

## PERENCANAAN SEA WALL MODIFIKASI POLDER BERBASIS *SELF-CLOSING FLOOD BARRIER* DAN *SMART WATER SQUARES* PADA KAWASAN PESISIR

Hafif Ahmad Abdul Aziz<sup>1\*</sup>, Laura Angelina Aprilianta Eka Putri<sup>2</sup>, Wendik Setiawan<sup>1</sup>, Vita Ayu Kusuma Dewi<sup>1</sup>, dan Mega Septia Sarda Dewi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5, Malang, Jawa Timur, Indonesia

<sup>2</sup>Teknologi Rekayasa Pemeliharaan Bangunan Sipil, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5, Malang, Jawa Timur, Indonesia

\*hafif.ahmad.2105236@students.um.ac.id

Masuk: 14-04-2025, revisi: 30-06-2025, diterima untuk diterbitkan: 31-07-2025

### ABSTRACT

Global climate change, rising temperatures, and sea level rise pose significant threats to coastal regions. The IPCC (2021) projects sea level increases of 0.29–0.59 meters by 2100, placing Indonesia at risk of annual tidal flooding by 2050. This project aims to design a comprehensive flood protection system combining a seawall, a polder with a Self-Closing Flood Barrier (SCFB), and Smart Water Squares. This research uses a quantitative approach to engineering with the type of engineering design research. The analysis adheres to SNI 8460:2017 (Coastal Protection Structures), SNI 2415:2016 (Rainfall Calculation), and SNI 2415:2016 (Urban Drainage Systems for Polders). The resulting design includes a 6.2-meter seawall, SCFB panels with a 1.5-meter protective height, and a polder with a 1.56 million m<sup>3</sup> retention capacity. Additionally, a Smart Water Square of 1,036,800 m<sup>2</sup> integrates floodwater intake, recreational functions, and rainwater harvesting. This multi-functional infrastructure enhances coastal protection, ecological resilience, and community well-being. The implementation of SCFB technology is expected to significantly reduce flood risk and increase climate resilience for vulnerable coastal areas, providing a sustainable and adaptive response to future sea level rise and tidal threats.

**Keyword:** polder, flood, seawater intrusion, smart water square, self flood closing barrier

### ABSTRAK

Perubahan iklim global, kenaikan suhu, dan kenaikan permukaan laut menimbulkan ancaman besar bagi wilayah pesisir. IPCC (2021) memprediksi kenaikan permukaan laut antara 0,29 hingga 0,59 meter pada tahun 2100, mengancam Indonesia dengan banjir rob tahunan pada tahun 2050. Studi ini bertujuan untuk merencanakan dan merancang sistem perlindungan banjir terintegrasi yang menggabungkan *seawall*, polder modifikasi dengan *self-closing flood barrier* (SCFB), dan *smart water squares*. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif rekayasa dengan jenis penelitian desain rekayasa (*engineering design research*). Perencanaan dilakukan dengan acuan SNI 8460:2017 tentang tata cara perencanaan teknis bangunan pelindung pantai, SNI 2415:2016 tentang tata cara perhitungan hujan rencana, dan SNI 2415:2016 tentang tata cara perencanaan sistem drainase perkotaan untuk desain polder. Hasilnya didapati bahwa perencanaan dari desain *seawall* setinggi 6,2 m, panel SCFB dengan masing-masing ketinggian pelindung 1,5 m, volume retensi 1,56 juta m<sup>3</sup> untuk polder, dan *smart water square* seluas 1.036.800 m<sup>2</sup>. sistem ini akan menggabungkan *self-closing flood barrier* dan desain asupan air, rekreasi, dan pengelolaan air hujan, untuk meningkatkan perlindungan, keberlanjutan ekosistem, dan kualitas hidup masyarakat pesisir. Integrasi sistem ini diharapkan dapat mengurangi risiko banjir dan meningkatkan ketahanan pesisir. Penelitian ini diharapkan dapat mengatasi dampak kenaikan permukaan laut dan banjir rob yang terjadi di kawasan pesisir.

Kata kunci: polder, banjir rob, intrusi air laut, *smart water square*, *self flood closing barrier*

## 1. PENDAHULUAN

Pada era modern ini, bumi yang merupakan habitat bagi berbagai makhluk hidup termasuk manusia telah mengalami banyak perubahan, salah satunya yakni terjadinya pemanasan global. Pemanasan global adalah suatu fenomena dimana terjadinya peningkatan pada suhu atmosfer, laut, serta daratan. Berdasarkan *Center for International Forestry Research* (CIFOR) pemanasan global dapat terjadi disebabkan oleh terperangkapnya radiasi gelombang panas yang dipancarkan ke bumi oleh gas rumah kaca yang terdapat di udara dan tidak dapat menyebar. Pemanasan global, terjadi karena adanya perubahan pola cuaca, kenaikan permukaan air laut, dan fenomena cuaca yang sangat ekstrem.

Perubahan iklim merupakan salah satu fenomena global yang dapat mengakibatkan dampak yang sangat luas terhadap aspek kehidupan makhluk hidup.

Menurut Organisasi Meterologi Dunia (WMO), dalam laporan terbarunya “*State Of The Global Climate*” pada 2023 tercatat sebagai tahun terpanas. Indikator perubahan iklim lainnya juga mencapai rekornya yang ditandai dengan kenaikan laut yang belum pernah terjadi sebelumnya, penyusutan gletser pada kutub, dan hilangnya sebagian es laut Antartika. Dampak perubahan iklim, terutama kenaikan permukaan air laut, telah menjadi ancaman serius bagi banyak wilayah pesisir di dunia. Menurut laporan IPCC (2021), permukaan laut diperkirakan akan meningkat antara 0,29 hingga 0,59-meter pada tahun 2100, tergantung pada skenario emisi gas rumah kaca yang diambil. Kenaikan ini disebabkan oleh pemanasan global yang menyebabkan pencairan es di kutub dan ekspansi termal air laut. Mencairnya gletser di kutub merupakan salah satu indikator perubahan iklim yang paling signifikan dan memprihatinkan. Berdasarkan penelitian oleh Bindschadler et al. (2021), gletser di wilayah Antartika dan Greenland mengalami penurunan massa yang terus-menerus, yang berkontribusi terhadap kenaikan permukaan air laut global. Di Antartika, kehilangan massa gletser telah meningkat lebih dari dua kali lipat sejak 1979, dengan laju pelelehan mencapai 2,7 mm per dekade pada awal abad ke-21 (Joughin et al., 2020). Hal ini menyebabkan peningkatan tingkat kerentanannya terhadap perubahan iklim, yang berpotensi mempercepat proses pencairan lebih lanjut dalam beberapa dekade mendatang. Penelitian oleh Shepherd et al. (2022) juga memperlihatkan bahwa es yang mencair dari gletser ini tidak hanya berkontribusi pada kenaikan permukaan laut, tetapi juga mempengaruhi aliran air tawar ke laut, yang dapat mengganggu ekosistem laut dan memperburuk dampak perubahan iklim di kawasan pesisir. Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), sekitar 40% wilayah pesisir Indonesia mengalami intrusi air laut dengan jarak penetrasi mencapai 1-2 kilometer ke daratan. Studi yang dilakukan oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) menunjukkan bahwa laju kenaikan muka air laut di Indonesia rata-rata mencapai 0,8 cm per tahun, dengan beberapa wilayah seperti pesisir utara Jawa mengalami kenaikan hingga 1,2 cm per tahun.

Dampaknya sangat terasa di kota-kota pesisir seperti Jakarta, Surabaya, dan Miami, yang mengalami peningkatan frekuensi banjir rob dan kerusakan infrastruktur akibat gelombang pasang yang lebih tinggi (Renaud et al., 2019). Selain itu, penelitian oleh Rahmstorf et al. (2020) menunjukkan bahwa perubahan iklim yang mempengaruhi pola cuaca ekstrem, seperti hujan lebat dan badai, semakin memperburuk risiko banjir dan erosi pantai, mempercepat kerusakan ekosistem pesisir dan menurunkan ketahanan wilayah terhadap bencana alam. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) menyebutkan, tinggi muka laut di Indonesia diperkirakan naik 0,8 – 1,2 cm per tahun. Hasil analisis dampak kenaikan air laut dari *Climate research watch* pada 2024, menunjukkan sebanyak 199 kabupaten/kota pesisir di Indonesia terancam terkena banjir rob tahunan pada 2050. Kenaikan ini membawa bahaya besar, termasuk intrusi air laut yang mencemari sumber air tawar, serta banjir rob yang merusak infrastruktur, lahan pertanian, dan permukiman. Misalnya, wilayah pesisir Indonesia seperti Semarang dan Jakarta kerap mengalami banjir rob yang meningkatkan frekuensinya, mengancam lebih dari 23 juta penduduk di wilayah pesisir.

Banjir rob dan intrusi air laut memiliki dampak signifikan terhadap pertumbuhan penduduk di wilayah pesisir, terutama di kota-kota besar yang padat penduduknya. Fenomena ini menyebabkan kerusakan infrastruktur, mengganggu pemukiman, dan memperburuk kondisi kesehatan masyarakat. Dalam jangka panjang, kenaikan permukaan air laut yang disertai dengan banjir rob dapat memperburuk kerawanan perumahan, yang pada gilirannya mendorong perpindahan penduduk ke area yang lebih aman, meskipun sering kali jauh dari kawasan pesisir. Studi oleh Van et al. (2020) menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi dan intensitas banjir rob dapat mempengaruhi dinamika migrasi penduduk dan memperburuk kemiskinan di daerah pesisir. Ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas, seperti air tawar dan lahan pertanian, semakin terancam akibat terjadinya intrusi air laut yang mencemari sumur-sumur air tanah, mengurangi ketersediaan air bersih untuk penduduk.

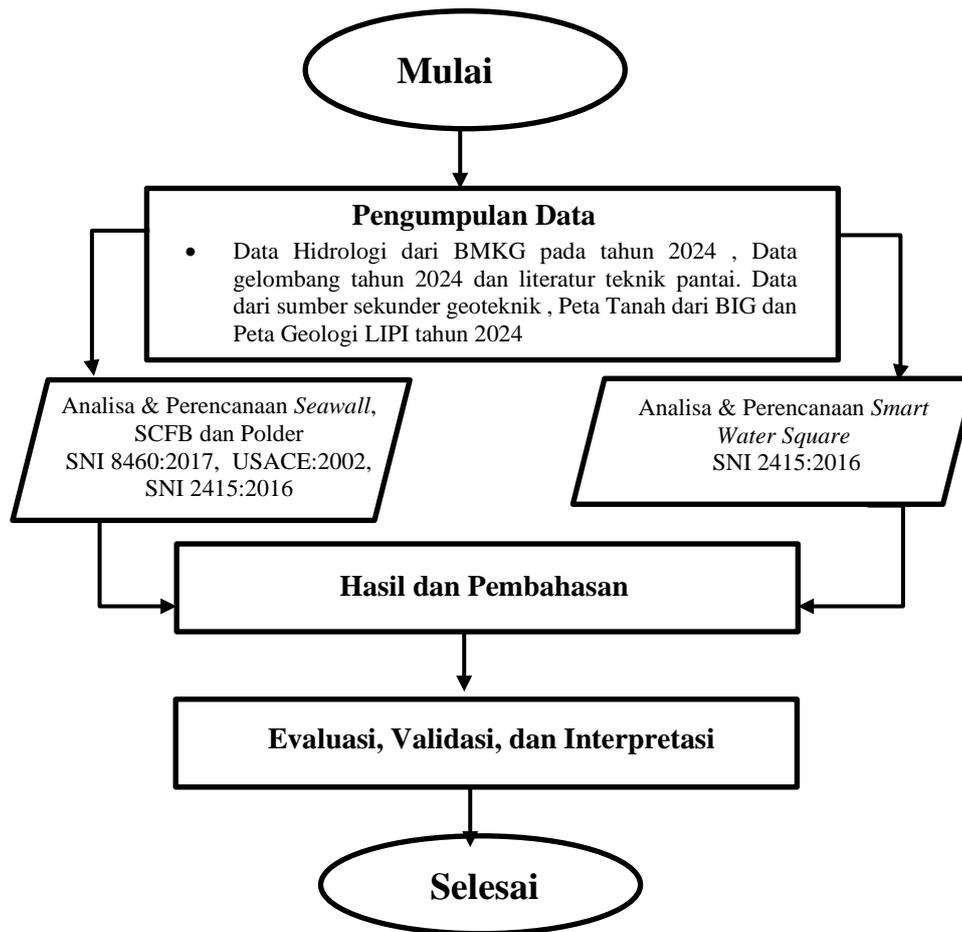
Ketersediaan air yang terganggu akibat intrusi air laut juga berdampak besar pada ketahanan pangan, terutama di daerah yang bergantung pada pertanian dan perikanan pesisir. Ketika air laut masuk ke dalam sumber air tawar, kualitas air untuk irigasi dan konsumsi rumah tangga menjadi sangat buruk, yang mengurangi hasil pertanian dan mempengaruhi produksi pangan. Penurunan kualitas tanah akibat salinisasi menyebabkan degradasi lahan yang mengurangi kemampuan untuk menanam tanaman pangan dan meningkatkan kerentanannya terhadap kekeringan. Sebuah penelitian oleh Rahmstorf et al. (2020) menyebutkan bahwa perubahan iklim yang memperburuk fenomena banjir rob dan intrusi air laut berpotensi meningkatkan kerawanan pangan, terutama di daerah pesisir yang memiliki ketergantungan tinggi terhadap sumber daya alam lokal. Ketahanan pangan yang berkurang ini berisiko memperburuk ketidakstabilan sosial, mendorong konflik atas sumber daya alam, dan mengurangi kualitas hidup masyarakat pesisir. Bencana ini memengaruhi ketersediaan air bersih, memicu kelangkaan pangan akibat terganggunya produksi pertanian, serta memperburuk kondisi kehidupan masyarakat, terutama di daerah padat penduduk. Seiring dengan meningkatnya risiko banjir rob akibat perubahan iklim, berbagai inovasi teknologi telah dikembangkan sebagai bagian dari sistem perlindungan pesisir. Salah satu teknologi yang menunjukkan efektivitas tinggi adalah *self-closing flood barrier* (SCFB), yaitu sistem penghalang otomatis yang aktif secara hidrolik tanpa memerlukan tenaga listrik, sehingga sangat ideal digunakan dalam kondisi darurat seperti banjir mendadak. Menurut Pranoto dan Widodo (2018),

implementasi SCFB di kawasan rawan banjir menunjukkan keberhasilan dalam mereduksi volume air yang masuk ke kawasan permukiman, dengan efisiensi penutupan mencapai 100% saat air mencapai ambang kritis. SCFB bekerja berdasarkan prinsip daya apung, di mana panel penghalang akan terangkat oleh tekanan air yang meningkat dan secara otomatis menutup jalur masuk air, serta kembali ke posisi semula ketika permukaan air surut.

Dalam konteks sistem pertahanan pesisir, SCFB memiliki beberapa keunggulan dibanding alternatif lain seperti pintu air manual, tanggul konvensional, maupun pompa air. Antara lain adalah SCFB tidak memerlukan intervensi manusia atau sumber daya listrik, sehingga sangat efektif dalam situasi darurat ketika akses dan pasokan energi terganggu (Suwarno et al., 2020). Kemudian sistem ini membutuhkan perawatan minimal dan memiliki umur operasional panjang dibanding sistem pintu air manual yang rentan terhadap kegagalan operasional karena faktor manusia atau kerusakan mekanik. SCFB dapat disembunyikan dalam infrastruktur eksisting dan tidak mengganggu lanskap kota, berbeda dengan tanggul atau *seawall* konvensional yang cenderung masif dan mengurangi nilai visual wilayah pesisir (Tavera et al., 2023). Teknologi SCFB sangat adaptif terhadap lonjakan permukaan air mendadak, terutama dalam konteks urbanisasi dan curah hujan ekstrem, sebagaimana banyak ditemukan di wilayah pesisir Indonesia. Seiring pertumbuhan populasi global yang diproyeksikan mencapai 10 miliar pada tahun 2050, tekanan terhadap sumber daya alam semakin meningkat. Kondisi ini menuntut penguatan ketahanan pangan, penyediaan air bersih, dan adaptasi terhadap bencana untuk mendorong pembangunan berkelanjutan. Generasi muda memiliki peran penting dalam menghadapi tantangan ini melalui inovasi teknologi ramah lingkungan, kampanye kesadaran publik, dan partisipasi aktif dalam pengambilan kebijakan. Solusi seperti pengelolaan wilayah pesisir yang adaptif, pemanfaatan energi terbarukan, serta inisiatif penghijauan menjadi langkah konkret untuk memastikan masa depan yang lebih berkelanjutan. Melihat perkembangan di era saat ini, keberadaan teknologi memang pada nyatanya sangat lekat dengan aktivitas keseharian. Namun, perlu diperhatikan apakah peran yang paling esensial sebagai *agent of change* masih diperankan dengan baik. Sehingga, inovasi dan gagasan kreatif yang melibatkan generasi muda diperlukan sebagai katalis bagi persiapan Indonesia mewujudkan tujuan pembangunan berkelanjutan menghadapi dampak kenaikan air laut. Berkaca pada kondisi dan *statement* tersebut, maka diperlukan sebuah gagasan inovatif agar sejalan dengan solusi menanggapi kenaikan air laut melalui *Seawall* dengan modifikasi polder berbasis *self-closing flood barrier* terintegrasi *smart water squares* sebagai solusi mengatasi dampak kenaikan air laut.

## **2. METODE PENELITIAN**

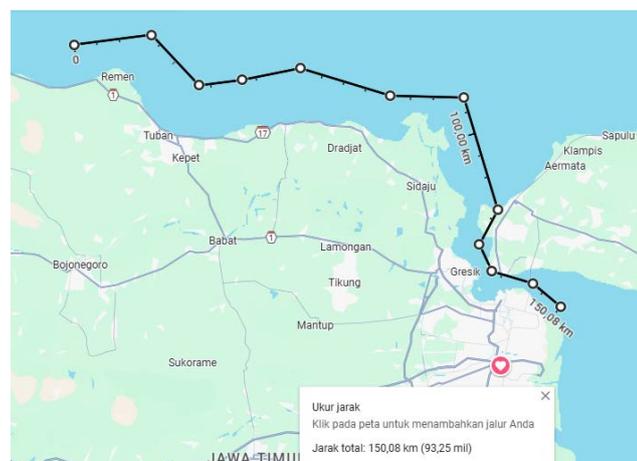
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif rekayasa dengan jenis penelitian desain rekayasa (*engineering design research*). Penelitian difokuskan pada perencanaan dan desain struktur proteksi pesisir (*seawall* dan sistem SCFB) serta sistem pengelolaan air perkotaan berbasis *smart water square* dengan mengacu pada parameter teknis hidrologi, oseanografi, dan geoteknik (Gambar 1).



Gambar 1. Bagan Alur Penelitian (Aziz et al., 2025)

### Wilayah Studi/ Lokasi Penelitian

Gambar 2 merupakan Lokasi dari studi akan diproyeksikan di Pantai Utara Jawa Timur, khususnya wilayah Tuban, Lamongan, Surabaya, dan Gresik. Perkiraan panjang proyek kurang lebih 150 Km. Pada Tabel 1, terdapat koordinat untuk lokasi ini dengan data luasan, panjang, dan koordinat diambil dari sumber *google earth* pada 2025:



Gambar 2. Lokasi Studi Perencanaan (*Google Maps*, 2025)

Tabel 1. Koordinat Lokasi Studi (*Google Earth Engine, 2025*)

Tidak	Tempat	Koordinat
1	Tuban (mulai)	6,8977 S, 112,0643° BT°
2	Lamongan (tengah)	6,9174° S, 112,3306° E
3	Gresik (tengah ke ujung)	7,1563 ° S, 112,6550 ° E
4	Surabaya (akhir)	7,2516° S, 112,7974° E

### Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan meliputi Data hidrologi dan klimatologi dari BMKG pada tahun 2024 (intensitas curah hujan 10 tahun terakhir , rerata pasang surut air laut selama 2024, dan rerata kecepatan angin pada 2024), Data gelombang tahun 2024 dan literatur teknik pantai, Data dari sumber sekunder geoteknik (jenis tanah, daya dukung, kedalaman tanah keras) dari Peta Tanah dari BIG dan Peta Geologi LIPI tahun 2024, SNI 8460:2017, data sondir (CPT) dari studi kasus pelabuhan dan sistem polder di Surabaya, Gresik, dan Lamongan oleh Pratama 2014, dan referensi teknis seperti manual desain Hudson, prinsip stabilitas *seawall*, dan perencanaan polder.

### Metode Analisis Perencanaan dan Desain

Perencanaan dilakukan dengan acuan SNI 8460:2017 tentang Tata cara perencanaan teknis bangunan pelindung pantai, SNI 2415:2016 tentang Tata cara perhitungan hujan rencana, dan SNI 2415:2016 tentang perencanaan sistem drainase dan kolam retensi, SNI 8467:2017 tentang Timbunan tanah lunak, SNI 2847:2019 tentang Struktur beton, *USACE Coastal Engineering Manual* tentang Manual teknik pantai, dan Hudson Formula (USACE) tentang Perhitungan armor.

### Analisis Desain *Seawall* , SCFB, dan Polder

- Menghitung tinggi total *seawall* berdasarkan kombinasi tinggi pasang, tinggi gelombang, dan margin keamanan(SNI 8460:2017).

$$H_{total} = H_p + H_a + H_m \quad (1)$$

Dimana:

$H_p$  = pasang maksimum

$H_a$  = tinggi gelombang desain

$H_m$  = margin keamanan tembok laut

- Desain dimensi struktur *seawall* menggunakan pendekatan stabilitas gravitasi (SNI 8460:2017).

$$B = Ht \frac{2}{8} \quad (2)$$

- Perhitungan ketebalan lapis pelindung (*armor layer*) menggunakan rumus Hudson Formula (USACE:2002) untuk mengetahui kebutuhan berat blok beton pelindung.

$$W = \frac{\gamma_w \times H_s^3}{\tan \phi \times (KD-1)} \quad (3)$$

Dimana:

$H_s$  = Tinggi gelombang yang signifikan

$KD$  = Koefisien desain

$\gamma_w$  = Berat jenis air laut

$\phi$  = Sudut kemiringan

- Evaluasi stabilitas terhadap guling (FSg) untuk memastikan keamanan struktur terhadap tekanan gelombang (USACE:2002).

$$FSg = \frac{\text{Momen Penahan}}{\text{Momen guling}} \quad (4)$$

### Desain Sistem SCFB

- Perhitungan luas panel dan gaya angkat maksimum ( $F_a$ ) yang harus ditahan oleh panel penutup otomatis (USACE:2002).

$$F_a = \gamma_w \times A_p \times H \quad (7)$$

Dimana:

$\gamma_w$  = Kepadatan air

$A_p$  = Area Panel

$H$  = Tinggi SCFB

### Perencanaan Sistem Polder

- Menghitung debit limpasan maksimum berdasarkan curah hujan harian ekstrem dan luas daerah tangkapan (SNI 2415:2016).  
 $Q = C \times I \times A$  (8)

Dimana:

$A$  = Luas daerah tangkapan air

$I$  = Intensitas curah hujan maksimum

$C$  = Koefisien aliran

- Menentukan volume retensi polder untuk durasi 24 jam serta dimensi kolam retensi yang sesuai (luas dan kedalaman) (SNI 2415:2016).  
 $V_r = Q \times t$  (9)

Dimana:

$Q$  = Debit limpasan

$t$  = waktu

### Desain *Smart Water Square*

- Menggunakan metode rasional untuk menghitung limpasan dan menentukan kebutuhan volume tampungan *smart water square* (SNI 2415:2016).  
 $V_r = Q \times t$  (9)

Dimana:

$Q$  = Debit limpasan

$t$  = waktu

- Perencanaan Struktur Penahan dan Drainase (SNI 8460:2017).  
 $H = h_{max} + h_{aman}$  (11)

Dimana:

$H_{max}$  = tinggi maksimal

$H_{aman}$  = tinggi aman

- Perhitungan ketebalan dinding penahan berdasarkan tekanan air maksimum dan kekuatan tekan beton (SNI 8460:2017).  
 $P_w = \gamma_w \times H_{max}$  (12)

Dimana:

$\gamma_w$  = berat jenis air

$H_{max}$  = tinggi maksimal

- Desain saluran luapan untuk aliran darurat (SNI 2415:2016).

$$b_{in} = \frac{Q}{v \cdot H_{asal}} \quad (13)$$

Dimana:

$Q$  = debit aliran

$v$  = kecepatan aliran

$H_{asal}$  = kedalaman saluran

### Evaluasi, Validasi Desain, dan Interpretasi

Evaluasi, validasi, dan interpretasi desain dengan membandingkan hasil analisis terhadap standar teknis. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan dimensi, kekuatan struktur, dan kapasitas retensi terhadap Standar teknis nasional (SNI 8453:2017 untuk drainase, SNI geoteknik dan struktur beton), pedoman internasional seperti *USACE Coastal Engineering Manual*, *Hudson Formula*, dan prinsip-prinsip desain tanggul/tembok laut berbasis gravitasi, kriteria keamanan struktural minimal seperti Faktor Keamanan ( $FS_g > 1,5$ ). Untuk validasi perhitungan melibatkan *cross-check* hasil numerik. Selain itu juga dengan memvalidasi kepraktisan, keamanan, dan fleksibilitas ekonomi dari perencanaannya. Sedangkan untuk interpretasi hasil berupa perhitungan tinggi dinding laut dan SCFB dalam konteks ketahanan struktur terhadap gelombang ekstrem dan pasang tinggi, volume retensi dan dimensi *smart water square* sebagai solusi adaptif berbasis ruang kota untuk menanggulangi banjir perkotaan akibat perubahan iklim. Evaluasi hasil simulasi atau model fisik (bila dilakukan) sebagai pembanding desain konseptual terhadap kondisi nyata.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

*Seawall* dengan polder yang dimodifikasi berdasarkan penghalang banjir yang menutup sendiri adalah konsep inovatif untuk pengelolaan banjir dan genangan air yang mengintegrasikan teknologi hidrolik modern. Konsep ini dirancang untuk memberikan perlindungan komprehensif bagi daerah pesisir dan daerah rawan banjir dengan memanfaatkan mekanisme penghalang otomatis yang dapat menutup secara mandiri ketika ketinggian air mencapai batas maksimum. Inovasi *seawall* dengan modifikasi polder berbasis *self-closing flood barrier* merupakan solusi modern dan berkelanjutan untuk menghadapi risiko banjir di daerah pesisir. *Seawall* berfungsi sebagai dinding penahan air yang dirancang agar lebih kuat dan lebih efisien dengan mempertimbangkan dampak lingkungan dan estetika. Modifikasi polder menambahkan elemen kontrol air melalui sistem reservoir yang dapat mengontrol volume air yang masuk dan keluar secara terkontrol. Kombinasi ini menciptakan sistem pertahanan berlapis yang dapat meminimalisir kerusakan akibat banjir, baik dari limpasan air laut saat air pasang maupun curah hujan ekstrem. Memodifikasi polder memungkinkan pengelolaan air yang lebih baik, membantu mengurangi risiko genangan air di daerah perkotaan. Dengan menggabungkan teknologi canggih dan pendekatan ekologis, sistem ini merupakan solusi ideal dalam menghadapi perubahan iklim dan meningkatkan ketahanan daerah pesisir terhadap ancaman banjir.

#### Data Perencanaan dan Desain

Pasang Tertinggi ( $H_p$ ) = 2,2 meter (data di pesisir utara Jawa Timur, BMKG Jawa Timur tahun 2024).

Tinggi Gelombang Desain ( $H_a$ ) = 2,5 meter (perkiraan gelombang ekstrem BMKG Jawa Timur tahun 2024).

Kecepatan Angin Maksimum = 20 m/s. (BMKG Jawa Timur tahun 2024)

Intensitas Curah Hujan Maksimum ( $I$ ) = 150 mm/hari (curah hujan harian maksimum) (BMKG Jawa Timur tahun 2024)

#### Data Tanah

- Jenis Tanah: Tanah liat dengan kandungan organik tinggi (Data Peta Tanah dari BIG dan Peta Geologi LIPI tahun 2024).
- Daya Dukung Tanah ( $Q_{all}$ ) sesuai Pedoman Perencanaan Pondasi untuk Tanah Lunak = 150 kN/m<sup>2</sup> (SNI 8460:2017).
- Kedalaman Lapisan Tanah Keras = 8 meter (data sondir (CPT) dari studi kasus pelabuhan dan sistem polder di Surabaya, Gresik, dan Lamongan) (Pratama, 2024).

#### Kriteria Desain

- Margin keamanan konstruksi = 1,5 meter (SNI 8460:2017).
- Sistem SCFB berbasis otomatis dengan tinggi panel maksimum = 1,5 meter (SNI 8460:2017).

#### Perencanaan Struktur Tepi Laut, SCFB, dan Modifikasi Polder

- Tinggi *seawall* Total (SNI 8460:2017).
- $H_{total} = H_p + H_a + H_m$  (1) (SNI 8460:2017).

Dimana:

$H_p$  = pasang maksimum = 2,2 meter

$H_a$  = tinggi gelombang desain = 2,5 meter

$H_m =$  margin keamanan tembok laut = 1,5 meter

$H_{total} = 2.2 + 2.5 + 1.5 = 6.2$  meter

- Lebar Alas (B)
- Menggunakan prinsip stabilitas gravitasi (SNI 8460:2017).

$$B = Ht \frac{2}{8} (2) \text{ (SNI 8460:2017).}$$

$$B = \frac{2}{3} \times 6.2 \text{ m} = 4.13 \text{ m}$$

- Lereng tembok laut  
Rasio kemiringan optimal adalah 1:2 yang berarti 1 vertikal vs. 2 horizontal (USACE:2002).
- Ketebalan Lapisan Armor  
Menggunakan rumus Hudson

$$W = \frac{\gamma_w \times H_s^3}{\tan \phi \times (KD-1)} (3) \text{ (USACE:2002).}$$

Dimana:

$H_s =$  Tinggi gelombang yang signifikan = 2,5 meter.

$KD =$  Koefisien desain = (2 untuk pelindung beton pracetak).

$\gamma_w =$  Berat jenis air laut = (1,03 ton/m<sup>3</sup>).

$\phi =$  Sudut kemiringan = 26,6 (1:2).

$$W = \frac{1.03 \times 2.5^3}{\tan(26.6) \times (2-1)} (3)$$

$$W = 16.54 \text{ ton}$$

Ukuran blok lapis baja beton yang dibutuhkan adalah sekitar 16,5 ton per unit.

- Kekuatan Struktur *Seawall*  
Stabilitas Terhadap Guling (FSg) (USACE:2002).

$$FSg = \frac{\text{Momen Penahan}}{\text{Momen guling}} (4) \text{ (USACE:2002)}$$

- Momen Menahan = Berat Struktur ( $W_s$ ) (USACE:2002).

$$W_s = \gamma_c \times B \times H (5)$$

$$\text{dengan } \gamma_c = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$W_s = 614.544 \text{ kN/m}$$

- Momen Bergulir = Tekanan Gelombang ( $P_g$ ) (USACE:2002).

$$P_g = \gamma_w \times H_s^2 (5)$$

$$P_g = 1.03 \times 2.5^2 = 6.4375 \text{ kN.m}$$

Sehingga Fsg menjadi,

$$Fsg = \frac{614.544 \text{ kN/m}}{6.4375 \text{ kN/m}} = 94.46 (4)$$

- Area Panel SCFB (AFP) (USACE:2002).

Untuk melindungi area dengan ketinggian maksimum 1,5 meter:

$$AP = L \times H (6)$$

Dimana:

$L =$  Panjang perlindungan diasumsikan 10 meter per panel.

$H =$  Tinggi SCFB 1,5 meter.

$$AP = 10 \times 1.5$$

Jadi, luas Panel SCFB adalah 15 meter<sup>2</sup>.

- Gaya Angkat Panel SCFB ( $F_a$ ) (USACE:2002).  
 $F_a = \gamma_w \times A_p \times H$  (7)

Dimana:

$\gamma_w$  = Kepadatan air

$A_p$  = Area Panel

$H$  = Tinggi SCFB

$F_a = 1.03 \times 15 \times 1.5$

$F_a = 23,175$  kN.

SCFB bahan panel dapat menahan kekuatan 23,175 kN per panel.

- Volume Retensi Data Awal (SNI 2415:2016).  
Luas daerah tangkapan air ( $A$ ) =  $150 \text{ km}^2$   
Intensitas curah hujan maksimum ( $I$ ) =  $150 \text{ mm/hari}$ .  
Koefisien aliran ( $C$ ) =  $0,8$
- Debit Limpasan ( $Q$ ) (SNI 2415:2016).  
 $Q = C \times I \times A$  (8)  
 $Q = 0.8 \times 150 \times 150 = 18.0 \text{ m}^3/\text{s}$   
Volume retensi selama durasi banjir 24 jam ( $V_r$ )  
 $V_r = Q \times t$  (9) (SNI 2415:2016).
- $V_r = 18 \times 24 (3600) = 1,555,200 \text{ m}^3$   
Sistem polder memiliki kapasitas retensi  $1,56$  juta  $\text{m}^3$ .
- Dimensi kolam retensi (SNI 2415:2016).  
Jika kedalaman kolam retensi maksimum adalah  $5 \text{ m}$ .
- Retensi =  $\frac{V_r}{H}$  (10) (SNI 2415:2016).  
 $\text{Retensi} = 311,040 \text{ m}^2 \times \frac{1,555,200}{5}$   
Total luas area retensi adalah  $311.040$  atau  $31,1 \text{ ha.m}^2$

### Perencanaan *Smart water square*

*Smart water square* merupakan inovasi pengelolaan air perkotaan yang dirancang untuk mengatasi masalah banjir dan genangan air akibat kenaikan permukaan laut. Sistem ini mengintegrasikan ruang publik dengan infrastruktur penyimpanan air multifungsi, memungkinkan daerah perkotaan untuk mengakomodasi dan mengelola luapan air secara efisien dan berkelanjutan. Struktur teknis *smart water square* dirancang dengan sistem multi-level yang memungkinkan penyimpanan air secara bertahap, struktur ini dirancang dengan kedalaman dan volume yang disesuaikan berdasarkan analisis historis curah hujan, pola gelombang laut, dan proyeksi kenaikan permukaan air. Basisnya dirancang dengan sistem drainase canggih yang dapat menyerap, menyimpan, dan mendistribusikan air secara optimal. Teknologi filter dan pompa terintegrasi memungkinkan air yang terkumpul diolah untuk tujuan sekunder seperti penyiraman pabrik, membersihkan area publik, atau bahkan potensi pengelolaan air.

### Data Perencanaan dan Desain

- Kapasitas Retensi Air  
Tujuan utama dari *smart water square* adalah untuk mengakomodasi limpasan air hujan selama puncak banjir. Dengan asumsi banjir desain memiliki durasi 24 jam, maka
- Volume retensi untuk durasi banjir 24 jam ( $V_r$ ) (SNI 2415:2016).  
 $V_r = Q \times t$  (9)  
 $V_r = 18 \times 24 (3600) = 1.555.200 \text{ m}^3$   
Area *smart water square* ( $A_{ws}$ ) dirancang untuk kedalaman genangan maksimum ( $h_{max}$ )  $1,5 \text{ m}$ .

$$A_{ws} = \frac{V_{retensi}}{H} (10) \text{ (SNI 2415:2016).}$$

$$A_{ws} = \frac{1,555,200}{1,5} = 1,036,800 \text{ m}^2$$

Total luas *smart water square* adalah 1.036.800 m<sup>2</sup>, dengan kedalaman maksimum 1,5 m.

- Struktur Dinding Penahan Tanah (SNI 8460:2017).  
 $H = h_{max} + h_{aman}$  (11)  
 $H = 1.5 + 0.5 = 2$  m.
- Ketebalan Dinding (t):  
Dinding beton dirancang untuk menahan tekanan air maksimum ( $P_w$ ) (SNI 8460:2017).:  
 $P_w = \gamma_w \times H_{max}$  (11) (SNI 8460:2017).  
 $P_w = 9.81 \times 1.5 = 14,175$  kN/m

Kekuatan tekan beton ( $f_c$ ): 24 MPa

$$t = \frac{14,175}{25} = 0.59 \text{ m}$$

Ketebalan dinding beton adalah 0,6 m untuk stabilitas.

- Sistem Drainase (SNI 2415:2016).
- Saluran masuk (masuk)  
Pelepasan maksimum: 18,0 m<sup>3</sup>/s. Kecepatan aliran desain: 1 m / s.  
 $bin = \frac{Q}{v.H_{sal}}$  (13) (SNI 2415:2016).  
Dengan  $hsal = 0,5$  meter  
 $tempat = 0,36 \text{ cm} \frac{18}{1.0.5}$
- Lebar saluran masuk minimum adalah 0,3 m.  
Pompa Drainase: Jika genangan air perlu dikeringkan, menggunakan pompa dengan kapasitas total sama dengan debit maksimum.
- Saluran luapan (SNI 2415:2016).  
Saluran luapan dirancang pada ketinggian 1,5 m kali lebar 0,5 m untuk aliran darurat.

Analisis Kekuatan Struktural (USACE:2002).

- Stabilitas Terhadap Guling (FSg) (USACE:2002).  
 $FSg = \frac{W \times L}{P \times H}$  (14)
- Momen Menahan = Berat Struktur ( $W_s$ ) (USACE:2002).  
 $W_s = \gamma_c \times H \times t$  (15)

Dengan  $24 \text{ kN} / \text{m}^3$

$$W_s = 28,8 \text{ kN/m}$$

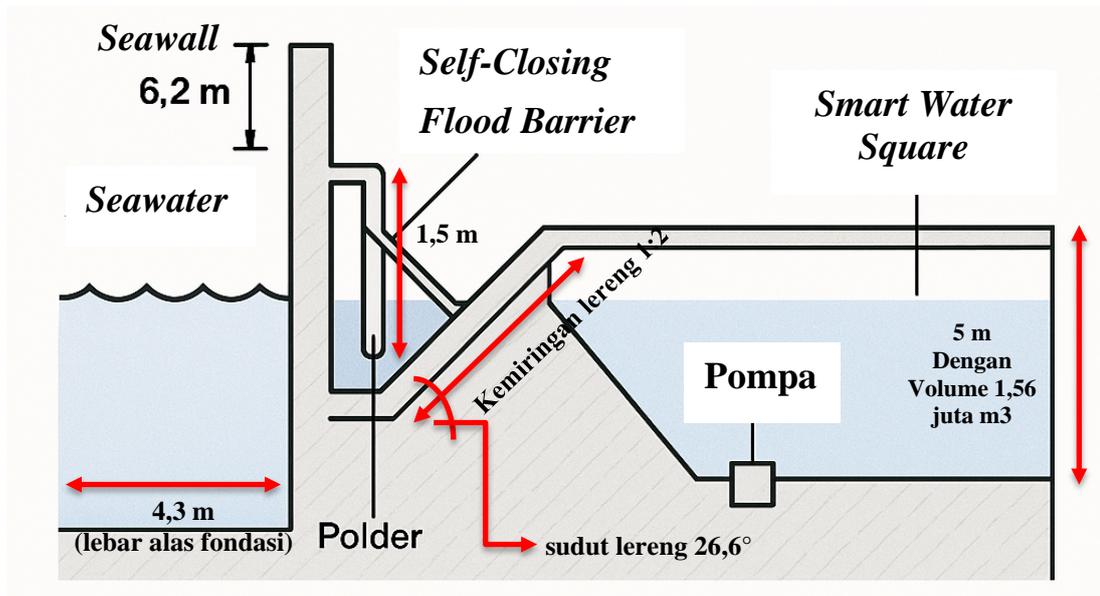
- Tekanan Air (P):  $14.715 \text{ kN/m}^2$  (USACE:2002).

Sehingga FSg menjadi

$$FSg = \frac{28,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 0,6}{14.175 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 2} = 1.17$$

Stabilitas aman karena  $FSg > 1$ .

### Evaluasi Hasil Perencanaan



Gambar 3. Desain Perencanaan

Hasil perencanaan yang mengacu pada pedoman teknis dari SNI 8460:2017 dan *USACE Coastal Engineering Manual (CEM)*, desain sistem perlindungan pantai ini secara umum telah memenuhi prinsip keamanan, kepraktisan, dan fungsionalitas. Berdasarkan Gambar 3 merupakan desain dari perencanaan sistem yang diketahui tinggi total *seawall* sebesar 6,2 meter yang merupakan penjumlahan dari tinggi pasang maksimum (2,2 m), tinggi gelombang desain (2,5 m), dan margin keamanan (1,5 m), sudah sesuai dalam SNI 8460:2017. Margin keamanan sebesar 1,5 meter tergolong konservatif dan memberikan toleransi terhadap fluktuasi muka air laut, gelombang ekstrem, serta kemungkinan penurunan tanah (*settlement*) jangka panjang.

Lebar alas fondasi *seawall* yang direncanakan sebesar 4,13 meter diperoleh dari rumus empiris stabilitas gravitasi menghasilkan perbandingan tinggi terhadap lebar alas sekitar 1,5, yang masih dalam kisaran aman terhadap risiko guling dan geser. Selain itu, kemiringan lereng sebesar 1:2 (vertikal : horizontal) juga sesuai dengan rekomendasi USACE dan praktik umum di lapangan, yang tidak hanya memberikan kestabilan tetapi juga memudahkan pelaksanaan konstruksi.

Pada bagian lapisan pelindung (*armor*), digunakan rumus Hudson dari USACE dengan memasukkan tinggi gelombang signifikan 2,5 meter, koefisien desain (*KD*) sebesar 2 untuk beton pracetak, dan sudut lereng  $26,6^\circ$ . Hasil perhitungan menunjukkan bahwa berat unit armor yang dibutuhkan adalah sekitar 16,5 ton per unit. Ukuran ini tergolong besar dan menunjukkan bahwa desain ini ditujukan untuk menghadapi kondisi gelombang tinggi. Namun demikian, penggunaan unit seberat ini memerlukan dukungan alat berat khusus dan perencanaan logistik yang matang agar pemasangan tetap efisien di lapangan.

Dari sisi stabilitas struktur terhadap gaya guling, nilai faktor keamanan terhadap guling (*FS<sub>g</sub>*) yang dihasilkan adalah 94,46. Nilai ini sangat tinggi dan menunjukkan bahwa struktur sangat aman terhadap potensi kegagalan akibat momen guling. Pada sistem perlindungan tambahan berupa SCFB, digunakan panel setinggi 1,5 meter dengan luas  $15 \text{ m}^2$  per unit (asumsi panjang 10 meter). Panel ini dirancang untuk menahan gaya angkat air laut sebesar 23,175 kN, yang masih dalam kapasitas kekuatan material konstruksi jika menggunakan beton bertulang atau baja ringan khusus. Sistem SCFB yang bersifat otomatis juga menunjukkan pendekatan modern dan adaptif terhadap fluktuasi muka air laut atau potensi banjir rob.

Dari sisi pengelolaan banjir, desain kolam retensi dengan volume 1,56 juta  $\text{m}^3$  didasarkan pada debit limpasan maksimum sebesar  $18 \text{ m}^3/\text{s}$  selama durasi banjir 24 jam. Luas kolam retensi yang dibutuhkan untuk menampung volume ini, dengan asumsi kedalaman efektif 5 meter, adalah  $311.040 \text{ m}^2$  atau sekitar 31,1 hektar. Ukuran ini realistis untuk DAS (daerah aliran sungai) dengan luas  $150 \text{ km}^2$  dan curah hujan intensitas tinggi ( $150 \text{ mm/hari}$ ), serta mengacu pada SNI 2415:2016 tentang perencanaan sistem drainase dan kolam retensi. Secara keseluruhan, dari segi keamanan, desain ini sangat mencukupi bahkan cenderung konservatif; dari segi kepraktisan, perencanaan modular dan lereng landai mendukung efisiensi pembangunan, meskipun penggunaan armor besar dan SCFB otomatis menuntut logistik khusus; sedangkan dari aspek ekonomis, terdapat indikasi bahwa struktur ini bisa di optimasi lebih lanjut, terutama dari sisi efisiensi volume material dan dimensi fondasi, tanpa mengurangi nilai keamanan. Desain ini dinilai layak dan

andal, namun akan lebih optimal jika disertai evaluasi teknis-lapangan untuk menyeimbangkan antara kinerja, biaya, dan kemudahan implementasi.

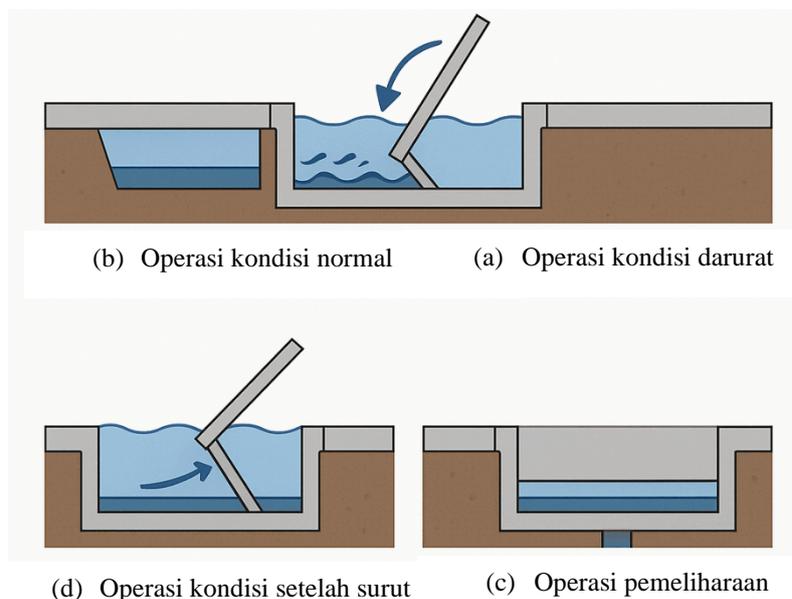
Sistem SCFB merupakan teknologi proteksi pantai yang dirancang untuk bekerja secara otomatis ketika muka air laut mencapai ambang batas tertentu. Meskipun efektif dalam mencegah limpasan air laut ke daratan, SCFB tidak memiliki kapasitas untuk mengelola limpasan dari arah sebaliknya, yaitu air hujan dan aliran permukaan dari kawasan daratan. Dalam konteks ini, kebutuhan akan sistem polder menjadi sangat penting. Polder adalah sistem pengendalian banjir tertutup yang umumnya terdiri atas kolam retensi, rumah pompa, dan jaringan saluran drainase yang berfungsi menampung dan memompa air ke laut (SNI 2415:2016; Hardjosoewignjo & Arsyad, 2023). Ketika SCFB menutup aliran ke laut saat kondisi pasang tinggi atau badai, air hujan dari darat yang tidak segera dialirkan akan terkumpul dan dapat menyebabkan genangan serius di belakang tanggul.

Kebutuhan volume retensi sebesar 1,56 juta m<sup>3</sup> dihitung dari debit limpasan permukaan yang dihasilkan oleh hujan ekstrem pada kawasan tangkapan seluas 150 km<sup>2</sup>, dengan intensitas hujan 150 mm/hari dan koefisien limpasan sebesar 0,8, sesuai dengan rumus pada SNI 2415:2016 tentang Tata Cara Perencanaan Sistem Drainase Perkotaan. Dengan menggunakan rumus  $Q = C \times I \times A$ , diperoleh debit limpasan sebesar 18 m<sup>3</sup>/s, yang bila dikalikan dengan durasi banjir selama 24 jam (86.400 detik), menghasilkan total volume retensi sebesar 1.555.200 m<sup>3</sup>. Volume ini menggambarkan kebutuhan penampungan air hujan yang tidak sempat dialirkan selama kondisi SCFB tertutup. Hal ini penting mengingat data empiris menunjukkan bahwa kota-kota pesisir di Indonesia kerap mengalami banjir lokal parah ketika sistem drainase tidak dikombinasikan dengan kolam retensi dan pompa (Ridwan & Suryanto, 2021). Dengan kapasitas total sebesar itu, maka jika kedalaman maksimum kolam retensi dirancang 5 meter, diperlukan luas area sebesar 311.040 m<sup>2</sup> atau sekitar 31,1 hektar. Lokasi yang ideal untuk penempatan kolam retensi adalah di sisi belakang tanggul laut (SCFB), tepatnya pada kawasan yang memiliki elevasi rendah, dekat saluran drainase utama, dan tersedia lahan yang memungkinkan seperti ruang terbuka hijau, tanah cadangan, atau lahan pemerintah (Hardjosoewignjo, 2023). Keberadaan rumah pompa juga wajib disediakan untuk mengalirkan air dari kolam retensi ke laut ketika muka laut sudah lebih rendah. Dengan kombinasi ini, SCFB akan berfungsi optimal sebagai pelindung dari luar (air laut) dan sistem polder akan bekerja sebagai pengendali dari dalam (air darat).

Dengan demikian, kombinasi SCFB dan sistem polder menjamin ketahanan banjir dari dua arah sekaligus: banjir rob dari laut dan banjir limpasan dari darat. Perancangan ini dinilai aman, praktis, dan relatif ekonomis karena mengikuti standar nasional (SNI 8460:2017 dan SNI 2415:2016), serta mengacu pada pendekatan internasional seperti dalam *Coastal Engineering Manual* (CEM) oleh USACE:2002 yang menekankan perlunya integrasi sistem struktural dan non-struktural dalam mitigasi bencana pesisir.

### Pola Operasi SCFB

Sistem SCFB merupakan teknologi perlindungan pasif yang berfungsi otomatis tanpa sumber listrik eksternal, menggunakan prinsip gaya apung untuk menutup jalur banjir. Pada Gambar 4 merupakan gambaran dari pola operasi SCFB yang mencakup:



Gambar 4. Pola Operasi SCFB berdasarkan Kondisi

- (a) Kondisi normal (Kering) : panel SCFB berada dalam posisi terlipat (tertutup ke bawah) di dalam *chamber* beton yang sejajar permukaan tanah. Jalur jalan atau pedestrian tetap bisa digunakan secara normal karena panel berada di bawah permukaan.
- (b) Kondisi darurat (Banjir/Pasang Tinggi): saat air mulai naik dan masuk ke *chamber*. Air mengisi ruang bawah panel, menimbulkan gaya apung. Panel terangkat secara otomatis ke atas, membentuk penghalang vertikal terhadap aliran air. Proses ini berlangsung tanpa intervensi manusia maupun sistem elektronik.
- (c) Setelah air surut: Panel SCFB secara perlahan turun kembali ke posisi semula karena gaya gravitasi. Saluran drainase di dasar *chamber* mengalirkan sisa air dari ruang bawah panel.
- (d) Pemeliharaan berkala pada sistem SCFB memerlukan: pembersihan saluran bawah dari sedimentasi atau sampah. Pemeriksaan kekedapan ruang panel dan fungsi engsel. Simulasi operasi manual secara berkala untuk uji kelayakan.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan penjelasan di atas, dapat disimpulkan bahwa sistem tersebut merupakan solusi yang komprehensif dan inovatif, yaitu menggabungkan teknologi *seawall* dengan modifikasi polder berbasis *self-closing flood barrier* yang terintegrasi dengan *smart water square*, menawarkan solusi terintegrasi yang dapat mengatasi ancaman kenaikan permukaan laut di wilayah pesisir. *Seawall* akan dirancang dan direncanakan setinggi 6,2 meter dan lebar 4,13 meter. Ukuran blok lapis baja beton yang dibutuhkan adalah sekitar 16,5 ton per unit. Untuk SCFB, melindungi area dengan tinggi maksimum 1,5 meter membutuhkan luas 15 meter<sup>2</sup>. Sistem polder memiliki debit limpasan (Q) sebesar 18,0 m<sup>3</sup>/s dengan kapasitas penyimpanan 1,56 juta m<sup>3</sup>. Dengan kedalaman 5 meter, total luas area retensi adalah 311.040 m<sup>2</sup> atau 31,1 ha. Sementara itu, sistem *smart water square* Luas (A<sub>ws</sub>) dirancang untuk kedalaman genangan maksimum (h<sub>max</sub>) 1,5 m yaitu 1.036.800 m<sup>2</sup>. Ketebalan dinding beton adalah 0,6 m untuk stabilitas dan lebar saluran masuk minimum adalah 0,3 m. Jika genangan perlu dikeringkan, gunakan pompa dengan kapasitas total sama dengan debit maksimum. Saluran luapan dirancang pada ketinggian 1,5 m kali lebar 0,5 m untuk aliran darurat. Berdasarkan hasil perencanaan yang mengacu pada pedoman teknis dari SNI 8460:2017 dan *USACE Coastal Engineering Manual (CEM)*, desain sistem perlindungan pantai ini secara umum telah memenuhi prinsip keamanan, kepraktisan, dan fungsionalitas.

Teknologi *seawall* dengan polder modifikasi berdasarkan penghalang banjir *self-closing* yang terintegrasi dengan *smart water squares*, menawarkan solusi terintegrasi yang dapat mengatasi ancaman kenaikan permukaan laut di wilayah pesisir. *Seawall* dirancang dengan sistem polder untuk menahan gelombang pasang, sedangkan penghalang banjir yang menutup sendiri akan menutup secara otomatis saat terjadi banjir. integrasi SCFB memungkinkan pengelolaan air yang efisien, menyediakan ruang untuk penyerapan air hujan, dan meningkatkan ketahanan lingkungan terhadap perubahan iklim. saran ke depan perencanaan ini dapat diimplementasikan di ranah kementerian pekerjaan umum & humas dan dapat dimasukkan dalam Daerah Pendukung dan Solusi Penanganan Kenaikan Permukaan Laut.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2024). *Data pasang surut dan curah hujan tahunan wilayah Jawa Timur*. <https://www.bmkg.go.id/>
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). *SNI 2415:2016 Tata cara perencanaan sistem drainase perkotaan*. BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). *SNI 2415:2016 Tata cara perhitungan curah hujan rencana*. BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 Tata cara perencanaan bangunan pengaman pantai*. BSN.
- Bindschadler, R., Nowicki, S., Abe-Ouchi, A., Aschwanden, A., Choi, H., Fastook, J., ... & Zhang, T. (2021). *Hilangnya massa lapisan es Antartika: Tren dan proyeksi*. *Geophysical Research Letters*, 48(4), e2020GL089983.
- Center for International Forestry Research (CIFOR). (n.d.). *Climate change facts*. <https://www.cifor.org/>
- Hardjosoewignjo, S. (2023). *Sistem drainase dan polder di kawasan pesisir*. Penerbit ITB.
- Hardjosoewignjo, S., & Arsyad, M. (2023). *Pengelolaan air perkotaan di daerah pesisir: Studi kasus Semarang*. Penerbit UGM Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: Dasar ilmu fisika. Kontribusi Kelompok Kerja I untuk Laporan Penilaian Keenam Panel Antarpemerintah tentang Perubahan Iklim*. Cambridge University Press.
- Joughin, I., Smith, B. E., & Medley, B. (2020). *Percepatan hilangnya massa es dari lapisan es Greenland: Tren dan proyeksi terkini*. *Nature*, 585(7825), 244–249.
- Pranoto, S. H., & Widodo, B. (2018). *Kajian implementasi sistem self-closing flood barrier pada kawasan rawan banjir*. *Jurnal Kebencanaan Indonesia*, 15(3), 211–225.

- Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S., & Schaar, C. (2020). *Kenaikan permukaan laut global dan proyeksi masa depannya: Tinjauan literatur terbaru. Earth System Dynamics, 11(1)*, 123–136.
- Renaud, F. G., Birkmann, J., Djalante, R., Field, C. B., & Siew, T. F. (2019). *Kenaikan permukaan laut dan dampaknya terhadap masyarakat pesisir: Implikasi terhadap migrasi dan kerentanan. Environmental Research Letters, 14(5)*, 054022.
- Ridwan, M., & Suryanto, A. (2021). *Evaluasi efektivitas sistem polder dalam mengurangi banjir rob di Semarang. Jurnal Teknik Pengairan, 9(1)*, 55–63.
- Shepherd, A., Ivins, E. R., Rignot, E., Smith, B., van den Broeke, M. R., Velicogna, I., ... & Wouters, B. (2022). *Satu dekade hilangnya es dari lapisan es Greenland dan kontribusinya terhadap kenaikan permukaan laut. Nature, 601(7894)*, 229–234.
- Suwarno, A. D., Prasetyo, Y. T., Wijaya, H., & Nugroho, A. R. (2020). *Inovasi teknologi barrier hidrolis untuk mitigasi banjir di wilayah pesisir. Jurnal Teknologi Lingkungan, 21(1)*, 33–47.
- Tavera, R. G., Lestari, E., Hidayat, D., & Setiawan, R. (2023). *Dampak kenaikan permukaan laut terhadap masyarakat pesisir dan infrastruktur di Indonesia. Environmental Research Letters, 18(2)*, 024002.
- US Army Corps of Engineers (USACE). (2002). *Coastal Engineering Manual (CEM), Part VI – Design of Coastal Structures*.
- Van, T. T., Nguyen, H. T., Le, M. D., & Pham, Q. H. (2020). *Konstruksi tembok laut untuk adaptasi perubahan iklim: Pendekatan dan praktik terbaik. Ilmu dan Kebijakan Lingkungan, 114*, 168–176.