

Proyeksi Kenaikan Muka Air Laut dan Dampaknya Berdasarkan Skenario *Shared Socioeconomic Pathways* di Pulau Enggano

Iwan Pramesti Anwar^{1*}, An Nisa Nurul Suci², Mukti Dono Wilopo², Aulia Try Atmojo³ & Faruq Khadami¹

¹Kelompok Keahlian/Keilmuan Oseanografi Lingkungan dan Terapan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

² Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Bengkulu, 38371, Indonesia

³Kelompok Keahlian Geodesi, Hidrografi dan Survei, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Perencanaan Wilayah, Institut Teknologi Sumatera, Lampung 35365 Indonesia;

*Corresponding author: iwanpanwar@itb.ac.id

Received: 2025-07-01. Revised: 2025-08-22. Accepted: 2025-09-30

ABSTRAK

Perubahan iklim global menyebabkan dampak signifikan di berbagai belahan dunia, salah satunya adalah kenaikan muka air laut di Pulau Enggano. Dengan menggunakan *The NASA Sea Level Projection Tool* dan *The Coastal Risk Screening Tools*, penelitian ini berhasil menganalisis proyeksi kenaikan muka air laut dan daerah rendaman pesisir di Pulau Enggano. Tujuh skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) untuk tahun 2050, 2100, dan 2150 dianalisis. Hasil analisis menunjukkan risiko yang signifikan: pada tahun 2050, kenaikan muka air laut berkisar antara 0,05 m - 0,2 m dengan area terendam masih terbatas, hanya sebagian kecil di cagar alam Tanjung Laksaha. Rata-rata laju peningkatan permukaan air laut selama periode ini bervariasi antara 4 mm/tahun hingga 12 mm/tahun. Pada tahun 2100, proyeksi menunjukkan bahwa area yang terendam akan semakin meluas, dengan skenario optimis seperti SSP1-1.9 memperkirakan kenaikan sekitar 0,4 m, sementara itu, skenario pesimis seperti SSP5-8.5 dapat mencapai 0,89 m. Kenaikan muka air laut ini menunjukkan peningkatan risiko bagi kerusakan infrastruktur. Sementara itu, pada tahun 2150, hampir seluruh pesisir bagian utara dan timur pulau diperkirakan akan terendam, dengan skenario optimis menunjukkan kenaikan yang lebih rendah dibandingkan dengan skenario pesimis, yang dapat mencapai lebih dari 2,5 m. Temuan ini memberikan gambaran penting tentang perlunya adaptasi dan mitigasi perubahan iklim demi kelangsungan Pulau Enggano di masa depan.

Kata kunci : Kenaikan muka air laut, perubahan iklim, peta rendaman, Pulau Enggano

ABSTRACT

Global climate change is causing significant impacts across various regions of the world, one of which is the rise in sea level in Pulau Enggano. Utilizing The NASA Sea Level Projection Tool and The Coastal Risk Screening Tools, this research successfully analyzes the projections of sea level rise and coastal inundation areas in Pulau Enggano. Seven Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios for the years 2050, 2100, and 2150 are analyzed. The analysis results indicate significant risks: by 2050, the rise in sea level is expected to range from 0.05 m to 0.2 m, with inundated areas remaining limited, primarily affecting a small part of the Tanjung Laksaha nature reserve. The average rate of sea level increase during this period varies between 4 mm/year and 12 mm/year. In 2100, projections show that the inundated areas will expand, with optimistic scenarios like SSP1-1.9 estimating a rise of about 0.4 m, while pessimistic scenarios such as SSP5-8.5 could reach 0.89 m. This sea level rise indicates an increased risk of damage to infrastructure. Meanwhile, by 2150, nearly the entire northern and eastern coast of the island is expected to be submerged, with optimistic scenarios showing lower increases compared to pessimistic scenarios, which could exceed 2.5 m. These findings underscore the urgent need for adaptation and mitigation strategies to ensure the sustainability of Pulau Enggano in the future.

Keywords: Sea level rise, Climate Change, inundation map, Enggano Island

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global telah menjadi salah satu tantangan terbesar yang dihadapi oleh masyarakat dan ekosistem di seluruh dunia (IPCC, 2021). Salah satu dampak paling signifikan dari perubahan ini adalah kenaikan muka air laut, yang dapat mengancam keselamatan hidup, kehidupan sosial-ekonomi, dan keberlanjutan sumber daya alam, terutama di daerah pesisir (Kouakou *et al.*, 2023). Pulau Enggano, sebagai salah satu pulau kecil yang terletak di lepas pantai barat Sumatra, Indonesia, tidak terkecuali dari ancaman ini. Pulau ini dikenal tidak hanya sebagai tempat tinggal masyarakat lokal tetapi juga sebagai tujuan wisata yang menawarkan keindahan alam dan keanekaragaman hayati pesisir yang kaya (Ariasari *et al.*, 2024; Dari *et al.*, 2022; Senoaji, 2009). Potensi Pulau Enggano sebagai tujuan wisata tergolong tinggi, dengan pantai yang menawan, terumbu karang yang indah, serta kekayaan budaya lokal yang menarik pengunjung (Ariasari *et al.*, 2024; Dari *et al.*, 2022; Senoaji, 2009). Selain itu, Pulau Enggano juga memiliki keanekaragaman laut yang tinggi dan ekosistem pesisir tropis yang baik (Agustini *et al.*, 2016; Utami *et al.*, 2023; Wilopo *et al.*, 2022). Namun, potensi ini sangat rentan terhadap dampak perubahan iklim, terutama kenaikan muka air laut. Dengan masyarakat yang bergantung pada sumber daya laut dan pertanian, serta ekosistem pesisir yang sensitif, penting untuk mengidentifikasi dan memahami potensi dampak yang dihadapi oleh pesisir Pulau Enggano akibat peningkatan muka air laut.

Proyeksi kenaikan muka air laut bervariasi tergantung pada skenario emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh aktivitas manusia. Berdasarkan *Sixth Assessment Report* (AR6) dari *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), ditetapkan paling tidak tujuh skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), untuk model iklim jangka panjang yang dipilih (Fox-Kemper *et al.*, 2021; Garner *et al.*, 2021). Skenario ini mencakup rentang kemungkinan masa depan yang berbeda, mulai dari tindakan mitigasi yang intensif hingga kelanjutan emisi tetap tinggi. Mengingat kondisi geografis dan sosial-ekonomi Pulau Enggano yang berada di tengah samudera, kajian terhadap dampak kenaikan muka air laut sangat penting untuk perencanaan dan manajemen risiko bencana, serta pengembangan kebijakan yang berkelanjutan (IPCC, 2021).

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis proyeksi kenaikan muka air laut di Pulau Enggano berdasarkan berbagai skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP), serta mengevaluasi dampaknya terhadap daerah yang berisiko terendam banjir permanen pada tahun 2050, 2100, dan 2150 di Pulau Enggano.

MATERI DAN METODE

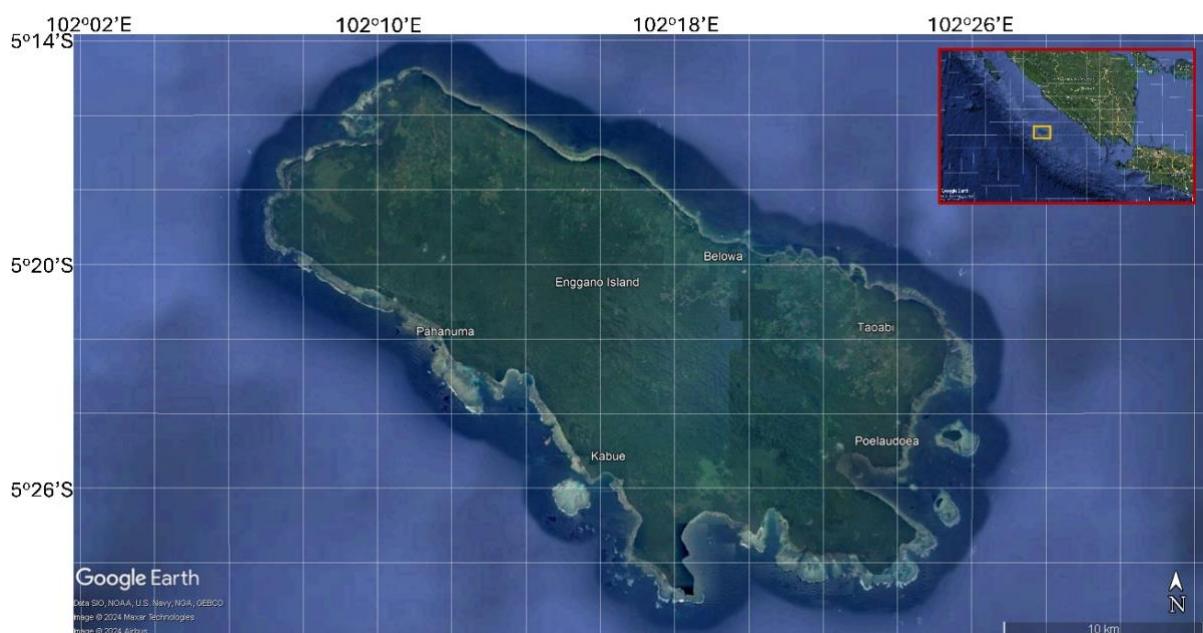
Penelitian ini dilakukan di Perairan Pulau Enggano, Bengkulu. Wilayah yang dikaji meliputi perairan pantai dan pesisir Pulau Enggano. Secara garis besar lokasi tersebut ditunjukkan oleh Gambar 1. Perubahan tinggi muka air laut berdasarkan skenario *Shared Socioeconomic Pathways* selama tahun 2020 – 2150 (IPCC, 2021). Itu dilakukan dengan *The NASA Sea Level Projection Tool* (<https://sealevel.nasa.gov>). Selanjutnya, analisis area yang berpotensi terdampak oleh kenaikan muka air laut juga dilakukan dengan pemodelan hidrodinamika dan hidrolik pantai, berbasis analisis spasial dengan menggunakan *The Coastal Risk Screening Tools* (<https://coastal.climatecentral.org/>).

Data Proyeksi Tinggi Muka Air Laut

Tinggi muka air laut hasil model proyeksi iklim dengan berbagai skenario yang digunakan oleh *The Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) dikembangkan oleh Fox-Kemper *et al.*, (2021), dan Garner *et al.*, (2021). Selanjutnya, proyeksi tinggi muka air laut yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan laporan ke-6 *The Intergovernmental Panel on Climate Change*, dipilih lima skenario untuk mewakili kemungkinan-kemungkinan yang akan terjadi pada masa mendatang (IPCC, 2021). Proyeksi permukaan laut yang disajikan dari berbagai skenario merupakan tinggi relatif muka air laut terhadap periode 1995–2014, untuk lima skenario *Shared Socioeconomic Pathway* (SSP) akan digunakan dalam penelitian ini, yang diantaranya adalah:

1. SSP1-1.9 memiliki arti menjaga pemanasan sekitar 1,5°C berdasarkan median tahun 1850–1900 di tahun 2100 dan membuat emisi netto CO₂ menjadi nol sekitar tengah abad.

2. SSP1-2.6 memiliki arti tetap di bawah pemanasan $2,0^{\circ}\text{C}$ relatif terhadap median tahun 1850-1900 dengan emisi netto CO_2 nol yang terindikasikan pada paruh kedua abad.
3. SSP2-4.5 memiliki arti kira-kira sejalan dengan batas atas tingkat emisi Kontribusi yang Ditentukan Secara Nasional (NDC) secara agregat pada tahun 2030. SR1.5 menilai proyeksi suhu untuk NDC berada di antara $2,7^{\circ}\text{C}$ dan $3,4^{\circ}\text{C}$ pada tahun 2100, yang sesuai dengan setengah atas proyeksi pemanasan di bawah SSP2-4.5. NDC yang diperbarui pada akhir 2020 tidak secara signifikan mengubah proyeksi emisi hingga tahun 2030, meskipun lebih banyak negara mengadopsi target netto nol 2050 sesuai dengan SSP1-1.9 atau SSP1-2.6. Skenario SSP2-4.5 sedikit menyimpang dari skenario referensi 'tanpa kebijakan iklim tambahan', akan menghasilkan pemanasan perkiraan terbaik sekitar $2,7^{\circ}\text{C}$ pada akhir abad ke-21 relatif terhadap median tahun 1850-1900.
4. SSP3-7.0 adalah skenario referensi sedang hingga tinggi yang dihasilkan dari tidak adanya kebijakan iklim tambahan di bawah narasi pengembangan sosial ekonomi SSP3. SSP3-7.0 yang memiliki emisi non- CO_2 sangat tinggi, termasuk emisi aerosol yang tinggi.
5. SSP5-8.5 adalah skenario referensi tinggi tanpa kebijakan iklim tambahan. Tingkat emisi setinggi SSP5-8.5 tidak dapat ditunjukkan oleh Model Penilaian Terpadu (IAM) di bawah salah satu SSP selain scenario tetap menggunakan bahan bakar fosil SSP5.



Gambar 1. Daerah kajian periaran dan pesisir Pulau Enggano

Dibandingkan dengan 1850-1900, suhu rata-rata permukaan udara global selama periode 2081-2100 sangat mungkin (dengan probabilitas setidaknya 90%) lebih tinggi sebesar $1,0^{\circ}\text{C}$ - $1,8^{\circ}\text{C}$ berdasarkan kenario SSP1-1.9. Kemudian $1,3^{\circ}\text{C}$ - $2,4^{\circ}\text{C}$ berdasarkan skenario SSP1-2.6. Selanjutnya $2,1^{\circ}\text{C}$ - $3,5^{\circ}\text{C}$ berdasarkan skenario SSP2-4.5. Lalu $2,8^{\circ}\text{C}$ - $4,6^{\circ}\text{C}$ berdasarkan skenario SSP3-7.0, dan terakhir $3,3^{\circ}\text{C}$ - $5,7^{\circ}\text{C}$ berdasarkan skenario SSP5-8.5. Secara ringkas ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Peningkatan suhu global relatif terhadap tahun 1850 – 1900 berdasarkan lima skenario SSP pilihan

Skenario	Peningkatan suhu	Keterangan
SSP1-1.9	1,0 °C - 1,8 °C	Skenario rendah emisi, berfokus pada keberlanjutan dan mitigasi yang cepat.
SSP1-2.6	1,3 °C - 2,4 °C	Skenario transisi menuju energi bersih dengan upaya mitigasi yang kuat.
SSP2-4.5	2,1 °C - 3,5 °C	Skenario menengah, mengandalkan perkembangan teknologi dan kebijakan yang moderat.
SSP3-7.0	2,8 °C - 4,6 °C	Skenario tinggi emisi dengan ketidakstabilan sosial dan ketergantungan pada bahan bakar fosil.
SSP5-8.5	3,3 °C - 5,7 °C	Skenario tinggi emisi, pertumbuhan ekonomi yang kuat dengan penggunaan energi fosil yang dominan.

Dalam hal proyeksi tinggi muka air laut, rentang yang mungkin dapat digunakan adalah berdasarkan kombinasi ketidakpastian perubahan suhu yang terkait dengan skenario emisi, serta ketidakpastian hubungan antara suhu dan faktor-faktor yang mempengaruhi perubahan tinggi muka air laut, seperti ekspansi termal, dinamika laut, serta mencairnya massa gletser dan lapisan es. Secara umum, hasil persentil ke-17 hingga ke-83 dari model proyeksi iklim diinterpretasikan sebagai rentang yang paling mungkin, merujuk pada probabilitas minimal 66%. Perlu dicatat bahwa simulasi model iklim global setelah tahun 2100 sangat sulit didapatkan, sehingga mengakibatkan diskontinuitas dalam proyeksi antara tahun 2100 dan setelahnya, terutama di daerah dengan efek dinamika permukaan laut merupakan penentu Utama dari perubahan muka air laut (IPCC, 2021).

Untuk menunjukkan potensi dampak dari proses lapisan es yang tidak stabil, serta terdapat tingkat kesepakatan yang rendah serta bukti yang terbatas tentang pengurangan emisi, maka proyeksi dengan kepercayaan rendah juga dibuat yang dituangkan dalam skenario SSP1-2.6 dan SSP5-8.5. Proyeksi dengan kepercayaan rendah untuk kedua lapisan es, yaitu Greenland dan Antartika, mengintegrasikan informasi dari studi Penilaian Ahli Terstruktur oleh Bamber *et al.* (2019). Untuk lapisan es Antartika, proyeksi dengan kepercayaan rendah juga menggabungkan hasil dari studi simulasi yang mencakup Instabilitas Puncak Es Laut menurut DeConto *et al.* (2021). Hasil yang ditunjukkan adalah proyeksi persentil ke-17 hingga ke-83, namun tidak dinilai sebagai rentang yang mungkin karena adanya kesepakatan yang rendah dan bukti yang terbatas. Dengan demikian scenario SSP1-2.6 dan SSP5-8.5 dapat disebut sebagai skenario pesimis.

Laju kenaikan muka air laut

Laju kenaikan muka air laut dapat dihitung dengan Persamaan 1 berikut:

$$R = \frac{H_2 - H_1}{\Delta t} \quad (1)$$

Dengan R adalah laju kenaikan muka air laut (mm/tahun), H_1 dan H_2 adalah tinggi muka air laut pada waktu awal dan waktu akhir tinjauan (mm), Δt adalah selang waktu yang ditinjau dalam tahun.

Data Pemodelan Rendaman Pesisir

Dalam menjalankan model rendaman kawasan pesisir pada penelitian ini digunakan data elevasi pantai dari CoastalDEM® v3.0 yang dimiliki oleh Climate Central (Kulp dan Strauss 2019), serta dikembangkan lebih lanjut oleh Kulp dan Strauss (2024). CoastalDEM® dibuat dengan menggunakan teknik kecerdasan buatan untuk meningkatkan data elevasi dari penggabungan berbagai sumber DEM global. Resolusi horizontal data elevasi CoastalDEM® adalah 1" (sekitar 30 meter). Selanjutnya, untuk menjalankan model spasial area rendaman/banjir pesisir diperlukan tinggi atau elevasi muka air proyeksi waktu tertentu.

Metode Pemodelan *Bathtub Concept*

Model potensi rendaman/area banjir pesisir yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan *bathtub concept* (Kouakou *et al.* 2023). Dengan area banjir diidentifikasi sebagai

elevasi darat saat ini relative rendah terhadap tinggi air di garis pantai pada waktu yang diproyeksikan. Model tersebut dijalankan dengan menggunakan analisis *Geographics Information System (GIS)* yang dikemas dalam *The Coastal Risk Screening Tools*.

Pada *The Coastal Risk Screening Tools* pengaturan defaultnya, yaitu "Kecualikan area yang berpotensi terlindungi". Itu berarti area yang memiliki tinggi lebih rendah dari proyeksi tinggi muka air pada Waktu mendatang namun berada jauh di garis pantai/terlindungi, maka akan dikecualikan sebagai daerah yang akan terendam/banjir. Meskipun ada juga mode untuk tetap menghitung area elevasi yang lebih rendah dari proyeksi tinggi muka air waktu mendatang, sebagai area banjir.

Pendekatan yang sederhana dan efisien ini menghasilkan peta yang cukup akurat untuk, terutama untuk daerah yang terancam oleh kenaikan permukaan air laut yang bersifat permanen. Meski demikian, untuk pemodelan banjir yang bersifat tidak permanen seperti banjir rob, hujan badai, serta gelombang tinggi dan sejenisnya, model bathtub concept ini tidak terlalu akurat. Sehingga diperlukan model hidrodinamika dan hidrolika pantai secara dinamis untuk memetakan area banjir oleh bencana tersebut. Sehingga, untuk peta potensi rendaman/banjir oleh kenaikan muka air laut model *bathtub concept* masih sangat realistik dan efisien.

HASIL DAN PEMBAHASAN

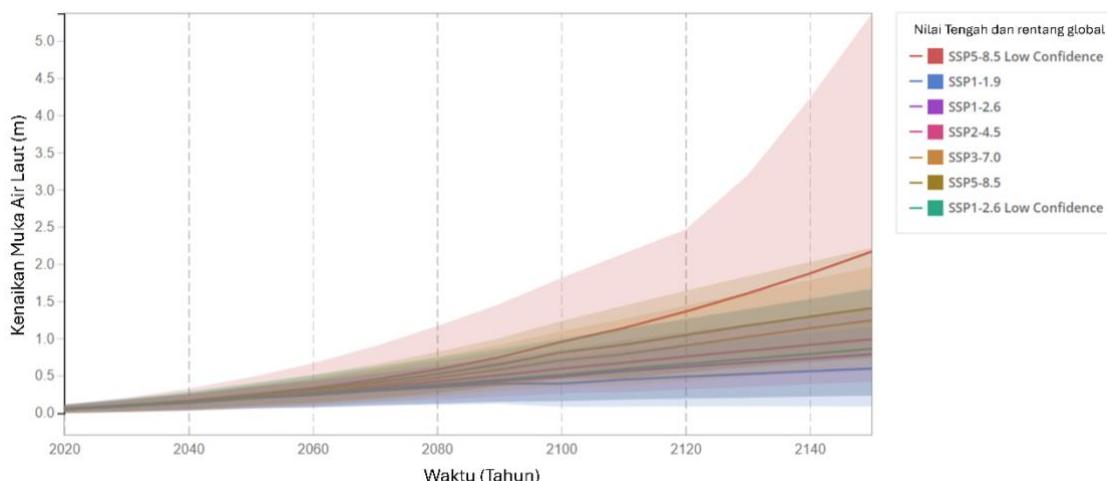
Kondisi Perairan Pantai dan Pesisir Pulau Enggano

Perairan Pulau Enggano merupakan pulau kecil yang posisinya berada di barat Pulau Sumatera, sama seperti Pula Simeulue (Bernawis *et al.*, 2019). Pulau Enggano juga dipengaruhi pola arus musiman, dengan kisaran kecepatan arus permukaan hingga 0,75 m/detik (Anwar *et al.*, 2021). Sementara itu, pengaruh antar tahun juga kuat dirasakan di perairan Pulau Enggano, pengaruh tersebut salah satunya diakibatkan oleh *Indian Ocean Dipole* (Cahyarini *et al.*, 2021). Ketika terjadi *Dipole Mode (DM)*+ maka suhu muka air meningkat, kemudian hal tersebut menyebabkan tinggi muka air juga meningkat oleh karena ekspansi termal. Sementara itu, pada saat DM- suhu muka air laut di Perairan Enggano relatif lebih dingin, sehingga menyebabkan muka air laut relatif rendah. Kemudian, selain pola musim dan antar tahunan, analisis jangka panjang juga memperlihatkan bahwa di Perairan Enggano telah terjadi peningkatan suhu sebesar 0,5 °C - 1,5 °C dalam kurun waktu 1969 - 2007.

Hal tersebut tentunya dapat menyebabkan kenaikan muka air laut di Pulau Enggano. Kenaikan muka air laut dalam jangka panjang dan tidak terkendali dapat menyebabkan pesisir menjadi terendam permanen. Seperti telah diketahui daerah yang akan terdampak berupa kawasan pemukiman, wisata pesisir, dan cagar alam (Zamdial *et al.*, 2020). Sementara itu, kenaikan muka air laut yang berkorelasi dengan kenaikan suhu juga diawali oleh peningkatan karbon yang disebabkan kegiatan antropogenik. Sehingga, untuk mempelajari proyeksi kenaikan muka air laut di Pulau Enggano. Dilakukan analisis hasil model iklim jangka panjang (2020-2150) dengan tujuh skenario yang berbasis *Shared Socioeconomic Pathways*, atau secara sederhana skenario tersebut dipengaruhi oleh kebijakan-kebijakan yang berujung pada pengaturan perilaku antropogenik.

Prediksi Kenaikan Muka Air Laut rata-rata di Pulau Enggano

Gambar 5. menunjukkan proyeksi kenaikan muka air laut rata-rata di perairan Pulau Enggano. Sebanyak tujuh skenario SSP yang dipilih dalam AR6 IPCC ditunjukkan pada Gambar 5. Proyeksi kenaikan muka air laut di perairan sekitar Pulau Enggano menunjukkan variasi yang tergantung pada skenario emisi gas rumah kaca/SSP. Pada tahun 2020, nilai kenaikan muka air laut berkisar dari 0,05 m untuk semua skenario (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, dan SSP5-8.5). Hal ini menunjukkan bahwa pada awal periode, dampak dari perubahan iklim belum terlihat langsung terhadap kenaikan muka air laut. Selanjutnya, proyeksi yang lebih lama menunjukkan tren peningkatan muka air laut seiring berjalanannya waktu.



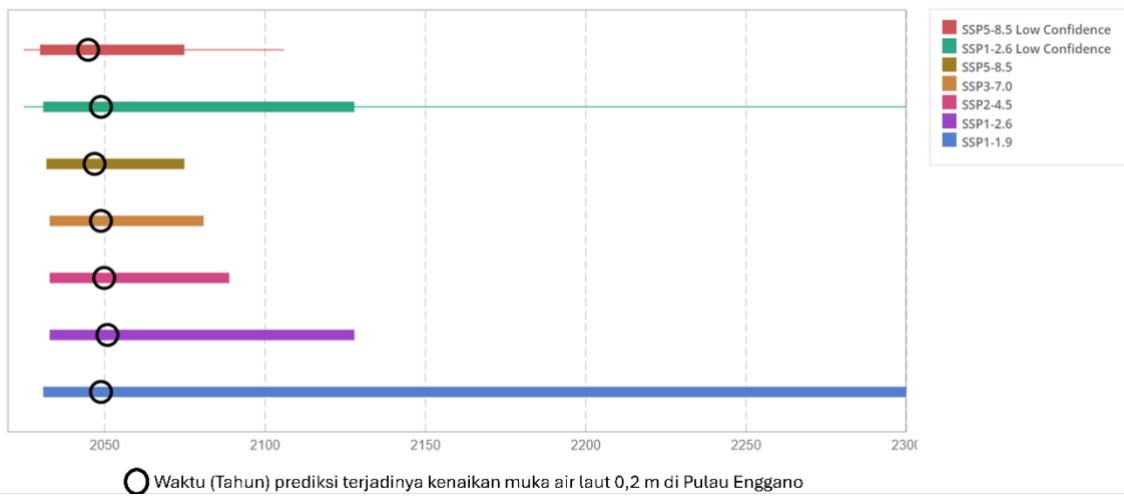
Gambar 2. Prediksi kenaikan muka air laut rata-rata di perairan sekitar Pulau Enggano dari 2020 – 2150 berdasarkan tujuh skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP)

Pada tahun 2050, kenaikan muka air laut bervariasi dari 0,20 m (SSP1-1.9) hingga 0,48 m (SSP5-8.5). Skenario SSP1-2.6 dan SSP2-4.5 menunjukkan masing-masing kenaikan sebesar 0,19 dan 0,20 m. Namun, pada tahun 2100, proyeksi menunjukkan peningkatan yang lebih besar, dengan nilai tertinggi mencapai 0,95 m untuk skenario SSP5-8.5. Selain itu, skenario SSP5-8.5 secara global menunjukkan peningkatan hingga mencapai 6 m. Meskipun rata-rata peningkatan muka air di Pulau Enggano relatif lebih rendah dari rata-rata global, upaya mitigasi untuk menghadapi dampak peningkatan muka air laut yang signifikan harus dilakukan.

Sementara itu, proyeksi pada tahun 2150 semakin tinggi, dengan estimasi tinggi muka air laut untuk skenario SSP1-2.6 mencapai 0,78 m dan untuk SSP5-8.5 mencapai hingga 2,17 m. Hal ini menekankan bahwa tanpa tindakan kolaboratif dan strategi yang jelas dalam pengurangan emisi gas rumah kaca, Pulau Enggano berisiko mengalami dampak yang sangat merugikan. Kenaikan muka air laut yang parah dapat mengancam tidak hanya ekosistem pesisir tetapi juga kehidupan masyarakat yang bergantung pada sumber daya alam di pulau tersebut.

Skenario yang lebih optimis, seperti SSP1-1.9, menunjukkan proyeksi yang paling rendah dengan kenaikan muka air laut yang relatif terkontrol. Meskipun kenaikan di bawah 0,30 m pada tahun 2100, hal tersebut tetap mengindikasikan bahwa penerapan kebijakan keberlanjutan, serta upaya mitigasi yang efektif, dapat membantu mengurangi dampak dari perubahan iklim dan menjaga keberlanjutan Pulau Enggano.

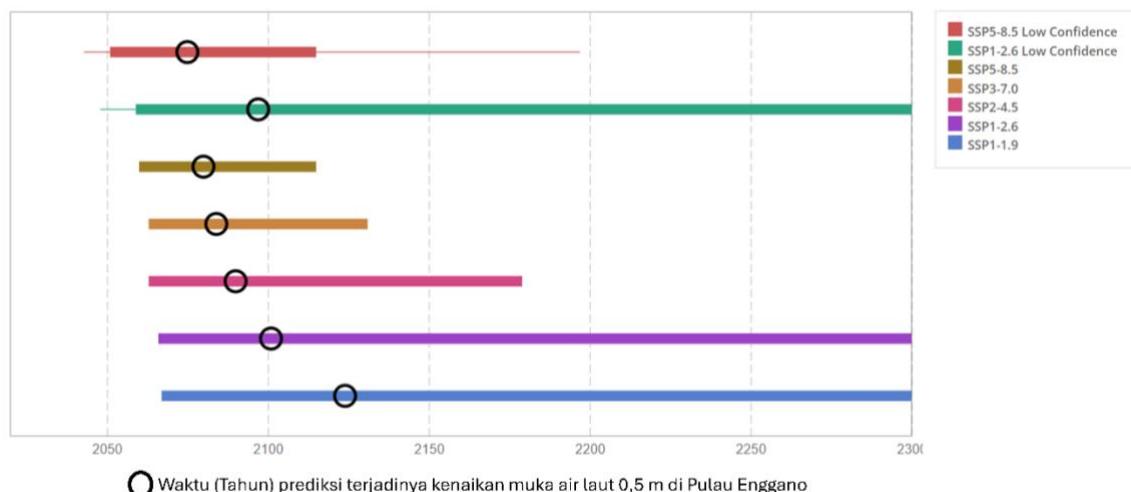
Dengan demikian, hasil proyeksi tinggi muka air laut memberikan gambaran tentang urgensi tindakan kolektif dalam mitigasi perubahan iklim. Kebijakan yang berfokus pada pengurangan emisi gas rumah kaca dan perlindungan sumber daya pesisir sangat penting untuk menjaga keberlangsungan hidup Pulau Enggano dan memastikan bahwa dampak negatif dari perubahan iklim dapat diminimalisasi. Oleh karena itu, kesadaran serta kolaborasi antara pemerintah, masyarakat, dan pihak terkait lainnya menjadi sangat krusial untuk menghadapi tantangan di masa depan.



Gambar 3. Prediksi waktu terjadinya kenaikan muka air laut 0,2 m di perairan Pulau Enggano berdasarkan tujuh skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP)

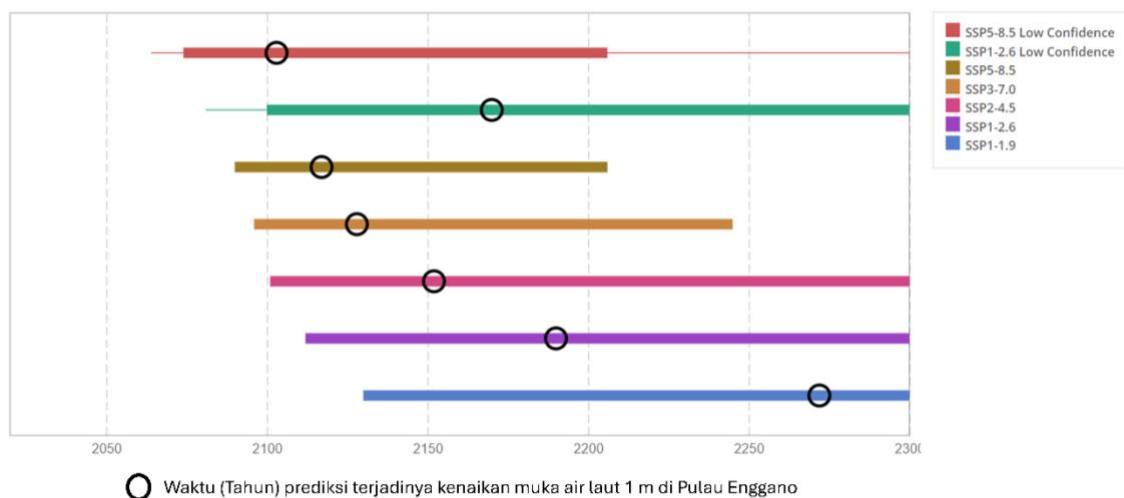
Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5 menunjukkan prediksi waktu terjadinya kenaikan muka air laut sebesar 0,2 m, 0,5 m, dan 1,0 m di perairan Pulau Enggano berdasarkan tujuh skenario Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Dalam grafik tersebut, sumbu horizontal menunjukkan waktu dalam tahun, sedangkan sumbu vertikal menggambarkan berbagai skenario yang berbeda.

Berdasarkan **Gambar 3**, terlihat bahwa sebagian besar skenario memproyeksikan waktu terjadinya kenaikan muka air laut sebesar 0,2 meter pada sekitar tahun 2050. Titik-titik yang dilingkari hitam menunjukkan tahun kejadian untuk kenaikan 0,2 meter. Kecuali untuk skenario SSP1-1.9, SSP2-4.5, SSP3-7.0, dan SSP5-8.5, menunjukkan prediksi kenaikan tersebut terjadi pada tahun 2050. Ini menunjukkan bahwa dengan mempertimbangkan skenario emisi yang berbeda, dampak awal dari kenaikan muka air laut dapat terasa secara bersamaan pada tahun 2050.



Gambar 4. Prediksi waktu terjadinya kenaikan muka air laut 0,5 m di perairan Pulau Enggano berdasarkan lima skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP)

Kemudian, **Gambar 4** memperlihatkan bahwa kenaikan muka air laut sebesar 0,5 m, diproyeksikan akan terjadi pada 2080 untuk skenario SSP5-8.5 dan SSP5-8.5 low confidence. Kemudian satu decade mendatang dicapai oleh skenario SSP2-4.5 dan SSP3-7.0. Selanjutnya, pada tahun 2100 diperkirakan hampir semua skenario menunjukkan peningkatan muka air laut di Pulau Enggano hingga 0,5 m kecuali skenario SSP1-1.9. Skenario tersebut sangat optimis, terlihat baru akan mencapai 0,5 m sekitar tiga decade berikutnya.

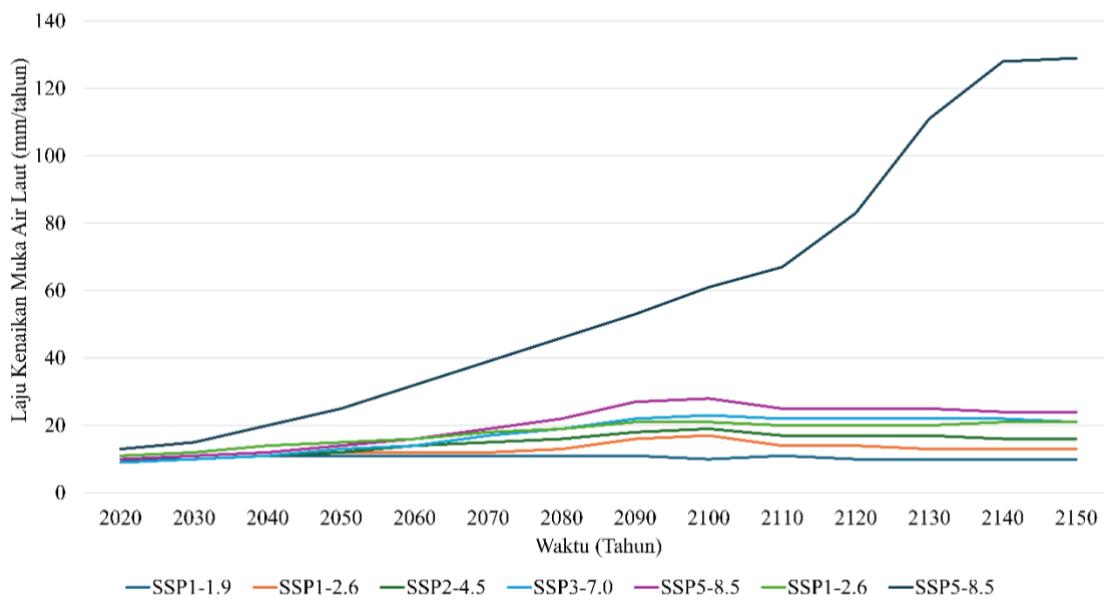


Gambar 5. Prediksi waktu terjadinya kenaikan muka air laut 1,0 m di perairan Pulau Enggano berdasarkan lima skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP)

Gambar 5 menunjukkan kenaikan muka air laut hingga 1 m di Perairan Pulau Enggano. Itu paling cepat terjadi pada skenario SSP5-8.5 Low confidence, sementara untuk yang SSP5-8.5 itu baru mencapai kenaikan 0,8 m pada 2100. Kemudian baru pada tiga puluh tahun mendatang SSP5-8.5 dan SSP3-7.0 mencapai kenaikan 1 m. Selain itu, empat skenario lainnya yaitu SSP1-2.6 low confident, SSP1-2.6, SSP1-1.9, dan SSP2-4.5 tidak pernah mencapai 1 m hingga akhir simulasi yaitu tahun 2150.

Prediksi Laju Kenaikan Muka Air Laut rata-rata di Pulau Enggano

Gambar 6. menunjukkan laju kenaikan muka air laut dari tahun ke tahun berdasarkan tujuh skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) dari tahun 2020 hingga 2150. Skenario-skenario ini mencakup SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5, serta dua skenario dengan tingkat keyakinan rendah (Low Confidence).



Gambar 6. Prediksi laju kenaikan muka air laut di perairan Pulau Enggano berdasarkan lima skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) tahun 2020-2150

Skenario SSP1-1.9 menunjukkan pola yang paling optimis, dimulai dengan kenaikan 10 mm/tahun pada tahun 2020 yang tetap stabil hingga 2030 dan hanya mencapai 11 mm/tahun pada tahun 2040. Laju kenaikan ini bertahan di level 11 mm/tahun hingga tahun 2050 dan menunjukkan

tidak ada pertumbuhan signifikan hingga 2150. Ini mencerminkan upaya mitigasi yang kuat yang mampu menahan dampak dari perubahan iklim yang sedang berlangsung.

Sebaliknya, skenario SSP1-2.6 menunjukkan peningkatan yang lebih moderat, dimulai dari 9 mm/tahun dan mencapai 12 mm/tahun pada tahun 2050. Kenaikan ini mencapai 13 mm/tahun pada tahun 2150. Meskipun ada upaya mitigasi, skenario ini masih mencatat laju kenaikan yang lebih tinggi dibandingkan SSP1-1.9, menandakan tantangan yang terus muncul terkait peningkatan emisi gas rumah kaca.

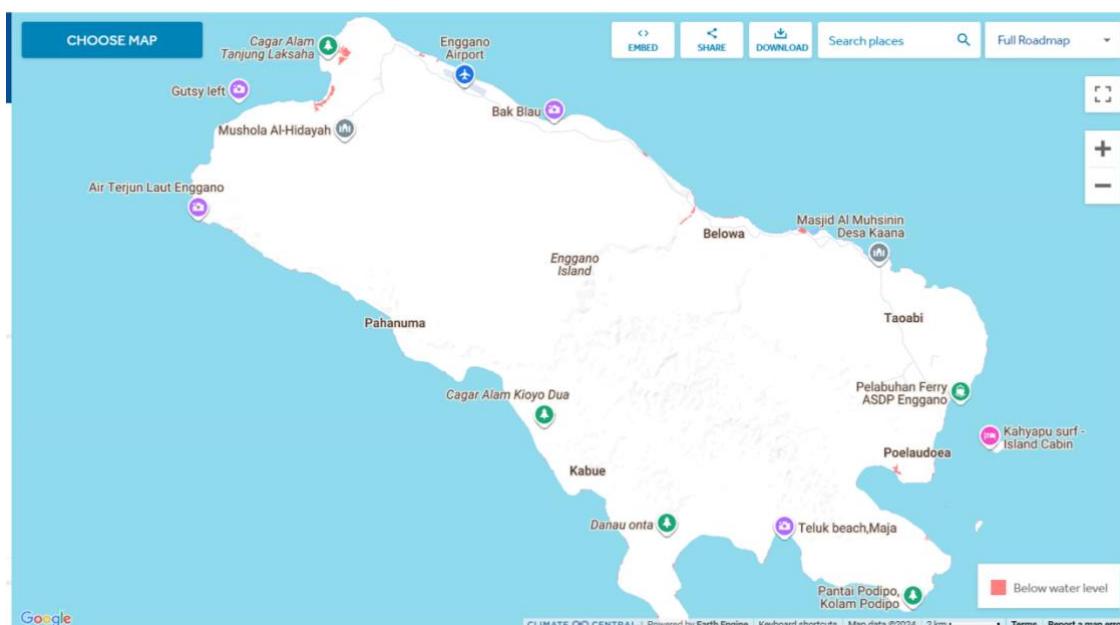
Skenario SSP2-4.5 dan SSP3-7.0 menunjukkan laju pertumbuhan yang lebih tinggi, dengan SSP2-4.5 mulai dari 9 mm/tahun dan mencapai 16 mm/tahun pada tahun 2150. Skenario SSP3-7.0 menunjukkan laju kenaikan muka air laut yang lebih pesimis dengan laju kenaikan mencapai 22 mm/tahun pada tahun 2100 dan tetap di level 21 mm/tahun pada tahun 2150. Pertumbuhan ini mencerminkan proyeksi yang lebih realistik dalam konteks dampak emisi yang sedang berlangsung.

Skenario dengan emisi tinggi, terutama SSP5-8.5, menunjukkan pola laju kenaikan yang paling ekstrim. Dimulai dari 10 mm/tahun pada tahun 2020, skenario ini menunjukkan angka laju kenaikan cepat membesar hingga 24 mm/tahun pada tahun 2150. Sementara itu, skenario SSP1-2.6 Low Confidence dan SSP5-8.5 Low Confidence juga menunjukkan laju kenaikan sangat ekstrim, dengan proyeksi akhir sebesar 129 mm/tahun pada tahun 2150. Hal tersebut menunjukkan angka yang paling tinggi oleh karena proyeksi skenario paling ekstrim. Sehingga, dengan demikian laju kenaikan muka air laut ini menggarisbawahi urgensi tindakan kolektif untuk mengurangi emisi gas rumah kaca.

Beberapa penelitian menyebutkan bahwa secara umum laju kenaikan muka air laut di Indonesia adalah 4 mm/tahun (Fenoglio-Marc et al., 2012), kemudian sumber lain menyebutkan juga 5,82 mm/tahun (Nababan et al., 2015). Angka tersebut hampir dua kali lipat dari laju peningkatan muka air laut global. Dengan demikian laju peningkatan muka air laut di perairan Pulau Enggano hampir dua kali lebih besar dari rata-rata Indonesia. Hal tersebut mengindikasikan adanya faktor lain seperti efek samudra/lautan luas.

Prediksi Daerah Rendaman Pesisir akibat Kenaikan Muka Air Laut di Pulau Enggano

Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9 menunjukkan dampak banjir permanen akibat kenaikan muka air laut di pesisir Pulau Enggano berdasarkan skenario terparah dari *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) untuk tahun 2050, 2100, dan 2150. Setiap peta menunjukkan tingkat risiko yang semakin meningkat terhadap kehidupan dan infrastruktur di Pulau Enggano.

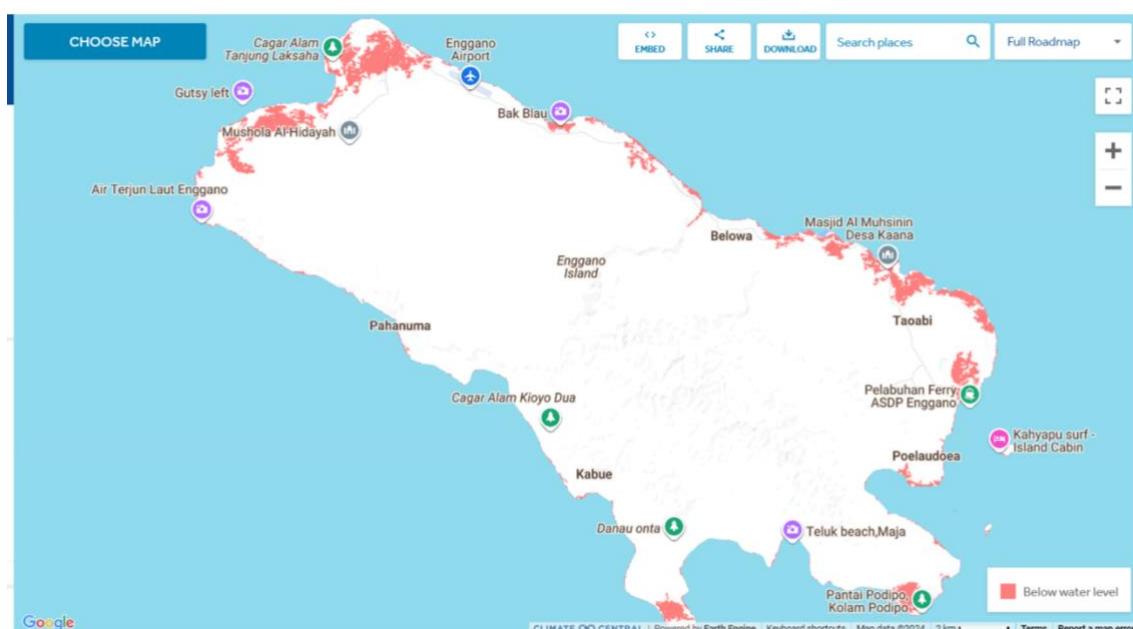


Gambar 7. Prediksi daerah terdampak banjir permanen akibat kenaikan muka air laut berdasarkan skenario terparah dari *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) tahun 2050 di pesisir Pulau Enggano

Pada **Gambar 7**, proyeksi untuk tahun 2050 menunjukkan area yang terendam sebagai dampak awal dari kenaikan muka air laut. Meskipun beberapa wilayah pesisir mulai terancam, peta tersebut memperlihatkan bahwa dampak tersebut masih terbatas, dengan beberapa lokasi penting seperti kantor desa, pelabuhan, dan bandara tetap memiliki akses. Namun, ini adalah tanda peringatan bahwa risiko mulai muncul, dan jika tidak ada tindakan mitigasi yang diambil, dampak ini akan semakin meluas di tahun-tahun mendatang. Seperti Cagar Alam Tanjung Laksaha sudah mulai ada yang terendam/banjir permanen.

Setelah itu, **Gambar 8** menunjukkan proyeksi situasi pada tahun 2100, dengan area yang terdampak banjir permanen meningkat secara signifikan. Di sini, banyak area pesisir, lokasi wisata, dan fasilitas umum seperti pelabuhan feri, Masjid Al Muhsinin desa Kaana, cagar alam Tanjung Laksaha menjadi sangat rentan, dengan akses ke daratan mulai hilang. Peta tersebut jelas menunjukkan bahwa jika tren kenaikan muka air laut terus berlanjut, dampak negatif terhadap ekosistem dan komunitas pesisir akan jauh lebih parah dibandingkan dengan proyeksi sebelumnya. Hal ini menyoroti pentingnya perencanaan yang serius dan upaya adaptasi untuk melindungi masyarakat serta lingkungan.

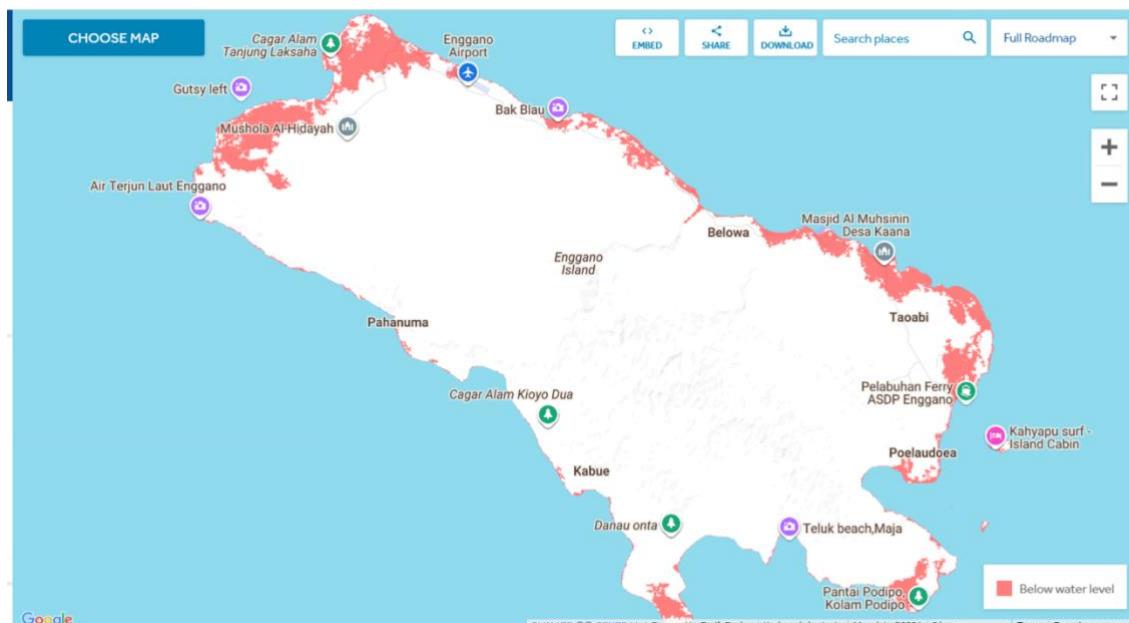
Perencanaan lingkungan penting dilakukan mengingat kekayaan keanekaragaman hayati, terutama di cagar alam Tanjung Laksaha. Cagar alam ini memiliki ekosistem mangrove yang terdiri dari 16 jenis mangrove yang didominasi oleh *Rhizophora apiculata*, *Bruguiera gymnorhiza*, dan *Sonneratia alba* (PEH BKSDA Bengkulu, 2011). Selain itu, cagar alam Tanjung Laksaha juga merupakan habitat bagi burung-burung endemik, seperti Burung Hantu Enggano (*Otus enganensis*), Kacamata Enggano (*Zosterops salvadorii*) Anis Enggano (*Zoothera leucolaema*), Betet Ekor Panjang (*Psittacula longicauda*), dan Beo Enggano (*Gracula religiosa*) (Maryanto et al., 2017).



Gambar 8. Prediksi daerah terdampak banjir permanen akibat kenaikan muka air laut berdasarkan skenario terparah dari *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) tahun 2100 di pesisir Pulau Enggano

Gambar 9, yang memprediksi kondisi untuk tahun 2150, memperlihatkan dampak yang paling parah dan luas. Hampir seluruh bagian utara dan timur Pulau Enggano diprediksi akan mengalami banjir permanen, dengan lebih banyak wilayah yang sebelumnya aman kini diproyeksi menjadi di bawah permukaan air laut. Peta ini mencatat bahwa kondisi tersebut tidak hanya mengancam tempat tinggal dan infrastruktur, namun juga menghilangkan akses ke sumber daya yang vital, sehingga mengancam keberlanjutan hidup masyarakat di Pulau Enggano. Tak hanya itu, sebuah analisis mendalam mengenai implikasi jangka panjang diperlukan untuk memahami bagaimana hal ini dapat berkontribusi pada migrasi penduduk dan perubahan sosial-ekonomi di Pulau Enggano.

Secara keseluruhan, perbandingan antara **Gambar 7**, **Gambar 8**, dan **Gambar 9** menyoroti urgensi tindakan yang nyata untuk menanggapi ancaman dari kenaikan muka air laut. Tindakan mitigasi yang lebih nyata dan kebijakan adaptasi diperlukan untuk perlindungan infrastruktur, masyarakat, dan ekosistem yang ada di Pulau Enggano. Dengan melihat proyeksi kenaikan muka air laut dan dampaknya terhadap daerah rendaman, kolaborasi antara pemerintah, organisasi non-pemerintah, dan komunitas lokal menjadi sangat penting untuk membangun ketahanan dan memastikan bahwa masa depan Pulau Enggano tetap berkelanjutan dan bermanfaat bagi generasi mendatang.



Gambar 9. Prediksi daerah terdampak banjir permanen akibat kenaikan muka air laut berdasarkan skenario terparah dari *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) tahun 2150 di pesisir Pulau Enggano

KESIMPULAN

Dalam rentang waktu 2020 ke 2050, proyeksi kenaikan muka air laut menunjukkan angka yang relatif moderat. Kenaikan untuk skenario optimis seperti SSP1-1.9 adalah sekitar 0,2 m (200 mm), sedangkan SSP1-2.6 mencatatkan kira-kira 0,19 m (190 mm). Sementara itu, skenario pesimis seperti SSP5-8.5 menunjukkan kenaikan yang lebih signifikan, mencapai 0,28 m (280 mm). Secara keseluruhan, laju kenaikan pada periode ini berkisar antara 4 mm/tahun hingga 6 mm/tahun pada skenario yang lebih pesimis. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun dampak awal dari kenaikan muka air laut masih terbatas, perbedaan antara skenario optimis dan pesimis mulai terlihat.

Pada periode 2050 ke 2100, tren kenaikan muka air laut menjadi lebih ekstrim. Untuk skenario optimis seperti SSP1-1.9, proyeksi membawa kenaikan menjadi sekitar 0,4 m (400 mm). Namun, skenario pesimis menunjukkan kenaikan yang jauh lebih besar; SSP5-8.5 dapat mencapai 0,89 m (890 mm). Skenario ini mencerminkan peningkatan muka air laut yang jauh lebih cepat, dengan laju kenaikan mencapai 8 mm/tahun hingga 12 mm/tahun, mengindikasikan bahwa tanpa tindakan mitigasi yang efektif dan nyata, dampak dari perubahan iklim menjadi semakin nyata dan mengkhawatirkan.

Dalam lima dekade berikutnya, yaitu tahun 2100 ke 2150, proyeksi menunjukkan bahwa hampir seluruh pesisir Pulau Enggano berpotensi terendam, terutama di Pantai barat laut, utara, dan timur laut. Kenaikan muka air laut untuk skenario optimis seperti SSP1-2.6 diperkirakan menjadi sekitar 0,78 m (780 mm), sementara skenario pesimis seperti SSP5-8.5 dapat meningkat hingga 2,5 m (2500 mm). Pada periode ini, tren kenaikan terlihat semakin mencolok, dengan laju mencapai 10 mm/tahun hingga 20 mm/tahun bagi skenario yang lebih pesimis. Perbedaan yang

ekstrim antara skenario optimis dan pesimis pada periode ini menegaskan bahwa pilihan kebijakan emisi akan sangat mempengaruhi dampak yang mungkin terjadi.

Pengaruh kenaikan muka air laut berdasarkan proyeksi tahun 2050, 2100, dan 2150 terhadap pesisir Pulau Enggano juga telah dibahas. Proyeksi yang paling ekstrim terjadi pada tahun 2150. Peta rendaman menunjukkan bahwa hampir seluruh pesisir bagian utara dan timur Pulau Enggano berpotensi terendam banjir permanen. Hasil perbandingan ketiga peta tersebut menegaskan bahwa jika tindakan tidak diambil, dampak dari perubahan iklim akan memiliki konsekuensi yang menghancurkan bagi komunitas, infrastruktur, dan kawasan alami yang menjadi sumber kehidupan.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa pentingnya tindakan mitigasi yang lebih nyata, perencanaan tata ruang yang strategis, dan pengelolaan sumber daya yang bijaksana semakin mendesak untuk menghadapi tantangan yang kemungkinan timbul akibat perubahan iklim. Dalam konteks ini, kolaborasi antara pemerintah, masyarakat, dan ilmuwan sangat diperlukan untuk mengembangkan strategi adaptasi yang efektif. Upaya ini harus berfokus pada perlindungan kehidupan, infrastruktur, dan ekosistem di Pulau Enggano demi memastikan keberlanjutan masa depan dan mengurangi kerentanan terhadap ancaman yang semakin meningkat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Penelitian, Pengabdian Masyarakat, dan Inovasi (PPMI) Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian (FITB) dengan nomor pendanaan FITB.PPMI-1-31-2025 yang berjudul 'Analisis dan Prediksi Dinamika Tinggi Muka Air Laut di Paparan Sunda Menggunakan Algoritma Machine Learning'. Serta ucapan terima kasih untuk NASA Sea Level Projection Tool yang dikembangkan oleh NASA, Coastal Risk Screening Tool dari Climate Central, dan The IPCC yang telah menyediakan data dan *tool* pengolahannya sehingga makalah ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustini, N. T., Ta'aladin, Z., & Purnama, D. 2016. Struktur Komunitas Mangrove di Desa Kahyapu Pulau Enggano. *Jurnal Enggano*. 1(1): 19-31. <https://doi.org/10.31186/jenggano.1.1.19-31>
- Anwar, I. P., Wilopo, M. D., & Atmojo, A. T. 2021. Analisis Karakteristik Arus Laut dan Transport Massa Air di Perairan Sekitar Pulau Enggano dengan Menggunakan Model Numerik 3D. *Jurnal Enggano*. 6(2): 223–237. <https://doi.org/10.31186/jenggano.6.2.%25p>
- Ariasari, A., Wilopo, M. D., Muqsit, A., Mahfudz, A. A., & Ikhsan, M. N. 2024. Sosialisasi Penyusunan Leaflet Sebagai Media Promosi Wisata Bahari Kelompok Sadar Wisata Podipo Desa Kahyapu Pulau Enggano. *Jurnal Masyarakat Mandiri*. 8(3): 3201–3212. <https://doi.org/10.31764/jmm.v8i3.22496>
- Bamber, J. L., Oppenheimer, M., Kopp, R. E., Aspinall, W. P., & Cooke, R. M. 2019. Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 116(23): 11195–11200. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817205116>
- Bernawis, L.I., Anwar, I.P., Bayhaqi, A., Wahyudi, A.J., Putri, M.R., dan Fadli, M. 2019. Estimation of Sea-Air CO₂ Exchange at Simeulue Sea during Summer Asian Monsoon. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 11(3), 713-720. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v11i3.22662>
- Cahyarini, S.Y., Pfeiffer, M., Reuning, L., Liebetrau, V., Dullo, W.-C., Takayanagi, H., Anwar, I.P., Utami, D.A., Garbe-Schönberg, D., Hendrizan, M., dan Eisenhauer, A. 2021. Modern and sub fossil corals suggest reduced temperature variability in the eastern pole of the Indian Ocean Dipole during the medieval climate anomaly. *Sci. Rep.* 11, 14952. <https://doi.org/10.1038/s41598-021>
- Dari, S. W., Prabowo, A., & Raibowo, S. 2022. Potensi Perkembangan Pariwisata Olahraga (Sport Tourism) di Kecamatan Enggano, Kabupaten Bengkulu Utara, Provinsi Bengkulu. *Sport Gymnastics: Jurnal Ilmiah Pendidikan Jasmani*. 3(2): 288–300. <https://doi.org/10.33369/gymnastics>.
- DeConto, R. M., Pollard, D., Alley, R. B., Velicogna, I., Edwards, E., Gomez, N., Sadai, S., Condron, A., Gilford, D. M., Kopp, R. E., Li, D., & Dutton, A. 2021. The Paris Climate

- Agreement and future sea-level rise from Antarctica. *Nature*. 593: 83–89. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03427-0>.
- Fenoglio-Marc, L., Schöne, T., Illigner, J., Becker, M., Manurung, P., & Khafid. 2012. Sea level change and vertical motion from satellite altimetry, tide gauges and GPS in the Indonesian region. *Marine Geodesy*. 35(SUPPL. 1): 137–150. 10.1080/01490419.2012.718682.
- Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slanger, and Y. Yu, 2021: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>.
- Garner, G. G., T. Hermans, R. E. Kopp, A. B. A. Slanger, T. L. Edwards, A. Levermann, S. Nowikci, M. D. Palmer, C. Smith, B. Fox-Kemper, H. T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S. S. Drijfhout, T. L. Edwards, N. R. Golledge, M. Hemer, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I. S. Nurhati, L. Ruiz, J-B. Sallée, Y. Yu, L. Hua, T. Palmer, B. Pearson, 2021. IPCC AR6 Sea Level Projections. Version 20210809. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5914709>.
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- Kouakou, M., Tiémélé, J. A., Djakoua, É., & Gnandi, K. 2023. Assessing potential coastal flood exposure along the Port-Bouët Bay in Côte d'Ivoire using the enhanced bathtub model. *Environmental Research Communications*. 5: 105001. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/acfdfa>
- Kulp, S. A., & Strauss, B. H. 2019. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Communications*. 10: 4844. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12808-z>.
- Kulp, S. A., & Strauss, B. H. 2024. CoastalDEM v3.0: Improving fully global coastal elevation predictions through a convolutional neural network and multi-source DEM fusion. *Climate Central Scientific Report*. (February): 1–21.
- Maryanto, I., Hamidy, A., Keim, A.P., Sihotang, F.B.L., Lupiyaningdyah, P., Irham, M., & Ardiyani, M. 2017. *Ekspedisi Pulau Enggano*. LIPI Press. 180 p.
- Nababan, B., Hadianti, S., & Natih, N. M. N. 2015. Dinamika Anomali Parars Laut Perairan Indonesia. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*. 7(1): 259–272. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v7i1.9943>.
- PEH BKSDA Bengkulu. 2011. Kawasan Konservasi Enggano. BKSDA Bengkulu. 56 p.
- Senoaji, G. 2009. Daya Dukung Lingkungan dan Kesesuaian Lahan dalam Pengembangan Pulau Enggano Bengkulu. *Jurnal Bumi Lestari*. 9(2): 159–166.
- Utami, R.T., Elvina, W., Sugara, A., Anggoro, A., Triandiza, T., & Hasidu, L.O.A.F. 2023. Studi Kerapatan dan Penutupan Jenis Lamun di Perairan Enggano, Bengkulu. *JOINT-FISH*. 6(2): 199-209. <https://doi.org/10.33096/joint-fish.v6i2.263>
- Wilopo, M.D., Utami, M.A.F.U, Harefa, F., Santoso, H., Vandana, E., Permanda, E.E., Rahman, Z.A. 2022. Identifikasi Jenis Ikan Terumbu Pada Ekosistem Terumbu Karang di Perairan Desa Malakoni Pulau Enggano. *Jurnal Enggano*. 7(1): 79-91. <https://doi.org/10.31186/jenggano.7.1.79-91>
- Zamodial, Muqsit, A., & Wulandari, U. 2020. Pemetaan Daerah Penangkapan Ikan (Fishing Ground) Nelayan Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu. *Jurnal Enggano*. 5(2): 205–218. <https://doi.org/10.31186/jenggano.5.2.205-218>.