–69. https://www.researchgate.net/publication/271020677_Why_VIIRS_data_are_superior_to_DMSP_for_mapping_nighttime_lights.

EROS (Earth Resources Observation and Science) Center. 2020. "Landsat 8–9 Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2 [Dataset]." U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.5066/P9OGBGM6.

ESA (European Space Agency). 2022. "Copernicus Sentinel-2 (processed by ESA). MSI Level-2A Bottom-of-Atmosphere (BOA) Reflectance Product, Collection 1." https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/sentinel-data-access/sentinel-products/sentinel-2-data-products/collection-1-level-2a.

Farr, T.G., P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, dan D. Alsdorf. 2007. "The Shuttle Radar Topography Mission." *Reviews of Geophysics* 45 (2). https://doi.org/10.1029/2005RG000183.

Fawcett, T. 2006. "An Introduction to ROC Analysis." *Pattern Recognition Letters* 27 (8): 861–874.

Flick, R.E., B.D. Chadwick, J. Briscoe, dan K.C. Harper. 2012. "'Flooding' Versus 'Inundation'." *Eos, Transactions American Geophysical Union* 93 (38): 365–66. https://doi.org/10.1029/2012EO380009.

Funk, C., P. Peterson, M. Landsfeld, D. Pedreros, J. Verdin, S. Shukla, G. Husak, J, Rowland, L. Harrison, A. Hoell, dan J. Michaelsen. 2015. "The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations: A New Environmental Record for Monitoring Extremes." *Scientific Data* 2 (1): 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66.

GADM (Database of Global Administrative Areas). 2022. "GADM Data." 16 Juli. https://gadm.org/data.html.

Gholamy, A., V. Kreinovich, dan O. Kosheleva. 2018. "Why 70/30 or 80/20 Relation Between Training and Testing Sets: A Pedagogical Explanation." Departmental Technical Reports. https://scholarworks.utep.edu/cs_techrep/1209.

Hadiasuata, K.F., dan M.D. Jendra P. 2024. "Perubahan Iklim di Bali dari Sudut Pandang Curah Hujan." Denpasar. https://bbmkg3.bmkg.go.id/public_data/dataspdf/bbmkg3-1738329613.pdf.

Handayani, W., U.E. Chigbu, I. Rudiarto, dan I.H.S. Putri. 2020. "Urbanization and Increasing Flood Risk in the Northern Coast of Central Java—Indonesia: An Assessment towards Better Land Use Policy and Flood Management." *Land* 9 (10): 343. https://doi.org/10.3390/land9100343.

Hastuti, A. Wahyuning, M. Nagai, dan K.I. Suniada. 2022. "Coastal Vulnerability Assessment of Bali Province, Indonesia Using Remote Sensing and GIS Approaches." *Remote Sensing* 14 (17): 4409. https://doi.org/10.3390/rs14174409.

Huizinga, J., H. de Moel, dan W. Szewcyk. 2017. "Global Flood Depth-Damage Functions: Methodology and the Database with Guidelines." JRC Publication Repository. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC105688.

Huneke, W.G.C., A. McC. Hogg, M. Dix, D. Bi, A. Sullivan, S. McGregor, C. Holgate, S.P. O'Farrell, dan M.J.T. Oliveira. 2025. "The ACCESS-CM2 Climate Model with a Higher Resolution Ocean–Sea Ice Component (1/4°)." EGUsphere (preprint). https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1006.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC. 2023. Climate Change 2022: *Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Jongman, B., H. Kreibich, H. Apel, J.I. Barredo, P.D. Bates, L. Feyen, A. Gericke, J. Neal, J.C.J.H. Aerts, dan P.J. Ward. 2012. "Comparative Flood Damage Model Assessment: Towards a European Approach." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12 (12): 3733–3752. https://doi.org/10.5194/nhess-12-3733-2012.

Jothimani, M., E. Getahun, dan A. Abebe. 2022. "Remote Sensing, GIS, and RUSLE in Soil Loss Estimation in the Kulfo River Catchment, Rift Valley, Southern Ethiopia." *Journal of Degraded and Mining Lands Management* 9 (2): 3307–3315. https://jdmlm.ub.ac.id/index.php/jdmlm/article/view/1058.

Kementerian ATR/BPN (Agraria dan Tata Ruang/Badan Pertanahan Nasional). 2021. Peraturan Menteri Agraria/Kepala Badan Pertanahan Nasional Nomor 11 Tahun 2021. https://peraturan.bpk.go.id/Details/209795/permen-agrariakepala-bpn-no-11-tahun-2021.

Kementerian ATR/BPN. 2024. *Petunjuk Teknis Integrasi Perubahan Iklim (API) ke dalam Perencanaan Tata Ruang*.

KKP (Kementerian Kelautan dan Perikanan). 2025. "Produk Domestik Bruto (PDB) Perikanan." https://portaldata.kkp.go.id/portals/data-statistik/pdb_perikanan/tbl-statis/d/105.

Kou, W., C. Liang, L. Wei, A.J. Hernandez, dan X. Yang. 2017. "Phenology-Based Method for Mapping Tropical Evergreen Forests by Integrating of MODIS and Landsat Imagery." *Forests* 8 (2): 34. https://doi.org/10.3390/f8020034.

Ladue, E.L. 1993. *Time Value of Money Financial Examples and Calculations Using Tables and Calculators*. New York.

Magnan, Alexandre K., M. Oppenheimer, M. Garschagen, M.K. Buchanan, V.K. E. Duvat, D.L. Forbes, J.D. Ford, E. Lambert, J. Petzold, F.G. Renaud, Z. Sebesvari, R.S.W. van de Wal, J. Hinkel, dan H. Pörtner. 2022. "Sea Level Rise Risks and Societal Adaptation Benefits in Low-lying Coastal Areas." *Scientific Reports* 12 (1): 10677.

Mahmon, N.A., N. Ya'Acob, dan A.L. Yusof. 2015. "Differences of Image Classification Techniques for Land Use and Land Cover Classification." Dalam prosiding 2015 *IEEE 11th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications* (CSPA) 90–94.

Muschelli, J. 2020. "ROC and AUC with a Binary Predictor: A Potentially Misleading Metric." *Journal of Classification* 37 (3): 696–708.

Nerem, R.S., D.P. Chambers, C. Choe, dan G.T. Mitchum. 2010. "Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions." *Marine Geodesy* 33 (1): 435–446.

OpenStreetMap Contributors. 2025. "Planet Dump," 2025. https://www.openstreetmap.org/.

Pemerintah Provinsi Bali. 2023. Peraturan Daerah Provinsi Bali Nomor 2 Tahun 2023. https://peraturan.bpk.go.id/Details/262423/perda-prov-bali-no-2-tahun-2023.

Prasetya, R., D. Djuhana, A.H. Saputro, dan D.S. Permana. 2026. "Evaluation and Ranking of NEX-GDDP-CMIP6 Models Based on Monthly Precipitation Climatology over Indonesia." *Frontiers in Climate* 8: 1748663. https://doi.org/10.3389/fclim.2026.1748663.

Purnama, S., M.A. Marfai, D.F. Anggraini, dan A. Cahyadi. 2015. "Estimasi Risiko Kerugian Ekonomi akibat Banjir Rob Menggunakan Sistem Informasi Geografis di Kecamatan Penjaringan, Jakarta Utara." *Jurnal Spatial Wahana Komunikasi dan Informasi Geografi* 14 (2): 8–13.

Rosenzweig, C., dan W. Solecki. 2001. *Climate Change and a Global City: The Potential Consequences of Climate Variability and Change: Metro East Coast: Executive Summary and Recommendations*.

Rudiarto, I., W. Handayani, dan J.S. Setyono. 2018. "A Regional Perspective on Urbanization and Climate-Related Disasters in the Northern Coastal Region of Central Java, Indonesia." *Land* 7 (1): 34.

Sakti, A.D., A. Deliar, D.R. Hafidzah, A.V. Chintia, T.S. Anggraini, K.T.N. Ihsan, R. Virtriana, D. Suwardhi, A.B. Harto, S.L. Nurmaulia, A.F. Aritenang, A. Riqqi, A. Hernandi, B. Soeksmantono, dan K. Wikantika. 2024. "Machine Learning Based Urban Sprawl Assessment Using Integrated Multi-Hazard and Environmental-Economic Impact." *Scientific Reports* 14 (1): 1–16.

Senthilkumar, C., A. Eatedal, A. Nuha, dan M. Kavitha. 2025. "Coastal Spatial Planning Using Object-Based Image Analysis and Image Classification Techniques." *Journal of South American Earth Sciences* 152: 105322.

Senthilkumar, R. Appachi, A. Homayounirad, dan L.C. Siebert. 2025. "Leveraging Large Language Models to Identify the Values Behind Arguments." *Lecture Notes in Computer Science* 15356: 87–103.

Suroso, D.S.A., dan T. Firman. 2018. "The Role of Spatial Planning in Reducing Exposure towards Impacts of Global Sea Level Rise Case Study: Northern Coast of Java, Indonesia." *Ocean & Coastal Management* 153: 84–97.

Swetanisha, S., A.R. Panda, dan D.K. Behera. 2022. "Land Use/ Land Cover Classification Using Machine Learning Models." *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 12 (2): 2040–2046.

Toersilowati, L., B. Siswanto, E. Maryadi, I. Susanti, M. Suhermat, A. Witono, S. Berliana, S.A. Rahayu, F. Adany, J. Aminuddin, dan R.F. Lubis. 2022. "The Projections of Climate Change Using Conformal Cubic Atmospheric Model (CCAM) in Bali, Indonesia." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1047: 012033. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1047/1/012033.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2021. *Nature-based Solutions in Oceans and Coastal Ecosystems: A Practical Guide*. Nairobi: UNEP Finance Initiative.

Vogiatzis, M., dan I. Eleftheriadis. 2023. *Comparison of Pixel-Based Classification Algorithms Using Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI for Land Use/Land Cover Mapping in a Heterogeneous Landscape*.

Vrigazova, B. 2021. "The Proportion for Splitting Data into Training and Test Set for the Bootstrap in Classification Problems." *Business Systems Research* 12 (1): 228–242.

Wijaya, N., M.B.F. Bisri, A.F. Aritenang, dan A. Mariany. 2017. *Spatial Planning, Disaster Risk Reduction, and Climate Change Adaptation Integration in Indonesia: Progress, Challenges, and Approach*. Cham: Springer.

Wijayanti, P., X. Zhu, P. Hellegers, Y. Budiyono, dan E.C. van Ierland. 2017. "Estimation of River Flood Damages in Jakarta, Indonesia." *Natural Hazards* 86 (3): 1059–1079.

Ucapan terima kasih

Kami menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan studi ini. Studi ini dilakukan Tim Iklim WRI Indonesia dan Geospatial Intelligence Solution for Sustainability Action (GISACT). Kami mengucapkan terima kasih dan apresiasi kepada Federal Ministry for the Environment, Climate Action, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMUKN) di Pemerintah Jerman atas dukungan pembiayaan sebagai bagian dari pelaksanaan proyek IKI LTS 2050 is Now.

Kami juga menyampaikan apresiasi kepada para pakar dan akademisi yang telah berpartisipasi dalam proses konsultasi teknis selama pelaksanaan studi ini, yaitu Prof. Ir. Djoko Santoso Abi Suroso, Ph.D (Institut Teknologi Bandung; ITB); Nurrohman Wijaya, Ph.D (ITB); Dr. Akhmad Riqqi, M.Si (ITB); Hamzah Latief, M.Si, Ph.D (ITB); M.S Fitriyanto, M.Sc (ITB); Dr. Ayi Tarya, S.Si, M.Si (ITB); Felix Wisnu Handoyo, S.E, MS (BRIN); Dr. Armi Susandi, M.T. (ITB); Prof. Dr. Ir. Jonson Lumban Gaol, M.Si (IPB); Dr. Donaldi Sukma Permana (BMKG); dan Dr. Aris Ismanto, S.Si, M.Si (Universitas Diponegoro). Kami berterima kasih atas masukan, saran, dan pandangan yang diberikan yang memperkaya substansi studi ini.

Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada Bappeda Provinsi Bali, BPBD Provinsi Bali, BPBD Kabupaten Jembrana dan Buleleng, serta organisasi perangkat daerah di Provinsi Bali yang berkenan memfasilitasi diskusi dan penyediaan data untuk pelaksanaan studi. Selain itu, kami juga mengucapkan terima kasih kepada DataLab WRI Indonesia atas dukungan dalam visualisasi desain grafik dan peta di dalam dokumen ini.

Terakhir, kami mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang terlibat dalam proses *review* internal ataupun eksternal atas masukan dan saran yang telah diberikan untuk penyempurnaan studi ini.

Tentang Penulis

Ardi Nur Armanto adalah Climate Urban Analyst di WRI Indonesia. Kontak: ardi.armanto@wri.org

Farijzal Arrafisena adalah Climate Research Analyst di WRI Indonesia.
Kontak: farijzal.arrafisena@wri.org

Wira Swadana adalah Climate Action Senior Lead di WRI Indonesia.
Kontak: wira.swadana@wri.org

Egi Suarga adalah Senior Manager for Climate di WRI Indonesia.
Kontak: egi.suarga@wri.org

Sofwan Hakim adalah Program Management Unit Senior Lead di WRI Indonesia.
Kontak: sofwan.hakim@wri.org

Hafidz Abdillah sebelumnya bekerja di WRI Indonesia sebagai Air Quality and Climate Research Analyst.
Kontak: dillahfidz@gmail.com

Dr. Eng. Anjar Dimara Sakti adalah Dosen Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian ITB dan CEO di GISACT.
Kontak: anjar@itb.ac.id, anjar@gisact.io

Cokro Santoso adalah Chief Strategy Officer di GISACT.
Kontak: cokrosantoso@gisact.io

Ar'rafi Malika Ardy adalah GIS & Remote Sensing Specialist di GISACT.
Kontak: arrafi@gisact.io

Ifandara Kusuma Cahya Reynaldi sebelumnya bekerja di GISACT sebagai Research and Development.
Kontak: ifandrakusumacahyareynaldi@gmail.com

Kontribusi masing-masing penulis saling tumpang tindih dan mencerminkan upaya kolaboratif. Peran-peran di atas menyoroti tanggung jawab utama yang diemban setiap penulis, tetapi tidak menyiratkan pembagian tugas yang kaku. Semua penulis berkontribusi aktif di berbagai aspek penelitian.

Tentang WRI

World Resources Institute (WRI) Indonesia, yang didirikan di Indonesia dengan nama Yayasan Institut Sumber Daya Dunia, adalah lembaga penelitian independen yang berfokus pada pembangunan sosio-ekonomi secara inklusif dan lestari. Pekerjaan kami berfokus pada enam bidang utama yakni hutan, iklim, energi, kota dan transportasi, tata kelola, serta laut. Kami mengaktualisasikan gagasan-gagasan besar menjadi aksi nyata pada titik temu yang menghubungkan lingkungan dengan peluang ekonomi dan kesejahteraan manusia.

creative commons

Copyright 2026 World Resources Institute. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.
To view a copy of the license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/