

## Analisis Ancaman Banjir pada Sistem Drainase Banger Lama, Kota Pekalongan: Pengaruh Faktor Hujan, Kenaikan Muka Laut, dan Penurunan Tanah

**Mohammad Iqbal Huseiny\***

Program Studi Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Email: miqbalhuseiny@gmail.com

**Arno Adi Kuntoro**

Program Studi Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Email : arnoak@itb.ac.id

**Eka Oktariyanto Nugroho**

Program Studi Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Email : nugrohoeka@itb.ac.id

**Mohammad Farid**

Program Studi Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Email : mfarid@itb.ac.id

**Sella Lestari Nurmaulia**

Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Email : sella@itb.ac.id

### Abstrak

Kawasan pesisir Kota Pekalongan menghadapi ancaman serius akibat masalah banjir dan rob. Kondisi topografi yang rendah dan datar membuat pengaturan saluran drainase menjadi sulit karena kemiringan lahan yang relatif kecil. Gangguan genangan banjir sering terjadi di beberapa kawasan Kota Pekalongan. Sementara itu, kenaikan muka air laut global dan penurunan permukaan tanah di wilayah tersebut semakin memperburuk masalah ini. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan sistem drainase yang dipengaruhi oleh faktor hujan, kenaikan muka air laut, dan penurunan tanah di Kota Pekalongan. Pemodelan ini dilakukan dengan mengintegrasikan model 2D dan 1D menggunakan perangkat lunak Personal Computer Storm Water Management Model (PCSWMM). Hasil dari pemodelan mencakup tiga parameter, yaitu kedalaman banjir, kecepatan aliran banjir, dan durasi banjir. Selanjutnya, peta ancaman banjir dibuat berdasarkan Flood Hazard Index dengan menggabungkan ketiga parameter tersebut. Rekomendasi untuk mengatasi masalah ini meliputi pembuatan tanggul dan flap gate pada bagian terdampak banjir dari hulu, serta perubahan sistem drainase dengan mengalirkan air secara gravitasi tanpa menggunakan pompa pada bagian hilir. Namun, perlu diperhatikan bahwa rekomendasi ini tidak efektif pada skenario dengan penurunan tanah yang signifikan. Penelitian ini diharapkan dapat membantu pemangku kepentingan dalam pengambilan keputusan terkait pengelolaan sistem drainase di Kota Pekalongan.

**Kata-kata Kunci:** Drainase, PCSWMM, banjir, kenaikan muka laut, penurunan tanah

### Abstract

The coastal areas of Pekalongan City face a significant threat due to flooding and tidal surges. The low, flat topography complicates the management of drainage systems, given the relatively gentle land slope. Flooding incidents frequently occur in various parts of Pekalongan City. Furthermore, the global rise in sea levels and land subsidence in the region exacerbate this issue. This study aims to model the drainage system, considering factors such as rainfall, sea level rise, and land subsidence in Pekalongan City. The modeling is conducted by integrating 2D and 1D models using the Personal Computer Storm Water Management Model (PCSWMM) software. The modeling results encompass three parameters: flood depth, flood velocity, and flood duration. Subsequently, a flood hazard map is developed based on the Flood Hazard Index, incorporating these three parameters. Recommendations to address this issue include constructing embankments and flap gates upstream in flood-affected areas, as well as modifying the drainage system to enable gravity-driven water flow downstream without the use of pumps. However, it is essential to note that these recommendations may not be effective in scenarios involving significant land subsidence. This research is anticipated to assist stakeholders in making informed decisions regarding the management of the drainage system in Pekalongan City.

**Keywords:** Drainage, PCSWMM, flood, sea level rise, land subsidence

\* Penulis Korespondensi: miqbalhuseiny@gmail.com

## 1. Pendahuluan

Menurut Peraturan Daerah Kota Pekalongan (2020), dalam Rencana Tata Ruang Wilayah Nasional (RTRWN), Kota Pekalongan memiliki status sebagai Pusat Kegiatan Wilayah (PKW). Sebagai PKW, Kota Pekalongan diharapkan menjadi pusat pengembangan bagi wilayah sekitarnya, termasuk Kabupaten Pekalongan dan Kabupaten Batang. Hal ini membuat Kota Pekalongan memiliki posisi yang sangat strategis dalam perkembangan wilayah sekitarnya.

Kota Pekalongan, yang memiliki topografi sangat rendah, rentan terhadap banjir dan rob akibat pasang surut air laut (Iskandar dkk, 2020; S. Miftakhudin, 2021). Hal ini disebabkan oleh elevasi tanah di pesisir Pekalongan yang lebih rendah dari muka air laut ketika air laut pasang. Selain itu, sungai dan sistem drainase yang kurang terpelihara juga menjadi penyebab lamanya genangan banjir di daerah tersebut (Tisnawati dan Rabbani, 2023).

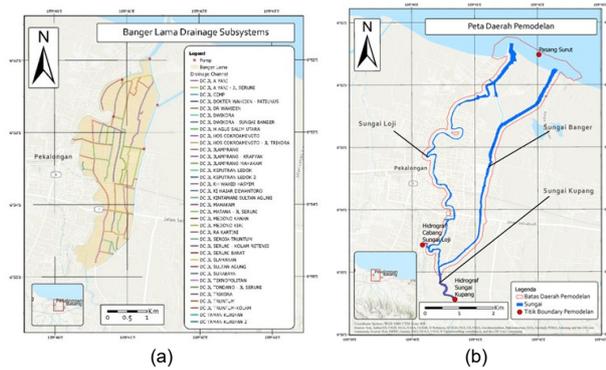
Masalah ini semakin memburuk karena terjadi penurunan tanah yang memperluas daerah-daerah yang rentan terhadap banjir rob (Andreas dkk, 2018). Data dari pemasangan patok ukur oleh Badan Geologi Kementerian ESDM menunjukkan bahwa Pekalongan mengalami penurunan tanah sebesar 6 cm per tahun di daerah utara dan 1,02 cm per tahun di daerah selatan. Selain itu, kenaikan permukaan laut secara global juga berdampak pada kondisi pesisir Kota Pekalongan. Penelitian yang menggunakan altimetri satelit untuk memprediksi tren kenaikan permukaan laut di Indonesia oleh NOAA (2020) menunjukkan bahwa laju kenaikan rata-rata di Indonesia lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata global.

Di sisi lain, dalam rentang tahun 2018-2023, Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana melakukan kegiatan *multiyear* dalam membangun tanggul penahan rob, bendung gerak, dan *long storage*. Perencanaan ini akan mengakibatkan beberapa sub sistem drainase di Kota Pekalongan mengalami perubahan. Perubahan ini, bersama dengan faktor eksternal lainnya seperti banjir, penurunan tanah, dan kenaikan permukaan laut, menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut untuk memahami dan mengatasi potensi masalah yang mungkin muncul akibat berbagai perubahan tersebut.

Penelitian yang dilakukan untuk memodelkan sistem drainase dan menganalisis ancaman banjir berdasarkan beberapa skenario dapat memberikan informasi penting bagi pihak-pihak yang terkait di daerah tersebut. Dengan pemodelan sistem drainase yang akurat, pihak-pihak terkait dapat merencanakan dan melaksanakan solusi yang tepat untuk mengatasi masalah yang muncul dan mencegah terjadinya potensi masalah di masa depan.

## 2. Lokasi Studi

Kota Pekalongan terletak di pesisir rendah utara Pulau Jawa dengan elevasi +0 hingga +6 meter di atas



Gambar 1. Subsistem banger lama dan peta daerah pemodelan

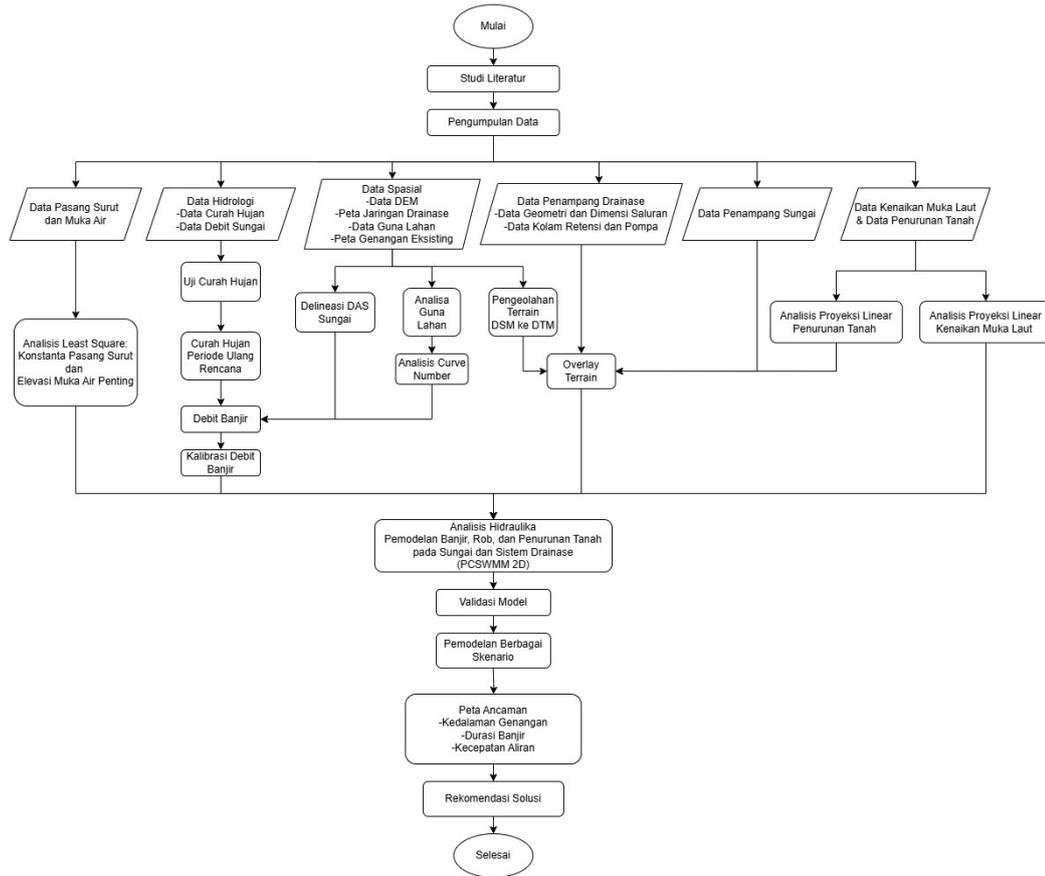
permukaan laut, secara geografis berada di 6°50'42"–6°55'44" LS dan 109°37'55"–109°42'19" BT. Berdasarkan Dokumen Revisi Masterplan Drainase Kota Pekalongan (2020), sistem drainase kota terbagi menjadi delapan subsistem, salah satunya adalah Subsistem Banger Lama yang menjadi fokus penelitian ini.

Subsistem Banger Lama mencakup area seluas 595,18 hektar dan dibatasi oleh dua sungai utama, yakni Sungai Banger dan Sungai Loji, serta berbatasan dengan laut. Kedua sungai ini merupakan cabang dari Sungai Kupang di hulu. Batasan ini menentukan tiga *input boundary* dalam pemodelan: pasang surut laut sebagai input hilir, hidrograf Sungai Kupang sebagai aliran hulu, dan hidrograf Sungai Loji sebagai input tambahan. **Gambar 1** memberikan representasi visual tata letak subsistem ini.

## 3. Metodologi

Kerangka alur pikir secara umum dalam penulisan studi ini terlihat pada **Gambar 2**.

Tahapan metodologi penelitian untuk studi ini mencakup tinjauan pustaka, pengumpulan data, analisis hidrologi, analisis pasang surut, analisis hidraulika, dan analisis ancaman banjir. Pengumpulan data melibatkan data dari berbagai sumber, seperti curah hujan, tutupan lahan, pasang surut, topografi, potongan lintang sungai, dan data drainase. Data curah hujan diperoleh dari Badan Pekerja Umum dan Penataan Ruang Daerah Provinsi Jawa Tengah (PUSDATARU) dalam bentuk curah hujan maksimum harian, data tersebut digunakan untuk menghitung curah hujan rencana. Data Tutupan Lahan, dalam bentuk peta spasial, didapatkan dari Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kota Pekalongan (BAPPEDA) untuk menentukan Curve Number dan Nilai Manning. Data pasang surut didapat dari hasil pengukuran oleh tim Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 2021. Data topografi, diperoleh dari pengukuran dengan pesawat tanpa awak (UAV) oleh tim ITB pada tahun 2022, dalam format raster dengan resolusi 0,5 x 0,5 meter dan digunakan untuk *terrain* pemodelan. Data kontur Sungai Banger, Loji, dan Kupang diperoleh dari PUSDATARU tahun 2020 digunakan untuk *terrain* pemodelan. Terakhir, data drainase, yang terdiri dari skema pengaliran drainase



Gambar 2. Diagram alir penelitian

dan penampang drainase, diperoleh dari dokumen “Revisi Masterplan Drainase Kota Pekalongan 2020” serta melalui survei langsung di lapangan.

Analisis hidrologi dilakukan berdasarkan pedoman Standar Nasional Indonesia (SNI) 2415:2016 tentang Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana. Ini mencakup uji statistik data hujan, penentuan curah hujan wilayah, analisis frekuensi, uji kecocokan distribusi, distribusi jam-jaman, hujan efektif, perhitungan debit banjir rencana, dan kalibrasi debit banjir. Analisis pasang surut dilakukan dengan metode Least Square untuk menghitung parameter persamaan pasang surut yang dapat digunakan untuk memprediksi elevasi penting pasang surut. Analisis kenaikan muka laut dan penurunan tanah dilakukan dengan pendekatan estimasi perubahan 25 tahun kedepan secara linear berdasarkan data historis yang ada. Analisis hidraulika dilakukan dengan mengintegrasikan model 2D dan 1D menggunakan perangkat lunak PCSWMM 2D dengan metode *dynamic wave* berdasarkan persamaan Saint-Venant.

Hasil utama penelitian ini adalah peta bahaya banjir yang mengintegrasikan berbagai parameter, yaitu kedalaman banjir, durasi banjir, dan kecepatan aliran banjir. Metode yang digunakan didasarkan pada Indeks Bahaya Banjir (Flood Hazard Index, FHI), yang dikembangkan oleh Tingsanchali dan Promping (2022), dengan **Persamaan (1)** dan **Persamaan (2)** berikut.

$$FHI = \alpha FHIT + \beta FHID + \mu FHIV \quad (1)$$

$$\alpha + \beta + \mu = 1 \quad (2)$$

Dalam penelitian oleh Tingsanchali dan Promping (2022), FHIT mewakili indeks durasi banjir, FHID mewakili indeks kedalaman banjir, dan FHIV mewakili indeks kecepatan aliran banjir. Faktor bobot  $\alpha = 0,63$ ,  $\beta = 0,26$ , dan  $\mu = 0,11$  digunakan untuk menilai pentingnya relatif masing-masing indeks. Selanjutnya, nilai-nilai FHIT, FHID, dan FHIV dihitung untuk indeks durasi banjir, kedalaman banjir, dan kecepatan aliran banjir di area penelitian Subsistem Banger Lama. **Tabel 1** menyajikan nilai indeks yang disesuaikan dari FHIT, FHID, dan FHIV untuk lokasi penelitian berdasarkan rentang yang telah ditentukan pada Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No 12 Tahun 2014 tentang Drainase Perkotaan. Selanjutnya, tingkat bahaya FHI ditentukan berdasarkan nilai yang dihasilkan, di mana tingkat bahaya dibagi menjadi sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi berdasarkan rentang nilai FHI yang ditetapkan.

## 4. Analisis dan Pembahasan

### 4.1 Analisis hidrologi

Analisis hidrologi yang dilakukan pada penelitian ini mencakup analisis hujan lokal pada daerah Subsistem Banger Lama serta analisis hujan di daerah aliran sungai (DAS) Kupang dan Loji. Di sekitar lokasi

Tabel 1. Indeks FHIT, FHID, FHIV, dan FHI

Indeks Ancaman	Indeks Durasi		Indeks Kedalaman		Indeks Kecepatan		Indeks Ancaman Skor FHI
	FHIT	Durasi (Jam)	FHID	Kedalaman (m)	FHIV	Kecepatan (m/s)	
Sangat Ringan	1	0 - 1	1	0 - 0,1	1	0 - 0,1	≤1
Ringan	2	1 - 2	2	0,1 - 0,2	2	0,1 - 0,5	1 < FHI ≤ 2
Sedang	3	2 - 4	3	0,2 - 0,3	3	0,5 - 0,6	2 < FHI ≤ 3
Berat	4	4 - 8	4	0,3 - 0,5	4	0,6 - 0,7	3 < FHI ≤ 4
Sangat Berat	5	> 8	5	> 0,5	5	> 0,7	4 < FHI ≤ 5

Tabel 2. Rekapitulasi perhitungan analisis frekuensi

Stasiun Hujan	Jenis Distribusi Terpilih	Hujan Periode Ulang (mm)						Persentase Luas Pengaruh Stasiun Hujan		
		2	5	10	20	25	50	DAS Kupang	DAS Loji	Subsistem Banger Lama
Pekalongan	GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	138	182	215	251	263	304	0,48%	30,68%	100%
Wonotunggal	GEV-Min (L-Moments)	145	200	236	269	279	310	39,03%	-	-
Kletak	GEV-Min (L-Moments)	116	152	173	191	196	212	7,96%	69,32%	-
Kurtosari	GEV-Min (L-Moments)	129	181	218	254	265	299	27,05%	-	-
Blado	GEV-Max (kappa specified)	132	171	200	232	242	278	25,48%	-	-

penelitian, terdapat 5 stasiun hujan yaitu Stasiun Pekalongan, Stasiun Wonotunggal, Stasiun Kletak, Stasiun Kurtosari, dan Stasiun Blado. Peta DAS Kupang dan Loji serta sebaran stasiun hujan dapat dilihat pada Gambar 3.

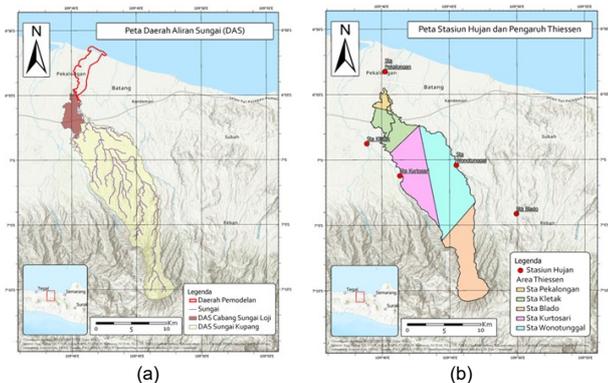
Data hujan yang didapatkan berupa data curah hujan harian maksimum tahunan selama 22 tahun dari periode 2000 hingga 2021. Data hujan dari kelima stasiun tersebut telah dilakukan beberapa metode uji statistik untuk memastikan validitasnya, seperti uji outlier, uji stasioner, uji trend, dan uji presistensi. Dari hasil uji statistik, dapat disimpulkan bahwa kelima stasiun dapat dipakai untuk perhitungan analisis hidrologi. Selanjutnya, perhitungan analisis frekuensi dibantu dengan menggunakan software Hydrognomon agar mendapat curah hujan rencana untuk periode ulang tertentu. Pemilihan distribusi probabilitas didasarkan pada nilai simpangan ( $d_{max}$ ) yang paling kecil pada Uji Kolmogorof Smirnov dan juga keberterimaan distribusi berdasarkan uji Chi-square.

Rekapitulasi perhitungan analisis frekuensi dan distribusi probabilitas yang terpilih dapat dilihat pada Tabel 2.

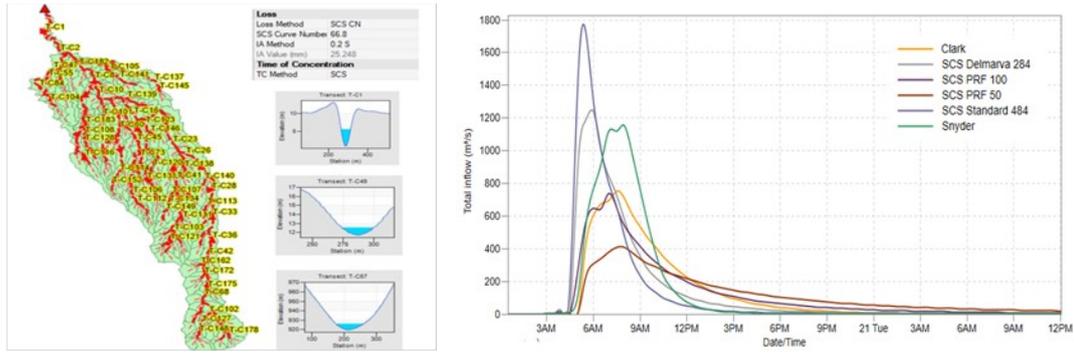
Pada DAS Kupang seluas 147,29 km<sup>2</sup>, dilakukan perhitungan area reduction factor (ARF) terlebih dahulu. Selanjutnya, dalam pembuatan hidrograf digunakan input berupa distribusi hujan jam-jaman PSA-007 dengan menggunakan distribusi hujan selama 6 jam. Analisis hidrograf debit banjir pada DAS dilakukan dengan bantuan perangkat lunak PCSWMM, dengan skema diskritisasi sub-DAS setiap 100-500 hektar seperti yang terlihat pada Gambar 4 (a). PCSWMM menyediakan model hidrograf satuan sintetik, seperti metode SCS, Clark, dan Snyder. Pada metode SCS, digunakan variasi Peak Rate Factor (PRF) yang bergantung pada topografi, jenis tanah, bentuk DAS, dan faktor lainnya. Hasil pemodelan hidrograf untuk debit periode ulang 25 tahun disajikan pada Gambar 4 (b).

Dari hasil hidrograf yang dihasilkan, dilakukan kalibrasi, validasi, dan pemilihan metode hidrograf yang paling mendekati debit observasi 25 tahun. Debit observasi diperoleh dari data AWLR Kuripan Kidul yang terletak pada outlet DAS dalam pemodelan. Berdasarkan analisis data AWLR periode 2003-2019, debit observasi untuk periode ulang 25 tahun adalah sebesar 330 m<sup>3</sup>/s.

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa metode SCS dengan PRF 50 menghasilkan debit puncak sebesar 409,6 m<sup>3</sup>/s. Meskipun nilainya masih lebih besar dibandingkan debit puncak observasi, metode ini memiliki hasil yang paling mendekati dibanding metode hidrograf lainnya. Oleh karena itu, metode SCS PRF 50 dipilih sebagai metode yang digunakan dalam pemodelan.



Gambar 3. Peta DAS Kupang dan Loji serta sebaran stasiun hujan



Gambar 4. (a) Pemodelan hidrograf PCSWMM (b) Hasil hidrograf periode ulang 25 tahun

### 4.2 Analisis pasang surut

Data yang akan digunakan untuk analisis pasang surut adalah data hasil pengamatan pasang surut di Pekalongan selama 15 hari pada tanggal 6 April – 20 April 2021. Dalam rangka mengetahui karakteristik pasang surut, dilakukan analisis dengan menggunakan metode Least Square. Hasil perhitungan menggunakan metode ini menghasilkan elevasi penting pasang surut sebagai berikut:

### 4.3 Penurunan tanah

Data penurunan muka tanah yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui pengolahan data InSAR dari tahun 2007-2009 dan pengamatan GPS (Global Positioning System) dari tahun 2017-2018 yang dilakukan oleh Kelompok Keilmuan Geodesi ITB. Data yang diperoleh merupakan gabungan dari pengamatan GPS dan InSAR, yang mencakup koordinat titik dan besarnya penurunan muka tanah yang diasumsikan memiliki tren linier. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis linier untuk memperkirakan perubahan Digital Elevation Model (DEM) dalam jangka waktu 25 tahun dan 50 tahun ke depan.

### 4.4 Kenaikan muka laut

Penelitian yang menggunakan altimetri satelit untuk memprediksi tren kenaikan permukaan laut di Indonesia oleh NOAA (2020) menunjukkan bahwa laju kenaikan rata-rata di Indonesia lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata global. Melalui data dari satelit altimetri TOPEX/POSEIDON dan Jason 1-3, memperkirakan bahwa Indonesia mengalami kenaikan permukaan laut hingga  $3,9 \pm 0,4$  mm/tahun antara tahun 1992 dan 2020. Namun, kenaikan ini tidak merata di semua wilayah Indonesia. Kenaikan permukaan laut tertinggi di

Indonesia terdeteksi di Samudera Pasifik di utara Papua, yang mencapai 10-12 mm/tahun, sedangkan kenaikan permukaan laut terendah terdeteksi di sebelah selatan Jawa, barat Sumatra, selatan Nusa Tenggara, dan Selat Karimata, yang hanya berkisar antara 2-4 mm/tahun (Fenoglio-Marc et al. 2012; Nababan et al. 2015). Selanjutnya, pada penelitian ini, analisis kenaikan muka laut untuk 25 tahun ke depan diasumsikan bersifat linear, khususnya dalam hubungannya dengan pasang surut pada pemodelan.

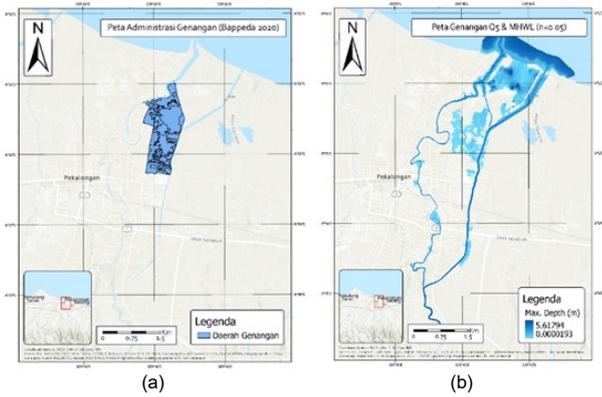
### 4.5 Set Up pemodelan PCSWMM

Pemodelan PCSWMM yang digunakan pada studi ini mengombinasikan model 1D dan 2D. Model 1D diterapkan untuk memodelkan saluran drainase, sedangkan model 2D digunakan pada terrain di Subsistem Banger Lama dengan ukuran mesh 30m x 30m untuk keseluruhan wilayah dan 5m x 5m untuk terrain sungai. Sebagai perangkat lunak pemodelan hujan-limpasan, PCSWMM mengintegrasikan hidrologi dan hidraulika secara langsung dalam domain 2D, di mana aliran permukaan dari hidrologi masuk ke saluran melalui titik persimpangan 1D/2D tertentu. Pendekatan ini menduplikasi sel 2D sebagai subcatchment, memastikan harmonisasi hidrologi dan hidraulika, serta meningkatkan akurasi spasial untuk hasil genangan banjir, terutama akibat hujan lokal (pluvial).

Dalam pemodelan 2D, nilai Manning ditentukan berdasarkan jenis penutup lahan dengan referensi dari penelitian McCuen et al. (1996). Nilai-nilai tersebut meliputi permukiman ( $n=0,05$ ), perkebunan ( $n=0,17$ ), lahan rumput ( $n=0,15$ ), sawah ( $n=0,13$ ), serta saluran drainase pasangan batu ( $n=0,035$ ). Untuk sungai, nilai Manning sebesar 0,05 ditetapkan melalui observasi visual berdasarkan buku *Open-Channel Hydraulic* oleh Ven Te Chow (1959), yang menggambarkan jenis

Tabel 3. Elevasi penting pasang surut

Jenis Elevasi		Elevasi (m)	Elevasi Datum MSL (m)
Highest Water Spring (HWS)	=	1,498	0,632
Mean High Water Spring (MHWS)	=	1,276	0,411
Mean High Water Level (MHWL)	=	1,042	0,176
Mean Sea Level (MSL)	=	0,865	0,000
Mean Low Water Level (MLWL)	=	0,709	-0,156
Mean Low Water Spring (MLWS)	=	0,545	-0,320
Lowest Water Spring (LWS)	=	0,388	-0,477



Gambar 5. (a) Peta genangan administratif Bappeda (b) Peta genangan model PCSWMM

sungai dengan dasar pasir kasar, alluvial, beberapa kerikil, tebing curam, serta vegetasi lebat, serupa dengan karakteristik Sungai Banger.

4.6 Validasi model PCSWMM

Untuk melakukan validasi area banjir, analisis model banjir dibandingkan dengan data genangan yang sebenarnya. Data genangan diperoleh dari Badan Perencanaan Daerah Kota Pekalongan (Bappeda) dalam dokumen "Revisi Masterplan Drainase Kota Pekalongan" tahun 2020. Peta genangan observasi dapat dilihat pada Gambar 5 (a), yang merupakan referensi visual dalam penelitian ini untuk validasi model. Data genangan ini mencakup peta administrasi wilayah yang mengalami banjir sungai dan genangan rob selama lima tahun terakhir.

Dalam proses validasi model, dilakukan simulasi debit sungai periode ulang 5 tahun dengan kondisi pasang air laut tinggi. Hasil simulasi banjir disajikan pada Gambar 5 (b). Secara visual, perbandingan ini memastikan akurasi model, karena sebagian besar daerah yang mengalami banjir berdasarkan data observasi juga terkena banjir saat dimodelkan. Adanya perbedaan dalam daerah yang tidak terkena banjir kemungkinan disebabkan oleh sifat data genangan dari Bappeda yang bersifat administratif, sehingga ada kemungkinan sebagian wilayah administratif yang tidak semuanya terdampak banjir.

4.7 Simulasi model PCSWMM

Pada tahap pemodelan drainase, dilakukan simulasi dengan menggunakan berbagai skenario. Skenario-skenario tersebut mencakup variasi kondisi hidrologi, muka air laut, dan topografi yang mungkin terjadi di daerah Subsistem Drainase Banger Lama. Tujuan dari

pengujian ini adalah untuk memahami respons sistem drainase dan melihat perubahan daerah genangan terhadap berbagai skenario. Kondisi skenario secara jelas dapat dilihat pada Tabel 4.

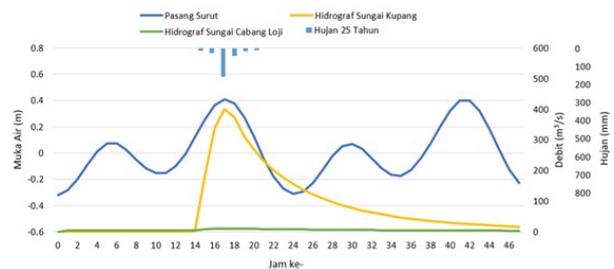
Kondisi *input boundary* dalam pemodelan yang berupa hujan lokal R25 di Subsistem Banger Lama, debit banjir Q25 dari Sungai Banger dan Loji, serta pasang tinggi HWL, terlihat dalam Gambar 6. Puncak hujan, debit sungai, dan pasang tinggi HWL terjadi secara bersamaan pada jam ke-17 sejak dimulainya simulasi. Tujuannya adalah untuk mendapatkan kondisi banjir terparah yang disebabkan oleh hujan, debit sungai, dan pasang air laut. Selanjutnya hasil pemodelan berupa genangan banjir, kondisi saluran, kedalaman banjir, kecepatan banjir, kecepatan di saluran, dan durasi banjir.

4.8 Peta ancaman

Berdasarkan hasil pemodelan sebelumnya, dilakukan penggabungan data untuk membentuk peta ancaman banjir. Proses penggabungan ini melibatkan penilaian atau skoring dengan memberikan bobot atau nilai pada setiap variabel yang menjadi acuan dalam pemodelan, seperti kedalaman banjir, kecepatan banjir, dan durasi banjir. Metode yang digunakan untuk penggabungan data ini adalah dengan menggunakan Indeks Ancaman Banjir (Flood Hazard Index/FHI) yang dikembangkan oleh Tingsanchali dan Promping (2022). Hasil dari perhitungan ancaman banjir direkapitulasi dalam Tabel 5.

Tabel 5 tersebut menunjukkan luasan area yang terdampak ancaman banjir untuk setiap skenario. Terlihat bahwa luasan area ancaman banjir berbeda-beda tergantung pada skenario yang digunakan. Luasan terbesar terdapat pada skenario 5, dengan luas mencapai 556 ha, sedangkan luasan terkecil terdapat pada skenario 1, dengan luas mencapai 22 ha.

Lebih lanjut, jika dilihat dari tingkat keparahan atau tingkat bahaya ancaman banjir yang ditetapkan, terlihat bahwa jumlah luasan area total dan juga luasan area dengan tingkat bahaya sangat berat meningkat seiring



Gambar 6. Input boundary pada pemodelan

Tabel 4. Kondisi setiap skenario pemodelan

Kondisi Input Pemodelan	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5
Hujan Lokal R25 di Subsistem Banger Lama	X	√	√	X	√
Debit Banjir Q25 Sungai Banger dan Loji	√	X	√	√	√
Pasang Tinggi (HWL)	√	√	√	√	√
Kenaikan Muka Laut 25 Tahun ke Depan	X	X	X	√	√
Penurunan Tanah 25 Tahun ke Depan	X	X	X	√	√

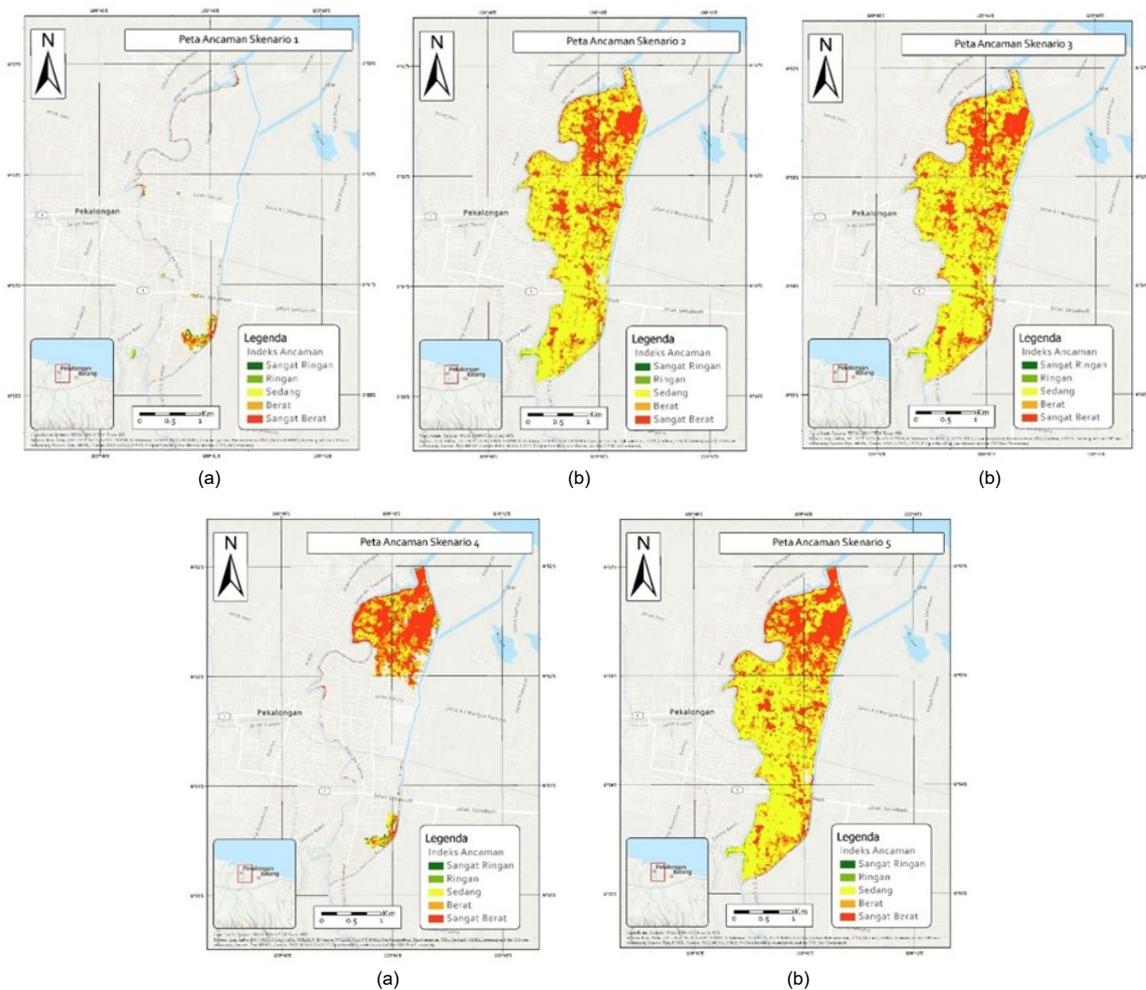
Tabel 5. Statistik luasan durasi banjir pada setiap skenario

Klasifikasi	Luas Area Ancaman di Subsistem Banger Lama (Ha)				
	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5
Sangat Ringan	0,66	0,01	0,03	1,14	0,05
Ringan	2,86	9,70	8,82	5,14	6,73
Sedang	4,04	341,03	335,08	28,49	317,98
Berat	4,65	98,78	101,28	50,70	105,76
Sangat Berat	9,75	103,83	108,40	88,97	125,52
Total	22,0	553,4	553,6	174,4	556,0

dengan peningkatan *input boundary* pada skenario. Pemetaan ancaman banjir pada Subsistem Banger Lama setiap skenario divisualisasikan pada **Gambar 7**.

Hasil pemodelan pada skenario 1 menunjukkan bahwa sebagian besar daerah genangan disebabkan oleh debit hidrograf dari DAS Sungai Kupang, sementara pengaruh dari DAS Cabang Sungai Loji terhadap genangan banjir relatif kecil. Sedangkan pada skenario 2, terlihat bahwa seluruh area subsistem Banger Lama ditutupi oleh genangan, hal ini dikarenakan hujan diturunkan pada area pemodelan sehingga membuat seluruh area subsistem Banger Lama terdapat genangan. Lalu pada skenario 3 area genangannya tidak terlalu berbeda dengan skenario 2. Hal ini dikarenakan terdapat hujan

lokal pada daerah drainase. Antara skenario 2 dan 3, yang membedakan secara visual yang adalah karena adanya hidrograf dari DAS Sungai Kupang sedikit memengaruhi daerah pada bagian bantaran Sungai Kupang. Selanjutnya pada skenario 4, terlihat bahwa adanya penurunan tanah dan kenaikan muka air laut berdampak signifikan pada daerah utara. Terlihat bahwa daerah tersebut mengalami genangan banjir yang bersifat semi-permanen, menunjukkan bahwa sistem drainase sudah tidak berfungsi dengan baik. Pada skenario ini terlihat genangan dominan diakibatkan oleh pasang surut air laut, sedangkan dari debit banjir relatif lebih sedikit. Terakhir, pada skenario 5 terlihat bahwa adanya penurunan tanah dan kenaikan muka air laut berdampak signifikan pada daerah utara. Selain itu,



Gambar 7. Peta Ancaman Banjir pada Setiap Skenario. (a) Skenario 1, (b) Skenario 2, (c) Skenario 3, (d) Skenario 4, (e) Skenario 5

skenario hujan juga menyebabkan seluruh area Subsistem Banger Lama tergenang oleh air.

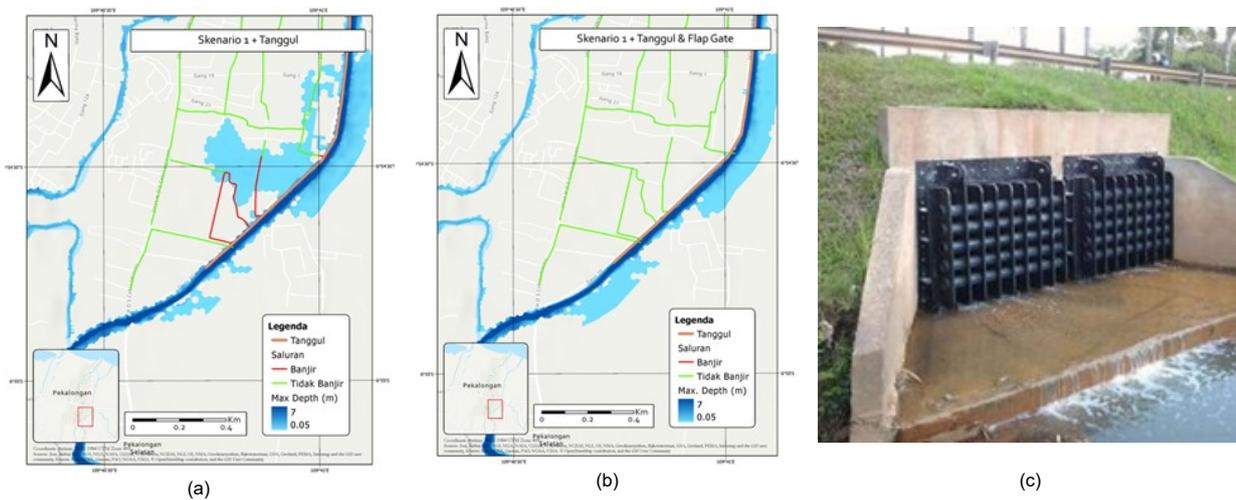
4.9 Rekomendasi solusi

Pada sub-bab ini, akan dijelaskan dua rekomendasi solusi yang dianggap efektif untuk mengurangi ancaman banjir, yaitu pembuatan tanggul di bagian yang terkena banjir dari hulu, serta perubahan sistem drainase dengan mengalirkan air secara gravitasi tanpa menggunakan pompa pada bagian hilir. Daerah yang terkena banjir akibat debit dari hulu dapat dilihat pada pemodelan sebelumnya dalam skenario 1 (SK1). Sebagai solusi, direncanakan pembangunan tanggul dengan ketinggian 1 meter yang akan melindungi daerah terdampak. Lokasi tanggul dapat dilihat pada Gambar 8. Namun, setelah dilakukan pemodelan ulang pada skenario 1 menggunakan tanggul, terungkap bahwa meskipun tanggul telah dibangun, banjir masih terjadi. Hal ini disebabkan karena aliran air banjir bukan berasal dari limpasan sungai, tetapi dari saluran drainase yang terhubung langsung dengan sungai. Oleh karena itu, solusi yang diusulkan adalah menggunakan sistem flap gate atau pintu air pada saluran drainase. Sistem ini akan beroperasi dengan menutup pintu secara otomatis pada saat muka air sungai tinggi dan terbuka otomatis saat muka air sungai sudah rendah. Hasil dari pemodelan dengan penggunaan tanggul dan flap gate dapat dilihat pada Gambar 8.

Selanjutnya, pada penelitian ini juga akan merekomendasikan solusi untuk mengatasi banjir di

bagian hilir yang disebabkan oleh tingginya muka air rob laut. Untuk mengatasi masalah ini, solusi yang sudah direncanakan oleh BBWS Pemali Juana adalah Bendung Gerak Loji. Setelah itu, solusi tambahan yang diusulkan adalah mengembalikan sistem drainase pompa di titik tertentu menjadi sistem gravitasi. Hal ini dikarenakan elevasi muka air hilir yang sudah lebih rendah akibat adanya Bendung Gerak Loji. Kolam pada Bendung Gerak Loji akan diatur agar tetap berada pada elevasi Mean Low Water Level (MLWL), yaitu sekitar -0,156 m. Perubahan saluran pada pemodelan dari sistem pompa menjadi sistem gravitasi dilakukan dengan menghilangkan tanggul penghalang agar saluran menjadi normal kembali.

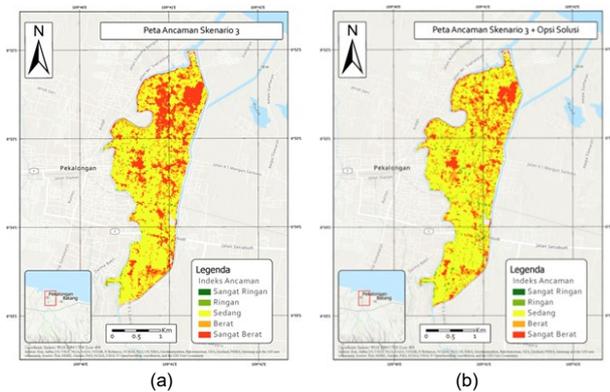
Selanjutnya, dilakukan pemodelan ulang dengan mensimulasikan skenario 3 untuk mengevaluasi dampak perubahan yang terjadi pada peta ancaman banjir. Hasil pemodelan menunjukkan adanya perubahan luasan pada tingkat ancaman banjir. Luasan tingkat ancaman berat mengalami penurunan dari 108,4 ha menjadi 64,77 ha, sedangkan tingkat sangat berat mengalami penurunan dari 101,28 ha menjadi 93,4 ha. Di sisi lain, terjadi peningkatan luasan pada tingkat ancaman sangat ringan dari 0,03 ha menjadi 0,05 ha, tingkat ringan dari 8,82 ha menjadi 16,59 ha, dan tingkat sedang dari 335,08 ha menjadi 378,8 ha. Pada indeks ringan terdapat peningkatan luasan tertinggi sebesar 88 %, sedangkan pada indeks sangat berat terjadi penurunan luasan tertinggi sebesar -40,3 %. Informasi lebih rinci mengenai hasil pemodelan dapat dilihat pada Tabel 6, sedangkan perubahan peta ancaman banjir dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 8. (a) Pemodelan SK1 dengan tanggul; (b) Pemodelan SK1 dengan tanggul dan flap gate; (c) Contoh flap gate

Tabel 6. Perubahan tingkat ancaman pada skenario 3

Klasifikasi	Luas (Ha)		Perubahan (%)
	Skenario 3	Skenario 3 dengan Solusi	
Sangat Ringan	0,03	0,05	65,2
Ringan	8,82	16,59	88,0
Sedang	335,08	378,80	13,0
Berat	101,28	93,40	-7,8
Sangat Berat	108,40	64,77	-40,3
Total	553,62	553,60	



Gambar 9. Perbandingan perubahan peta ancaman dengan rekomendasi solusi

Dengan menerapkan rekomendasi solusi yang telah disampaikan, terbukti bahwa rekomendasi tersebut dapat mengurangi tingkat ancaman banjir pada sistem drainase, baik di bagian hulu maupun hilir, serta meningkatkan efektivitas sistem drainase di wilayah yang terdampak. Namun, penting untuk dicatat bahwa rekomendasi solusi ini tidak dapat diterapkan pada skenario 4 dan 5. Hal ini disebabkan oleh penurunan tanah yang terjadi pada wilayah tersebut. Akibat dari penurunan tanah, posisi bendung gerak menjadi tenggelam, sehingga bendung gerak tidak lagi efektif dan tidak berpengaruh terhadap banjir pada bagian hilir.

## 5. Kesimpulan

1. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis berbagai faktor yang memengaruhi ancaman banjir di Subsistem Banger Lama. Beragam aspek fisik, seperti debit banjir dari hulu, hujan lokal, pasang surut, kenaikan muka air laut, dan penurunan tanah, telah dimodelkan untuk memahami dampaknya terhadap kejadian banjir. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa banjir di wilayah ini lebih dominan disebabkan oleh hujan lokal dan rendahnya kualitas serta kapasitas sistem drainase, sementara pengaruh banjir sungai dari hulu tidak terlalu signifikan.
2. Pemetaan ancaman banjir berdasarkan *Flood Hazard Index* mengidentifikasi bahwa skenario banjir terparah terjadi pada skenario 5, dengan debit banjir hulu sebesar 409,6 m<sup>3</sup>/s, curah hujan periode ulang 25 tahun sebesar 263 mm, kondisi air laut pasang HWL, serta proyeksi kenaikan muka laut dan penurunan tanah selama 25 tahun ke depan. Pada skenario ini, luas wilayah dengan indeks ancaman sangat berat dan berat menghasilkan luasan tertinggi. Sebaliknya, kondisi banjir paling ringan terjadi pada skenario 1, dengan input boundary berupa debit banjir hulu periode ulang 25 tahun dan kondisi air laut pasang HWL, yang menghasilkan luasan terdampak hanya sekitar 55 hektar.
3. Sebagai solusi, penelitian merekomendasikan pembangunan tanggul, pemasangan flap gate, serta optimalisasi sistem drainase gravitasi. Implementasi solusi ini terbukti efektif, dengan peningkatan luasan wilayah tingkat ancaman rendah sebesar 88% dan pengurangan luasan dengan ancaman sangat berat

hingga 40,3%. Namun, perlu dicatat bahwa rekomendasi ini tidak berlaku untuk skenario dengan penurunan tanah, karena kondisi tersebut membuat bendung gerak tidak efektif dalam mengatasi banjir di bagian hilir.

4. Dengan adanya peta ancaman banjir yang telah diklasifikasikan, informasi mengenai tingkat ancaman banjir di berbagai daerah akan lebih terstruktur dan mudah dipahami. Hal ini akan membantu dalam pengambilan keputusan terkait mitigasi banjir, pengembangan infrastruktur, dan perencanaan wilayah yang lebih baik dan efektif.

## Ucapan Terimakasih

Kami berterima kasih kepada Computational Hydraulics International (CHI) atas penyediaan lisensi mahasiswa untuk perangkat lunak PCSWMM 2D, yang sangat penting dalam menjalankan penelitian ini.

## Daftar Pustaka

- Andreas, H., Abidin, H.Z., Sarsito D.A., Pradipta, D., 2018. *Insight Analysis On Dyke Protection Against Land Subsidence And The Sea Level Rise Around Northern Coast Of Java (Pantura) Indonesia*. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning* 5, 101. <https://doi.org/10.14710/geoplanning.5.1.101-114>
- Anindita, R. M., Susilowati, I., & Muhammad, F., 2020. *Analisis efektivitas tanggul laut di pesisir Pekalongan terhadap penurunan intensitas banjir*. *Seminar Nasional Teknologi Industri Hijau* 3, 2(1), 80–88. Retrieved from <http://prosiding-sntih.kemenerin.go.id/index.php/sntih/article/view/105>
- Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kota Pekalongan., 2020. *Laporan Akhir Pekerjaan Penyusunan Revisi Masterplan Drainase Kota Pekalongan*.
- Badan Standardisasi Nasional., 2016. *Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana (SNI 2415:2016)*. Jakarta.
- Cahyono, C., & Adidarma, W. K., 2019. *Influence analysis of peak rate factor in the flood events' calibration process using HEC-HMS. Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1705–1722. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00625-8>
- Chaudhry, M. H., 2008. *Open-Channel Flow*. Springer Verlag.
- Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Provinsi Jawa Tengah., 2020. *Laporan Akhir Bendung Gerak Kali Loji*, Kota Pekalongan.
- Indonesia Climate Change Sectoral Roadmap. [ICCSR]., 2010. *Scientific basis: analysis and projection of sea level rise and extreme weather*

events. Jakarta: Ministry of National Development Planning or National Development Planning Agency, Republic of Indonesia.

Iskandar, S. A., Helmi, M., Muslim, M., Widada, S., & Rochaddi, B., 2020. *Analisis Geospasial Area Genangan Banjir Rob dan Dampaknya pada Penggunaan Lahan Tahun 2020 - 2025 di Kota Pekalongan Provinsi Jawa Tengah*. Indonesian Journal of Oceanography, 2(3), 271-282. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i3.8668>

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana. 2020. *Desain Penyempurnaan Banjir Dan Rob Kota Dan Kabupaten Pekalongan*.

Kementerian Pekerjaan Umum., 2014. *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No 12 Tahun 2014 tentang Drainase Perkotaan*.

Maranzoni, A., D'Oria, M., & Rizzo, C., 2023. *Quantitative flood hazard assessment methods: A review*. Journal of Flood Risk Management. John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12855>

Miftakhudin, S., 2021. *Strategi Penanganan Banjir Rob Kota Pekalongan*. Jurnal Litbang Kota Pekalongan, 20. <https://doi.org/10.54911/litbang.v20i.142>

National Oceanic and Atmospheric Administration., 2020. *Laboratory for satellite altimetry/sea level rise*. <https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaLevelRise>

Peraturan Daerah Kota Pekalongan., 2020. *Perubahan atas Peraturan Daerah Kota Pekalongan Nomor 30 Tahun 2011 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Pekalongan Tahun 2009-2029*, Nomor 9 Tahun 2020.

Tingsanchali, T., & Promping, T., 2022. *Comprehensive Assessment of Flood Hazard, Vulnerability, and Flood Risk at the Household Level in a Municipality Area: A Case Study of Nan Province, Thailand*. Water (Switzerland), 14(2). <https://doi.org/10.3390/w14020161>

Tisnawati, T., Rabbani, N., 2023. *Penataan dan Evaluasi Kondisi Saluran Drainase di Kelurahan Tirta Kota Pekalongan*. Pena Abdimas : Jurnal Pengabdian Masyarakat 4, 9. doi:10.31941/abdms.v4i1.2320

Triana, K., & Wahyudi, A. J., 2020. *Sea level rise in Indonesia: The drivers and the combined impacts from land subsidence*. ASEAN Journal on Science and Technology for Development, 37(3), 115-121. <https://doi.org/10.29037/AJSTD.627>