

# Pemodelan Dinamis Kerentanan Sosial Daerah Rawan Rob di Kecamatan Penjaringan, Jakarta Utara

Imam Hidayat<sup>1</sup>, Henita Rahmayanti<sup>2</sup>, Dian Alfia Purwandari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Manajemen Lingkungan, Pascasarjana Universitas Negeri Jakarta

<sup>2</sup> Manajemen Lingkungan, Pascasarjana Universitas Negeri Jakarta

<sup>3</sup> Manajemen Lingkungan, Pascasarjana Universitas Negeri Jakarta

|                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Received</i><br>28 November 2025                                 | <b>Abstrak</b><br>Penelitian ini bertujuan menganalisis kerentanan sosial masyarakat Kecamatan Penjaringan terhadap banjir rob melalui pemodelan dinamik dan menilai efektivitas peningkatan Indeks Ketahanan Daerah (IKD) sebagai strategi pengurangan risiko. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif berbasis sistem dinamis dengan data sekunder dari BPS, BMKG, NASA <i>Sea Level Change Portal</i> , BPBD, Satu Data Jakarta, dan studi subsidiensi. Model dibangun menggunakan Powersim 10 berdasarkan kerangka <i>Vulnerability Scoping Diagram</i> yang mengintegrasikan indeks keterpaparan, sensitivitas, dan ketahanan daerah. Validasi model menunjukkan MAPE 6,15%, AME 5,61%, dan AVE 16,45%, sehingga model layak untuk simulasi. Uji sensitivitas menunjukkan bahwa peningkatan keterpaparan menaikkan indeks kerentanan, sedangkan peningkatan kapasitas menurunkannya. Skenario komprehensif peningkatan IKD menghasilkan reduksi kerentanan terbesar hingga 25,71 poin pada 2045. Penelitian ini memperkuat teori kerentanan sosial dan mendukung kebijakan adaptasi pesisir berbasis ketahanan daerah.<br><b>Kata kunci:</b> kerentanan sosial, pemodelan dinamis, VSD, Indeks Ketahanan Daerah, Penjaringan                                                    |
| <i>Revised</i><br>5 Desember 2025                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <i>Accepted</i><br>24 Desember 2025                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <i>*Correspondence</i><br>Imam Hidayat<br>Email: mamhid89@gmail.com | <b>Abstract</b><br><i>This study aims to analyze the social vulnerability of the community in Penjaringan Subdistrict to tidal flooding through dynamic modeling and to assess the effectiveness of improving the Regional Resilience Index (IKD) as a risk reduction strategy. The study employs a descriptive quantitative approach based on dynamic systems, using secondary data from BPS, BMKG, the NASA Sea Level Change Portal, BPBD, Satu Data Jakarta, and subsidence studies. The model was built using Powersim 10 based on the Vulnerability Scoping Diagram framework, which integrates the regional exposure, sensitivity, and resilience indices. Model validation showed a MAPE of 6.15%, an AME of 5.61%, and an AVE of 16.45%, indicating that the model is suitable for simulation. Sensitivity tests show that an increase in exposure raises the vulnerability index, while an increase in capacity lowering it. A comprehensive scenario of increased IKD results in the greatest reduction in vulnerability—up to 25.71 points by 2045. This study strengthens social vulnerability theory and supports coastal adaptation policies based on regional resilience.</i><br><b>Keywords:</b> social vulnerability, dynamic modeling, VSD, Regional Resilience Index, Penjaringan. |

## PENDAHULUAN

Kenaikan muka laut, penurunan muka tanah, gelombang ekstrem, dan pasang surut meningkatkan risiko sosial di

kawasan pesisir perkotaan. IPCC melaporkan bahwa muka laut rata-rata global naik sekitar 0,20 m pada 1901-2018, dan lajunya meningkat menjadi 3,7

mm per tahun pada 2006-2018 (Lee et. al, 2023). Studi satelit terbaru juga menunjukkan bahwa muka laut global naik 111 mm sejak 1993 hingga 2023 (Hamlington et al. 2024). Masalah ini lebih serius di Jakarta Utara karena kenaikan muka laut terjadi bersama penurunan muka tanah. Harintaka et al. (2024) menunjukkan bahwa Jakarta masih mengalami subsidensi aktif pada 2017-2022, dengan laju maksimum di Jakarta Utara mencapai sekitar -8,47 cm per tahun. Kondisi ini memperkuat keterpaparan Kecamatan Penjaringan terhadap banjir pesisir dan banjir rob. Secara demografis, Penjaringan memiliki 331.955 penduduk pada 2023, kepadatan 9.358,75 jiwa/km<sup>2</sup>, dan Kelurahan Penjaringan menjadi konsentrasi penduduk terbesar dengan kepadatan 29.131,65 jiwa/km<sup>2</sup>. Kelompok umur rentan, yaitu usia 0-14 tahun dan 60 tahun ke atas, mencapai sekitar 111.317 jiwa atau 33,6% dari total penduduk menurut kelompok umur (BPS, 2024). Angka ini menunjukkan bahwa risiko pesisir bukan hanya persoalan fisik, tetapi juga persoalan kerentanan sosial

Penelitian terdahulu banyak menilai kerentanan pesisir melalui indeks statis, pemetaan spasial, atau pembobotan multi-kriteria. As-syakur et al. (2023) menegaskan bahwa kerentanan pesisir

Jakarta perlu dilihat dari gabungan kenaikan muka laut dan subsidensi. Lumban-Gaol et al. (2024) menunjukkan bahwa integrasi kenaikan muka laut dan penurunan tanah menghasilkan penilaian banjir pesisir yang lebih komprehensif. Gunandar et al. (2024) menemukan bahwa kerentanan permukiman pesisir Kalibaru, Jakarta Utara, berada pada kategori sedang, dengan kapasitas adaptif sebagai unsur penting. Namun, studi tersebut belum banyak menguji hubungan dinamis antara keterpaparan, sensitivitas sosial, dan ketahanan daerah dalam satu model simulasi jangka panjang. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan membangun model dinamis kerentanan sosial berbasis Vulnerability Scoping Diagram atau VSD dan modifikasi Tahir, dengan memasukkan Indeks Ketahanan Daerah atau IKD sebagai faktor kapasitas. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis struktur hubungan antara indeks keterpaparan, indeks sensitivitas, dan indeks ketahanan daerah terhadap perubahan indeks kerentanan sosial di Kecamatan Penjaringan pada periode 2025-2045. Hipotesis penelitian menyatakan bahwa peningkatan keterpaparan dan sensitivitas menaikkan kerentanan sosial, sedangkan peningkatan IKD menurunkan kerentanan sosial. Pertanyaan penelitian berfokus pada

bagaimana struktur model dibangun, bagaimana arah perubahan indeks kerentanan sosial pada skenario simulasi, dan seberapa sensitif model terhadap perubahan komponen ketahanan daerah.

Konsep *Vulnerability Scoping Diagram* (VSD) memandang kerentanan sebagai hasil interaksi tiga dimensi utama, yaitu keterpaparan, sensitivitas, dan kapasitas adaptif (Robielos et al., 2020). Dalam penelitian ini, keterpaparan atau IE menggambarkan tekanan fisik pesisir yang berasal dari kenaikan muka laut atau SLR, tunggang pasang, gelombang maksimum, dan subsidensi. Sensitivitas atau IS menggambarkan kondisi sosial yang memperbesar dampak, yaitu kepadatan penduduk, rasio jenis kelamin, rasio kelompok umur rentan, dan pertumbuhan penduduk. Ketahanan daerah atau IC/IKD menggambarkan kapasitas kelembagaan dan kebijakan penanggulangan bencana melalui tujuh prioritas IKD, yaitu kebijakan dan kelembagaan, pengkajian risiko dan perencanaan terpadu, sistem informasi, diklat dan logistik, penanganan tematik kawasan rawan bencana, pencegahan dan mitigasi, kesiapsiagaan dan penanganan darurat, serta pemulihan bencana (BNPB, 2024). Modifikasi Tahir menempatkan kerentanan sebagai fungsi dari keterpaparan, sensitivitas, dan kapasitas adaptif, sehingga peningkatan

kapasitas adaptif menekan nilai kerentanan (Tahir et al., 2010). Tiga studi terdahulu mendukung landasan ini. Robielos et al. (2020) menggunakan VSD untuk menyusun kerangka penilaian kerentanan bencana pada tingkat rumah tangga, barangay, dan kota. Paharuddin dan Alham (2023) memakai VSD untuk menilai kerentanan pesisir melalui dimensi exposure, sensitivity, dan adaptive capacity. Gunandar et al. (2024) membuktikan bahwa kerentanan banjir permukiman pesisir Jakarta perlu dibaca dari keterpaparan, sensitivitas, dan kapasitas adaptif. Perbedaannya, penelitian ini tidak berhenti pada indeks statis, tetapi mengembangkan stock flow diagram dengan Powersim 10 agar perubahan penduduk, tekanan fisik pesisir, dan kapasitas daerah dapat disimulasikan lintas waktu. Kerangka konseptual yang digunakan adalah IE dan IS meningkatkan indeks kerentanan sosial, sedangkan IC/IKD menekan kerentanan melalui fungsi kapasitas.

## METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan desain kuantitatif deskriptif dengan pendekatan pemodelan dinamis. Unit analisis adalah Kecamatan Penjaringan, Jakarta Utara. Data yang digunakan merupakan data sekunder periode historis 2015-2024 dan

periode simulasi 2025-2045. Data demografi meliputi jumlah penduduk, kelahiran, kematian, kepadatan penduduk, rasio jenis kelamin, dan kelompok umur rentan yang bersumber dari BPS dan Satu Data Jakarta sebagai indikator pembentuk variabel sensitivitas (IS). Data bahaya pesisir meliputi SLR, tunggang pasang, gelombang maksimum, dan subsidensi bertindak sebagai indikator pembentuk variabel keterpaparan (IE). Data SLR diperoleh dari NASA Sea Level Change Portal, yang menyediakan proyeksi dan data perubahan muka laut berbasis IPCC AR6 (NASA, 2024). Data gelombang dan parameter maritim diperoleh dari BMKG, termasuk layanan data online dan informasi tinggi gelombang maritim. Data subsidensi mengacu pada Harintaka et al. (2024). Data ketahanan daerah diperoleh dari BPBD yakni dokumen KRB 2022-2025 yang memuat 7 prioritas kunci untuk mengukur kapasitas daerah. Model dibangun menggunakan Powersim 10 dengan struktur *stock flow diagram*. Stok flow utama adalah jumlah penduduk. Aliran masuk adalah kelahiran, sedangkan aliran keluar adalah kematian. Variabel bantu meliputi pertumbuhan penduduk, kepadatan penduduk, rasio jenis kelamin, rasio usia rentan, SLR, ketinggian pasang, gelombang maksimum, dan subsidensi. Yang secara bersama sama membentuk

variabel IE, IS, IC, dan IK. Formulasi umum mengikuti fungsi:  $IK = f(IE, IS, IC)$ , dengan arah hubungan IE dan IS positif terhadap kerentanan, sedangkan IC negatif terhadap kerentanan. Indeks kerentanan juga dirujuk dari Tahir (2010), yang merupakan fungsi kombinasi dari ketiga dimensi tersebut yang kemudian dinyatakan dalam bentuk persamaan bentuk operasional, model yang dinyatakan sebagai berikut:

$$IK = \frac{IS \times IE}{IC} \quad (1)$$

Kemudian variabel pembentuk IK pada persamaan (1) dimodifikasi pembobotan menurut Chandra K et. al (2013), setelah seluruh data indikator variabel dinormalisasi menjadi skor komposit 1-5 menggunakan rumus umum normalisasi skoring:

$$\text{Skor} = 1 + 4\left(\frac{Di - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}}\right) \quad (2)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} IE &: 0,402*PT + 0,200*SL + \\ &\quad 0,256*TAPI_v + 0,131*GP \\ IS &: 0,571*KD + 0,286*(RG*RR) \\ &\quad + 0,143*PP \\ IC &: 0,143*(C1+C2+C3+C4 \\ &\quad + C5+C6+C7) \end{aligned}$$

Keterangan:

IE : indeks keterpaparan  
IS : indeks sensitivitas  
IC : indeks kapasitas

- Di : data ke-i  
Dmin : data minimum  
Dmax : data maksimum  
PT : laju penurunan tanah  
SL : laju kenaikan muka laut  
TP : tinggi pasang  
GP : gelombang maksimum  
KD : kepadatan penduduk  
RG : rasio gender  
RR : rasio usia rentan  
PP : pertumbuhan penduduk  
C1 : Perkuatan Kebijakan dan Kelembagaan  
C2 : Pengkajian Risiko dan Perencanaan  
C3 : Pengembangan Sistem Informasi, Diklat dan Logistik  
C4 : Penanganan Tematik Kawasan Rawan Bencana  
C5 : Peningkatan Efektivitas Pencegahan dan Mitigasi Bencana  
C6 : Perkuatan Kesiapsiagaan dan Penanganan Darurat Bencana  
C7 : Pengembangan Sistem Pemulihan Bencana

Dari model konseptual di atas dikonversi menjadi *Causal Loop Diagram* (CLD), selanjutnya dibentuk model simulasi menggunakan perangkat lunak Powersim 10. Konversi ini dilakukan untuk mengubah hubungan sebab-akibat antarvariabel menjadi struktur model yang

dapat dihitung secara kuantitatif melalui komponen stock, flow, auxiliary variable, dan constant. Verifikasi model dilakukan melalui pemeriksaan struktur, satuan, tanda hubungan kausal, dan konsistensi persamaan. Validasi perilaku dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi 2015-2024 terhadap data historis menggunakan *Mean Absolute Percentage Error*, *Absolute Mean Error*, *Absolute Variance Error*, serta uji kesesuaian pola. Uji sensitivitas dilakukan dengan mengubah nilai parameter kunci pada IE, dan IC untuk melihat perubahan output IK sesuai dengan teori.. Validasi dan sensitivitas menjadi bagian penting dalam pemodelan sistem dinamis karena model harus dapat menjelaskan perilaku sistem, bukan hanya menghasilkan angka simulasi (Schwaninger, 2020). Powersim 10 dipilih karena mendukung pemodelan sistem dinamis, validasi satuan, perbandingan skenario, serta analisis risiko dan ketidakpastian.

Verifikasi struktur dilakukan untuk menunjukkan bahwa hubungan antarvariabel sudah konsisten dengan teori VSD. IE dan IS ditempatkan sebagai faktor yang meningkatkan kerentanan, sedangkan IC/IKD ditempatkan sebagai faktor pengurang kerentanan. Verifikasi dimensi memastikan bahwa semua variabel telah dinormalisasi sebelum

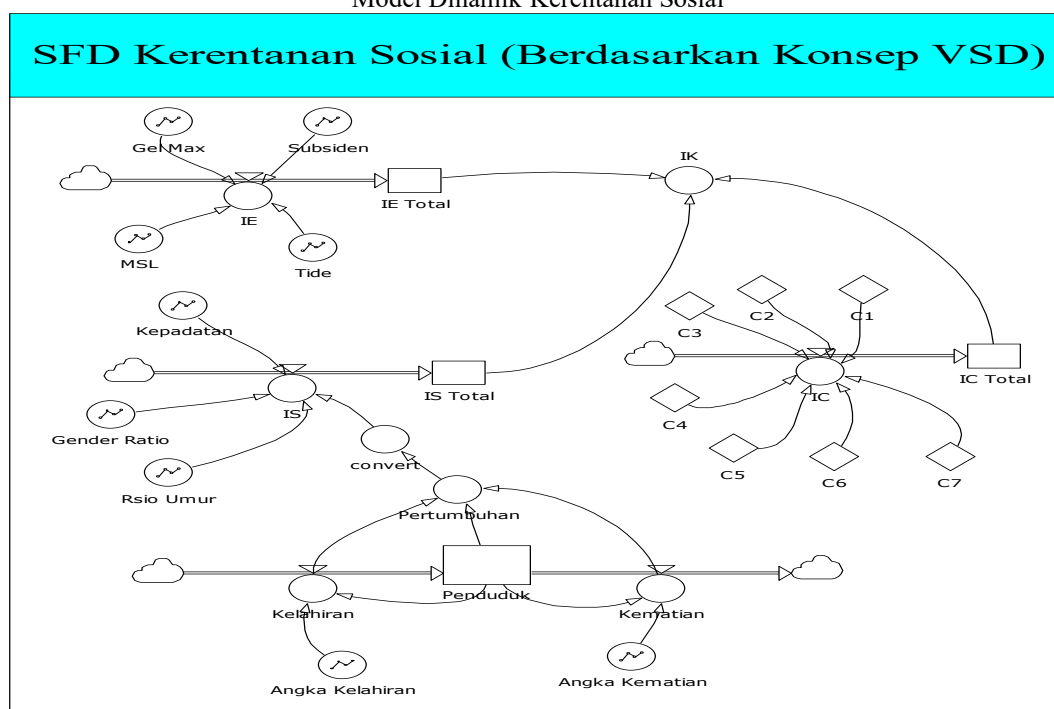
masuk ke persamaan indeks. Simulasi model pada penelitian ini ditetapkan sampai dengan tahun 2045. Pemilihan simulasi hingga tahun 2045 adalah karena memiliki implikasi penting terhadap agenda Indonesia Emas 2045. Simulasi yang dilakukan pada penelitian ini berupa simulasi *Business as Usual* (BAU) untuk

mengetahui kondisi existing tanpa adanya intervensi kebijakan dan simulasi skenario penguatan indeks ketahanan yang diasumsikan terjadi peningkatan pertahun.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pembentukan Model Kerentanan Sosial

**Gambar 1.**  
Model Dinamik Kerentanan Sosial



Sumber: Hasil Analisis Powersim 2026

*Stock flow diagram* yang dibangun menunjukkan bahwa kerentanan sosial di Kecamatan Penjaringan dipengaruhi oleh tiga kelompok variabel. Kelompok pertama adalah indeks keterpaparan atau IE, yang dibentuk oleh gelombang maksimum subsidi, SLR, dan tide. Kelompok kedua adalah indeks sensitivitas atau IS, yang dibentuk oleh

kepadatan penduduk, gender ratio, rasio rentan, dan pertumbuhan penduduk. Kelompok ketiga adalah indeks ketahanan daerah atau IC, yang dibentuk oleh tujuh komponen C1-C7 sesuai prioritas IKD. Struktur penduduk menjadi stok utama karena pertumbuhan penduduk menentukan kepadatan dan rasio kelompok rentan. Secara konseptual,

model ini sesuai dengan VSD karena dan kapasitas daerah sebagai determinan memisahkan tekanan fisik, kondisi sosial, kerentanan.

Tabel 1. Hubungan Variabel Pembentuk Model Kerentanan

| Komponen model           | Variabel penyusun                                                | Arah pengaruh terhadap IK |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| IE atau keterpaparan     | SLR, pasang maksimum, gelombang maksimum, subsidensi             | Positif                   |
| IS atau sensitivitas     | Kepadatan, gender ratio, rasio usia rentan, pertumbuhan penduduk | Positif                   |
| IC atau ketahanan daerah | C1 - C7 IKD                                                      | Negatif                   |
| Stok penduduk            | Penduduk, kelahiran, kematian                                    | Tidak langsung melalui IS |
| Output utama             | IK atau indeks kerentanan sosial                                 | Variabel hasil            |

Sumber: Data Analisis 2026

Hasil uji validasi menunjukkan nilai MAPE sebesar 6,15%, AME sebesar 5,61%, dan AVE sebesar 16,45%. Nilai MAPE dan AME yang berada di bawah 10% menunjukkan bahwa model memiliki tingkat akurasi prediksi yang sangat baik. sehingga rata-rata hasil simulasi dinilai cukup dekat dengan data aktual. Sementara itu, nilai AVE sebesar 16,45% masih berada di bawah batas toleransi 30%, yang menunjukkan bahwa pola variasi model masih mampu mengikuti perubahan data aktual secara memadai. Berdasarkan hasil tersebut, model dinamis kerentanan sosial yang dikembangkan dapat dinyatakan valid secara perilaku dan layak digunakan untuk simulasi skenario. Nilai galat yang relatif rendah menunjukkan bahwa struktur model telah mampu merepresentasikan hubungan antarvariabel utama, yaitu keterpaparan, sensitivitas, dan ketahanan daerah. Dengan demikian, model dapat digunakan untuk menganalisis perubahan indeks kerentanan sosial Kecamatan Penjaringan pada periode simulasi 2025-2045. Secara kualitatif, model telah menunjukkan perilaku yang logis karena peningkatan tekanan pesisir menaikkan IK, sedangkan penguatan kapasitas menurunkan IK

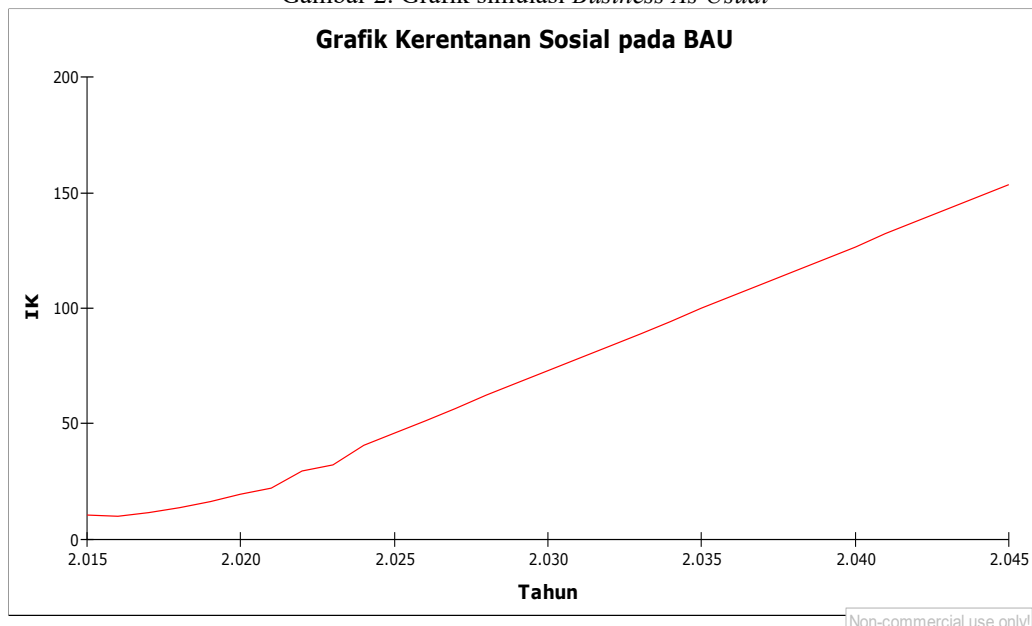
Tabel 2. Tabel Verifikasi Model

| Jenis uji                | Hasil     | Keterangan                                  |
|--------------------------|-----------|---------------------------------------------|
| Verifikasi struktur      | Konsisten | Struktur mengikuti IE, IS, dan IC dalam VSD |
| Verifikasi arah hubungan | Konsisten | IE dan IS positif, IC negatif terhadap IK   |
| Verifikasi dimensi       | Konsisten | Semua variabel normal                       |

Sumber: Data Analisis 2026

Hasil Simulasi dan Uji Sensitivitas

Gambar 2. Grafik simulasi *Business As Usual*



Sumber: Data Analisis Powersim 2026

Hasil simulasi *Business As Usual* (BAU) memperlihatkan nilai IK terjadi kenaikan menjadi 153,60 pada tahun 2045. Skenario *Business as Usual*/BAU menggambarkan kondisi ketika tidak ada intervensi kebijakan tambahan terhadap sistem kerentanan sosial. Pada uji sensitivitas keterpaparan, simulasi bertingkat pada tekanan lingkungan, nilai IK meningkat cepat pada kisaran 160,0 untuk simulasi pertama, 170 untuk simulasi kedua, dan 180 untuk simulasi ketiga. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan kecil pada faktor pemicu dapat menggeser tingkat kerentanan sosial dari

fase awal simulasi. Pada uji sensitivitas kapasitas, dilakukan simulasi peningkatan indeks C7 (Pengembangan Sistem Pemulihan Bencana) secara bertingkat, menunjukka nilai IK bergerak turun menjadi 150 untuk simulasi pertama, 148 untuk simulasi kedua, dan 145 untuk simulasi ketiga. Dengan demikian, model cukup sensitif terhadap perubahan parameter utama, terutama komponen yang memengaruhi keterpaparan dan ketahanan daerah.

Tabel 3. Uji Sensitivitas Model

| Jenis uji sensitivitas | Hasil                                                | Keterangan |
|------------------------|------------------------------------------------------|------------|
| Uji Keterpaparan       | Variabel IK sensitif terhadap perubahan indikator IE | valid      |
| Uji Kapasitas          | Variabel IK sensitif terhadap perubahan indikator IC | valid      |

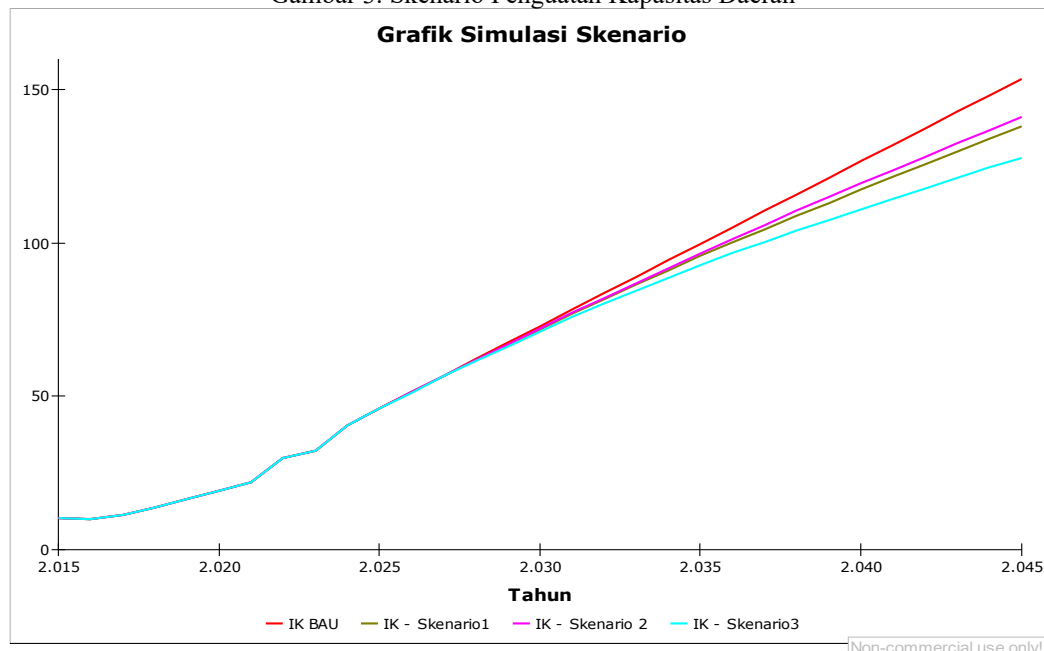
Sumber: Data Analisis 2026

### Skenario Intervensi IKD 2025-2045

Pada penelitian ini dibuat 3 simulasi skenario, yaitu : 1) Skenario yang berfokus pada penguatan aspek fisik-operasional IKD; 2) Skenario yang berfokus pada penguatan fungsi

kelembagaan dan sosial-kapasitas; dan 3) Skenario komprehensif yang menggabungkan kedua skenario secara optimal.

Gambar 3. Skenario Penguatan Kapasitas Daerah



Sumber: Analisis Powersim 2026

Skenario 1 belum cukup untuk menurunkan IK secara absolut. Nilai IK tetap naik sampai 2045 namun lebih rendah dari BAU. Hal ini terjadi karena Skenario 1 lebih banyak bekerja pada fase saat bencana dan pascabencana. Sumber keterpaparan seperti penurunan muka tanah, kenaikan muka laut, pasang maksimum, dan gelombang maksimum tetap memberi tekanan. Pada skenario 2 IK turun dari 153,60 menjadi 141,07. Jika

dibandingkan dengan Skenario 1, efek Skenario 2 sedikit lebih kecil dalam model ini. Indikator fisik-operasional memberi dampak lebih langsung terhadap penurunan konsekuensi sosial banjir rob. Sementara itu, indikator kebijakan, perencanaan, informasi, diklat, logistik, pencegahan, dan mitigasi bekerja sebagai kapasitas pendukung yang efeknya lebih bertahap. Dalam VSD, kapasitas adaptif berfungsi menurunkan kerentanan,

sedangkan keterpaparan dan sensitivitas meningkatkan kerentanan. Polsky. (2007). Sedangkan pada skenario 3 menunjukkan bahwa Skenario 3 memberi penurunan IK paling besar terhadap BAU. Pola ini menunjukkan adanya efek gabungan. Ketika penguatan sistem pemulihan, kesiapsiagaan, penanganan darurat, dan kawasan rawan berjalan bersama penguatan kebijakan, perencanaan,

informasi, diklat, logistik, pencegahan, dan mitigasi, model menghasilkan penurunan kerentanan yang lebih besar. Intervensi gabungan bekerja pada lebih banyak titik pengungkit, sehingga dampaknya lebih besar (Meadows. 1999 dan Sterman, 2000). Dalam konteks VSD, skenario komprehensif memperkuat kapasitas adaptif secara lebih menyeluruh.

Tabel 4. Tabel perbandingan skenario terhadap BAU

| Tahun | IK<br>BAU | Skenario<br>1 | Reduksi | Skenario<br>2 | Reduksi | Skenario 3 | Reduksi |
|-------|-----------|---------------|---------|---------------|---------|------------|---------|
| 2030  | 72,89     | 71,92         | 0,97    | 72,12         | 0,77    | 71,16      | 1,73    |
| 2035  | 99,79     | 95,77         | 4,02    | 96,66         | 3,13    | 92,88      | 6,91    |
| 2040  | 126,69    | 117,44        | 9,25    | 119,41        | 7,28    | 111,08     | 15,61   |
| 2045  | 153,60    | 138,27        | 15,33   | 141,07        | 12,53   | 127,89     | 25,71   |

Sumber: Data Analisis 2026

Temuan simulasi mendukung teori VSD dan modifikasi Tahir (2010). Kerentanan sosial meningkat ketika keterpaparan fisik dan sensitivitas sosial menguat, lalu menurun ketika kapasitas daerah meningkat. Dalam konteks Penjaringan, tekanan fisik berasal dari kombinasi SLR, subsidiensi, pasang maksimum, dan gelombang maksimum. Kondisi ini sejalan dengan studi As-syakur et al. (2023) dan Lumban-Gaol et al. (2024), yang menegaskan bahwa risiko pesisir lebih akurat ketika kenaikan muka laut dianalisis bersama penurunan tanah. Dimensi sosial juga penting karena Penjaringan memiliki kepadatan tinggi dan kelompok umur rentan yang besar.

Hal ini memperkuat argumen Gunandar et al. (2024) bahwa kapasitas adaptif menjadi unsur penting dalam mengurangi kerentanan permukiman pesisir Jakarta.

Implikasi praktis penelitian ini adalah perlunya mengarahkan kebijakan pengurangan kerentanan sosial pada dua jalur. Jalur pertama adalah pengurangan keterpaparan melalui pengendalian tata ruang pesisir, pemantauan subsidiensi, penguatan drainase, dan perlindungan kawasan rawan rob. Jalur kedua adalah peningkatan IKD melalui tujuh prioritas ketahanan daerah, terutama pengkajian risiko, sistem informasi, logistik, kesiapsiagaan, dan pemulihan bencana. Kontribusi teoretis penelitian ini terletak

pada integrasi VSD dan IKD dalam model dinamis, sehingga kerentanan tidak hanya dilihat sebagai indeks statis, tetapi sebagai proses yang berubah mengikuti tekanan lingkungan, perubahan penduduk, dan kapasitas kelembagaan. Keterbatasan penelitian ini terletak pada penggunaan data sekunder, pembacaan grafik yang masih bersifat visual, dan belum tersedianya output validasi numerik tahunan. Penelitian lanjutan perlu memakai data historis resolusi kelurahan, validasi model berbasis data observasi, serta skenario kebijakan yang lebih rinci untuk setiap komponen C1-C7.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa model dinamis berbasis VSD yang telah dibangun dapat menjelaskan hubungan antara keterpaparan, sensitivitas sosial, dan ketahanan daerah dalam membentuk kerentanan sosial Kecamatan Penjaringan. Temuan ini mendukung hipotesis bahwa peningkatan keterpaparan dan sensitivitas menaikkan kerentanan, sedangkan peningkatan ketahanan daerah menurunkan kerentanan.

Implikasi kebijakan utama adalah perlunya memperkuat IKD sebagai instrumen pengurangan kerentanan sosial, terutama pada aspek kebijakan kelembagaan, dan penguatan aspek fisik-

operasional IKD. Pemerintah daerah juga perlu memadukan data kependudukan, subsidi, SLR, pasang maksimum, dan gelombang maksimum dalam perencanaan adaptasi pesisir. Keterbatasan penelitian ini terdapat pada penggunaan data sekunder dan belum lengkapnya data historis panjang. Penelitian berikutnya perlu menggunakan data kelurahan, output tahunan Powersim, dan skenario intervensi yang lebih spesifik untuk tiap komponen IKD.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sampaikan terima kasih dan penghargaan yang tinggi kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dalam aspek akademis, teknis, dan administratif selama proses penelitian ini. Kerjasama dan kontribusi yang diberikan sangat berperan penting dalam menyusun dan menyelesaikan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- H. Lee et al., 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers*. IPCC.
- B. D. Hamlington et al., 2024. The rate of global sea level rise doubled during the past three decades. *Communications Earth & Environment*.
- H. Harintaka, A. G. Suhadha, A. Syetiawan, M. Ardha, and A. Rarasati. 2024. Current land subsidence in Jakarta: A multi-track SBAS InSAR analysis during 2017-

- 2022 using C-band SAR data. *Geocarto International*, vol. 39, no. 1, 2024, doi: 10.1080/10106049.2024.2364726.
- Meadows, D. H. 1999. Leverage points: Places to intervene in a system. The Sustainability Institute.
- A. R. As-syakur et al.,. 2023. Coastal vulnerability assessment for the megacity of Jakarta, Indonesia under enhanced sea-level rise and land subsidence in Climate Change, Community Response and Resilience. *Elsevier*, pp. 433-450, doi: 10.1016/B978-0-443-18707-0.00023-0.
- J. Lumban-Gaol et al. 2024. Sea Level Rise, Land Subsidence, and Flood Disaster Vulnerability in the East Coast of North Sumatra and Medan City. *Remote Sensing*, vol. 16, no. 5, p. 865.
- C. M. Gunandar et al. 2024. Flood Vulnerability in Jakarta Coastal Settlement: A Study at Kalibaru Subdistrict, North Jakarta, Indonesia. *Planning Malaysia*.
- R. A. C. Robielos et al. 2020. Development of Vulnerability Assessment Framework for Disaster Risk Reduction at Three Levels of Geopolitical Units in the Philippines. *Sustainability*, vol. 12, no. 21, p. 8815.
- A. Tahir, M. Boer, S. B. Susilo, and I. Jaya. 2009. Indeks Kerentanan Pulau-Pulau Kecil: Kasus Pulau Barrang Lompo-Makassar. *Ilmu Kelautan*, vol. 14, no. 4, pp. 183-188.
- Paharuddin and I. Alham. 2023. Assessment Vulnerability Index of West Coast of South Sulawesi, Indonesia: A Case Study in Segeri Beach, Pangkajene and Islands Regency. *Asian Journal of Environment & Ecology*, vol. 21, no. 1, pp. 26-33, doi: 10.9734/ajee/2023/v21i1450.
- NASA Sea Level Change Team. 2024. NASA Sea Level Change Portal and IPCC AR6 Sea Level Projection Tool. NASA.
- Sterman, J. D. 2000. Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. McGraw-Hill.
- M. Schwaninger and S. Groesser. 2020. System Dynamics Modeling: Validation for Quality Assurance,"in *System Dynamics*, Springer. pp. 119-138, doi: 10.1007/978-1-4939-8790-0\_540.
- Powersim Software AS. 2026. System Dynamics Modelling Software: Powersim Studio. Powersim.
- Polsky, C., Neff, R., & Yarnal, B. 2007. Building comparable global change vulnerability assessments: The Vulnerability Scoping Diagram. *Global Environmental Change*, 17(3-4), 472-485.
- Chandra, R. K., & Supriharjo, R. D. 2013. Mitigasi bencana banjir rob di Jakarta Utara. *Jurnal Teknik POMITS*, 2, C25.
- BPS Kota Jakarta Utara. 2024. Kecamatan Penjaringan Dalam Angka 2024. Jakarta: Badan Pusat Statistik Kota Jakarta Utara.