

Strategi Pengendalian Banjir Sungai Banger Kota Pekalongan terhadap Penurunan Muka Tanah dan Kenaikan Muka Laut

Flood Control Strategy of The Banger River in Pekalongan City Considering Land Subsidence and Sea Level Rise

Gilang Alfajar^{1)*} Arno Adi Kuntoro²⁾ Eka Oktariyanto Nugroho³⁾ Imron Rosyidi⁴⁾
Sella Lestari Nurmaulia⁵⁾ Mohammad Iqbal Huseiny⁶⁾ Nur Laili Yasinta⁷⁾
Irfie Lutfiah Aulia Rahman⁸⁾

^{1) 6) 7) 8)} Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10, Kota Bandung, Indonesia

^{2) 3)} Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10, Kota Bandung, Indonesia

⁴⁾ Badan Perencanaan Pembangunan, Riset, dan Inovasi Daerah Kota Pekalongan
Jl. Sriwijaya No. 44, Kota Pekalongan, Indonesia

⁵⁾ Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10, Kota Bandung, Indonesia

*Corresponding author: gialfajar@gmail.com

Diterima: 19 Februari 2025; Direvisi: 24 Juni 2025; Diterima: 31 Desember 2025

Abstract

Pekalongan City, located on the northern coast of Central Java, is vulnerable to flooding due to high rainfall, low land elevation, land subsidence, sea level rise, and uncontrolled human activities. The Banger River, originally constructed as an artificial river to reduce flooding from the Loji River, has now become a source of flooding. This study aims to identify technical flood control solutions for the Banger River using spatial, hydrological, tidal, and hydraulic analyses supported by hydraulic flow modeling software. Twenty years of rainfall data, spatial data, river geometry, and tidal information were used to simulate existing and projected long-term conditions. The design flood discharge with a 20-year return period was calculated at 281,9 cubic meters per second, resulting in an average inundation of 0,27 meters, which may rise to 0,85 meters within the next ten years due to land and sea level changes. Three alternatives were evaluated: normalization with earth embankment, a combination of normalization and parapet, and parapet-only implementation. Results indicate that using parapets, or combining them with river normalization and embankments, offers the most technically effective flood control solution in both short and long terms. Overall, the study emphasizes the need for adaptive flood management strategies in coastal urban areas. It is recommended that local governments integrate structural measures with non-structural policies, such as land use regulation and public awareness, to ensure sustainable flood risk reduction.

Keywords: Flood Control, Banger River, HEC-RAS, Land Subsidence, Sea Level Rise.

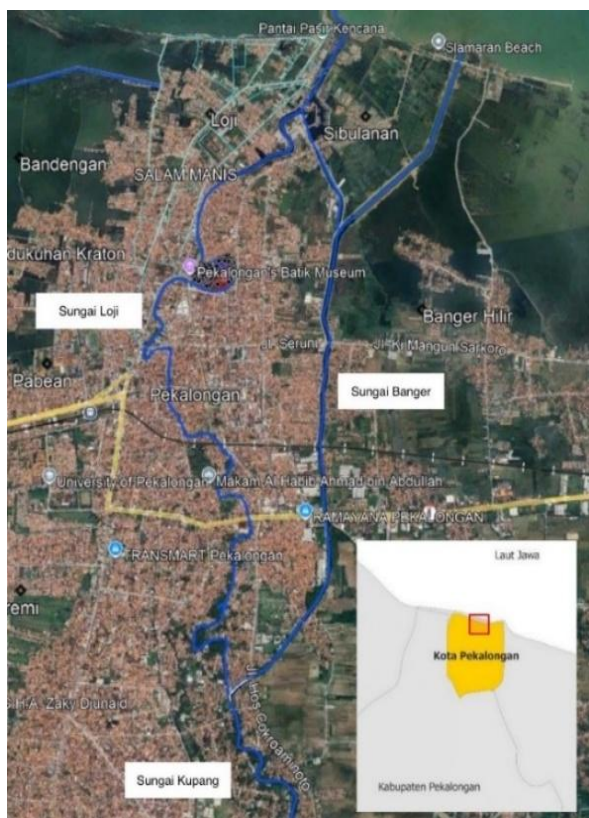
Abstrak

Kota Pekalongan yang terletak di pesisir utara Jawa Tengah rentan terhadap banjir akibat tingginya curah hujan, elevasi lahan yang rendah, penurunan muka tanah, kenaikan muka air laut, serta aktivitas manusia yang tidak terkendali. Sungai Banger, yang awalnya dibangun sebagai sungai buatan untuk mengurangi banjir dari Sungai Loji, saat ini justru menjadi salah satu sumber terjadinya banjir. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi solusi teknis pengendalian banjir Sungai Banger melalui analisis spasial, hidrologi, pasang surut, dan hidraulika yang didukung oleh perangkat lunak pemodelan aliran hidraulik. Data curah hujan selama 20 tahun, data spasial, geometri sungai, serta informasi pasang surut digunakan untuk mensimulasikan kondisi eksisting dan proyeksi jangka panjang. Debit banjir rencana dengan periode ulang 20 tahun diperoleh sebesar 281,9 m³/detik, yang menghasilkan tinggi genangan rata-rata 0,27 m, dan diperkirakan dapat meningkat hingga 0,85 m dalam sepuluh tahun ke depan akibat pengaruh penurunan muka tanah dan kenaikan muka air laut. Tiga alternatif pengendalian banjir dievaluasi, yaitu normalisasi sungai dengan tanggul tanah, kombinasi normalisasi sungai dan parapet, serta penerapan parapet saja. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan parapet, baik secara tunggal maupun dikombinasikan dengan normalisasi sungai dan tanggul, merupakan solusi pengendalian banjir yang paling efektif secara teknis dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya penerapan strategi pengelolaan banjir yang adaptif di wilayah perkotaan pesisir. Oleh karena itu, pemerintah daerah disarankan untuk mengintegrasikan upaya struktural dengan kebijakan non-struktural, seperti pengaturan tata guna lahan dan peningkatan kesadaran masyarakat, guna menjamin pengurangan risiko banjir yang berkelanjutan.

Kata Kunci: Pengendalian Banjir, Sungai Banger, HEC-RAS Penurunan Muka Tanah, Kenaikan Permukaan Air Laut

PENDAHULUAN

Kota Pekalongan berada di kawasan pesisir Pantai Utara Pulau Jawa, dengan topografi relatif datar dan ketinggian antara 0 hingga 6 meter di atas permukaan laut (Miftakhudin, 2021). Kondisi ini menjadikan wilayah tersebut rentan terhadap banjir. Fenomena ini semakin diperburuk oleh perubahan tata guna lahan, kenaikan muka air laut (*sea level rise*), penurunan muka tanah (*land subsidence*), sampah, dan curah hujan ekstrem akibat perubahan iklim (Gradiyanto dkk., 2024; Putri, 2024; Laksmi, 2020). Kota Pekalongan mengalami laju penurunan muka tanah (*land subsidence*) yang bervariasi dengan rata-rata sekitar 12 cm per tahun (Miftakhudin, 2021), sementara kenaikan muka air laut (*sea level rise*) tercatat sebesar 4,3 mm per tahun. Kombinasi dari kedua faktor ini diprediksi dapat memicu banjir yang menggenangi area seluas 1877,07 hektar (Iskandar dkk., 2020).



Gambar 1 Lokasi Sungai Banger Kota Pekalongan

Sungai Banger, seperti yang disajikan pada Gambar 1 merupakan salah satu sungai utama di Kota Pekalongan yang berperan penting dalam pengelolaan sumber daya air. Sungai ini pada awalnya dibangun sebagai sungai buatan untuk mengurangi banjir akibat genangan dari Sungai Loji. Namun, saat ini Sungai Banger menghadapi tantangan berupa banjir yang disebabkan oleh sedimentasi, penurunan kapasitas hidraulis, serta

aktivitas manusia yang tidak terkendali (Driyogo dkk., 2013; Juliadi dkk., 2024). Dampaknya meluas ke berbagai sektor, termasuk pemukiman, lahan pertanian, serta infrastruktur publik (M. Huda dkk., 2023).

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh urgensi untuk mengidentifikasi dan merumuskan solusi teknis dalam pengendalian banjir di Sungai Banger, terutama pada skenario jangka pendek dan jangka panjang. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, upaya pengendalian banjir yang efektif mencakup penggunaan teknologi pemodelan hidraulika seperti HEC-RAS, serta perencanaan struktur fisik seperti tanggul tanah, parapet, dan normalisasi sungai (Andari dkk., 2023).

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menghasilkan alternatif solusi pengendalian banjir Sungai Banger yang efisien dari segi teknis. Manfaat penelitian ini meliputi pengurangan risiko kerusakan ekonomi dan sosial, peningkatan efektivitas manajemen banjir, serta kontribusi terhadap pengembangan infrastruktur pengendalian banjir yang berkelanjutan. Lokasi penelitian dipilih di wilayah Sungai Banger, Kota Pekalongan, karena tingginya tingkat kerentanan terhadap banjir serta relevansinya dengan Rencana Aksi Nasional Adaptasi Perubahan Iklim (RAN-API) (Miftakhudin, 2021).

Metode penelitian meliputi analisis hidrologi, hidraulika, dan simulasi menggunakan perangkat lunak HEC-RAS untuk mengevaluasi skenario pengendalian banjir. Inovasi utama dari penelitian ini adalah pemanfaatan skenario prediktif terhadap kombinasi penurunan muka tanah dan kenaikan muka laut dalam perencanaan jangka panjang, serta evaluasi efektivitas beberapa alternatif solusi struktural seperti normalisasi, tanggul tanah, dan parapet secara terintegrasi. Literatur yang digunakan mencakup penelitian sebelumnya terkait pengelolaan banjir di Pekalongan, data sekunder seperti curah hujan, debit sungai, dan peta topografi, serta kebijakan nasional yang relevan.

Sejumlah studi internasional telah menggunakan pendekatan pemodelan untuk mengantisipasi *compound flooding* di wilayah pesisir. Misalnya pada kawasan utara Jakarta diterapkan model HEC-RAS 1D-2D, yang menggambarkan bagaimana kombinasi aliran sungai, gelombang, dan kenaikan muka laut dapat menyebabkan luapan sungai saat badai, bahkan melebihi pertahanan pantai eksisting pada tahun 2100 (Bennett dkk., 2023). Studi ini memperkuat relevansi integrasi skenario perubahan muka tanah dan muka laut dalam simulasi hidraulik untuk perencanaan pengendalian banjir di kawasan pesisir urban seperti Kota Pekalongan.

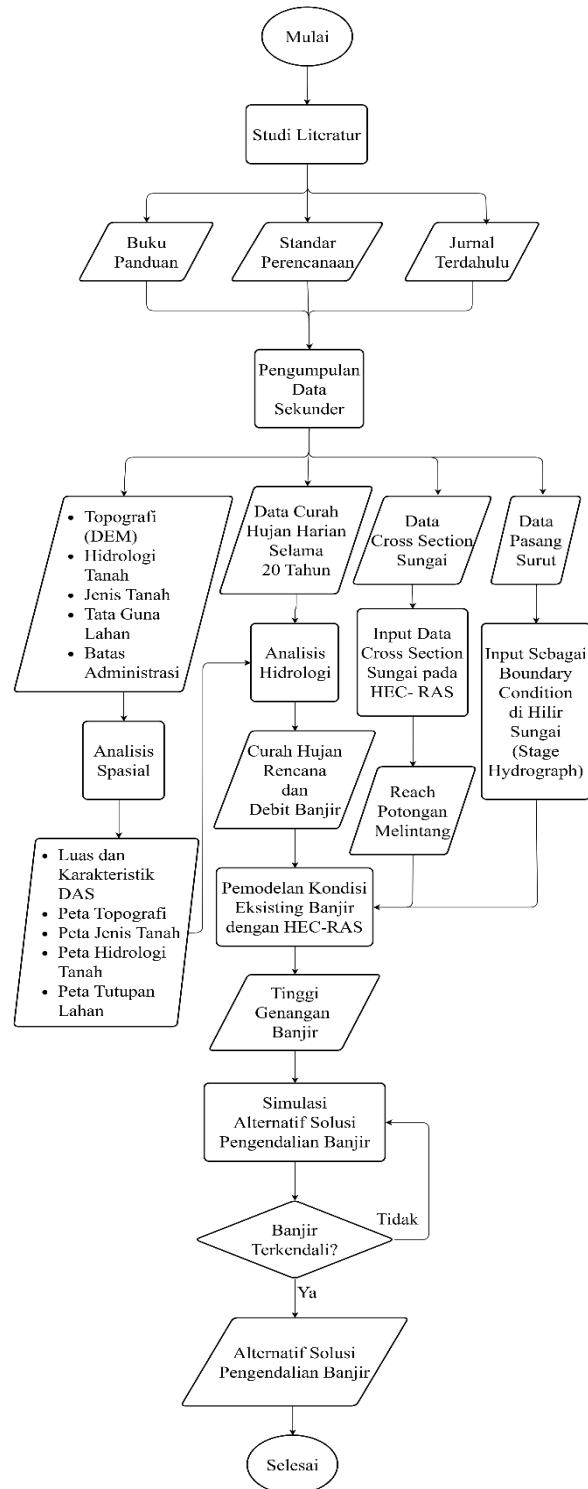
Penelitian ini diharapkan memberikan inovasi dalam penanganan banjir perkotaan dengan mengintegrasikan pendekatan teknis, spasial, dan kebijakan. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mendukung program nasional pengurangan risiko bencana sebagaimana tercantum dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) (Miftakhudin, 2021).

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan yang sistematis dan terstruktur untuk merumuskan solusi pengendalian banjir di Sungai Banger, Kota Pekalongan. Pendekatan tersebut disusun agar setiap tahapan penelitian saling terkait secara logis, mulai dari perumusan masalah hingga penyusunan rekomendasi teknis pengendalian banjir. Metode penelitian meliputi desain penelitian, pengumpulan data, analisis, serta pemodelan hidrologi dan hidraulika.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan kombinasi metode probabilistik dan deterministik. Metode probabilistik digunakan untuk menganalisis karakteristik hujan dan debit banjir rencana berdasarkan data hidrologi historis, termasuk analisis frekuensi hujan dan penentuan periode ulang. Sementara itu, metode deterministik diterapkan dalam analisis hidraulika untuk mengevaluasi perilaku aliran sungai, kapasitas tampung alur sungai, serta kondisi muka air banjir pada berbagai skenario debit rencana.

Desain penelitian dirancang untuk mengevaluasi kapasitas eksisting Sungai Banger dalam menyalurkan debit banjir, mengidentifikasi permasalahan utama yang berkontribusi terhadap terjadinya banjir, serta mengembangkan alternatif solusi pengendalian banjir yang sesuai dengan kondisi lapangan. Evaluasi kapasitas sungai dilakukan dengan membandingkan debit banjir rencana terhadap kapasitas hidraulik sungai pada kondisi eksisting sehingga dapat diketahui segmen-segmen sungai yang berpotensi mengalami limpasan. Alur keseluruhan tahapan penelitian ini disajikan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data sekunder yang bersumber dari instansi dan referensi terpercaya. Data yang digunakan meliputi:

a. Data Curah Hujan

Data curah hujan harian bersumber dari Dinas Pekerjaan Umum dan Tata Ruang Kota Pekalongan. Data yang digunakan berasal dari tujuh stasiun hujan yang berpengaruh dengan panjang data 20 tahun, yaitu periode 2001–2020, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Stasiun Curah Hujan DAS Kupang

Pos Hujan	Koordinat	
	Latitude	Longitude
Tapak Menjangan	-7,03981	109,69194
Pekalongan	-6,88739	109,67078
Pesantren Kletak	-6,97936	109,64828
Batang	-6,92078	109,73528
Kutosari Doro	-7,02033	109,68883
Bandar	-7,03097	109,79833
Blado	-7,06908	109,83222

b. Data Tata Guna Lahan

Data tata guna lahan berbentuk data *shapefile* yang bersumber dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

c. Data Topografi

Data topografi berbentuk *Digital Elevation Model (DEM)* yang bersumber dari Forest And Buildings removed Copernicus DEM (FABDEM) dengan resolusi spasial global sekitar 30 meter (atau 1 arc-second). Data ini pertama kali dirilis pada tahun 2022, dengan versi terbarunya, FABDEM v1.2, dirilis pada Januari 2023 (Hawker dkk., 2022).

d. Data Jenis atau Klasifikasi Tanah

Data jenis tanah berbentuk data *shapefile* yang bersumber dari *Digital Soil Map of the World*, Food and Agriculture Organization (FAO).

e. Data Geometri Sungai

Data geometri sungai berbentuk data gambar *AutoCAD* yang bersumber dari BBWS Pemali Juana.

f. Data Pasang Surut

Data pasang surut berbentuk data pencatatan pasang sarut yang bersumber dari Badan Informasi Geospasial (BIG).

Data-data tersebut kemudian akan diolah melalui berbagai analisis untuk merumuskan strategi perencanaan pengendalian banjir yang meliputi:

a. Analisis Spasial

Data spasial yang tersedia mencakup data *DEM*, data tata guna lahan, data jenis tanah, dan berbagai data spasial lainnya. Data ini kemudian dianalisis secara spasial menggunakan perangkat lunak GIS.

b. Analisis Hidrologi

Analisis hidrologi dilakukan untuk mengevaluasi berbagai parameter seperti curah hujan rencana, hidrograf banjir, dan debit banjir, yang mengikuti pedoman dari standar seperti SNI 2415:2016 tentang Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana; SNI 1724:2015 Tentang Analisis Hidrologi, Hidraulik, dan Kriteria Desain Bangunan di Sungai; serta referensi lainnya. Tahapan-tahapan yang dilakukan meliputi:

1. Pada data curah hujan yang tersedia, dilakukan uji penyaringan dan uji konsistensi.
2. Pada data yang telah teruji keandalannya selanjutnya dilakukan analisis frekuensi untuk menafsirkan probabilitas kejadiannya dengan metode Distribusi probabilitas Normal, Log Normal, Gumbell dan Log Pearson III pada masing-masing data curah hujan per stasiun curah hujan.
3. Dilakukan kembali uji probabilitas dengan menggunakan metode *Chi Square* dan Metode Smirnov Kolmogorov.
4. Kemudian ditentukan besaran pengaruh curah hujan per masing-masing stasiun curah hujan dengan metode *Polygon Thiessen* sehingga diperoleh curah hujan wilayah rencana untuk periode ulang tertentu.
5. Analisis debit bajir rencana dengan curah hujan rencana periode ulang 20 tahun dilakukan mengikuti metode Hidrograf Satuan Sintesis (HSS) Nakayasu, HSS SCS-Snyder, HSS SCS-CN, HSS ITB-1b, dan HSS-2b.
6. Dilakukan verifikasi berdasarkan debit yang terjadi di lapangan untuk menentukan debit banjir rencana yang akan digunakan pada analisis hidraulika.

c. Analisis Pasang Surut

Analisis pasang surut menggunakan data stasiun pasang surut Pekalongan selama 15 hari yang diperoleh dari data sekunder tinggi air yang berasal dari Badan Informasi Geospasial (BIG). Peramalan pasang surut dilakukan dengan menggunakan metode *Least Square*. Hasil peramalan akan dianalisis sehingga mencakup beberapa elevasi penting dari pasang surut. Hasil

peramalan dikalibrasi dengan data di lapangan menggunakan metode *Mean Relative Error (MRE)*.

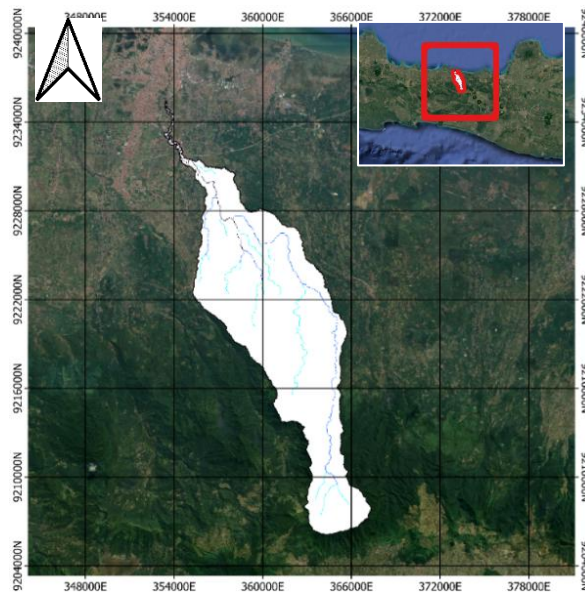
d. Analisis Hidraulika

Analisis hidraulika dilakukan dengan cara pemodelan menggunakan perangkat lunak HEC-RAS 6.2. Beberapa data yang dipakai pada tahap ini yaitu debit banjir rencana hasil analisis hidrologi, data pasang surut, serta data penampang sungai. Pemodelan hidraulika dilakukan untuk mengetahui kondisi banjir eksisting dan efektivitas dari alternatif bangunan pengendali banjir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

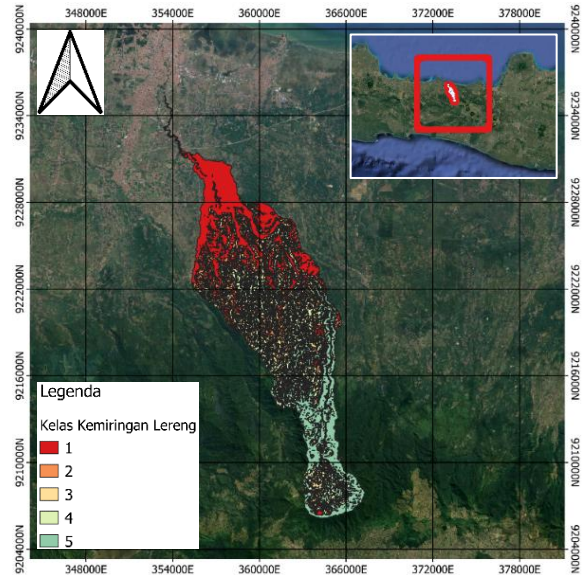
Analisis Spasial

Daerah Aliran Sungai (DAS) Kupang mencakup beberapa kota dan kabupaten di Provinsi Jawa Tengah, yakni Kabupaten Pekalongan, Kabupaten Batang, Kabupaten Banjarnegara, dan Kota Pekalongan (Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana). DAS Kupang memiliki luas DAS sebesar 126,12 km², Sungai Kupang merupakan sungai utama yang mengalir di DAS Kupang yang memiliki panjang mencapai 53,23 km (N. Huda dkk., 2014). Gambar 3 merupakan hasil delineasi DAS Kupang.



Gambar 3 Delineasi DAS Kupang

Seperti pada Gambar 4, Topografi di daerah DAS Kupang menunjukkan keragaman yang signifikan, mulai dari datar, landai, agak curam, curam, hingga sangat curam. Luasan masing-masing kelas kemiringan disajikan pada Tabel 2.

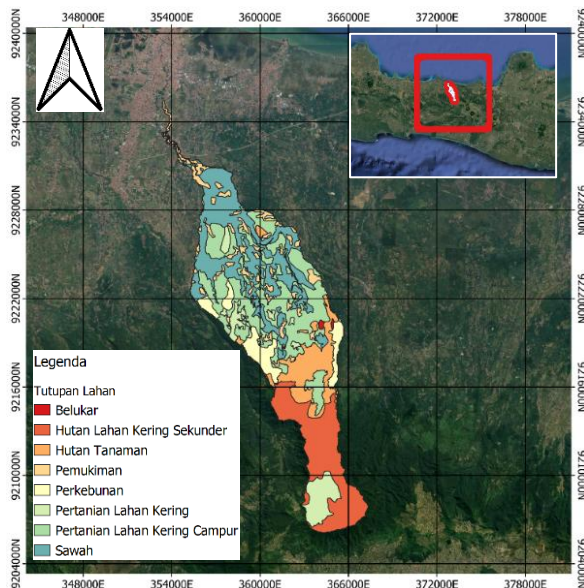


Gambar 4 Topografi DAS Kupang

Tabel 2 Klasifikasi Kemiringan DAS Kupang

Kelas	Kemiringan (%)	Klasifikasi	Luas (ha)	Persentase
1	0 - 8	Datar	3158	26%
2	>8 - 15	Landai	2203	18%
3	>15 - 25	Agak Curam	2354	19%
4	>25 - 45	Curam	2420	20%
5	>45	Sangat Curam	2154	18%

Seperti pada Gambar 5 dan Tabel 3, tutupan lahan di wilayah DAS Kupang mencakup hutan, perkebunan, tanaman musim, ladang / tegalan pertanian, kebun campuran, dan kawasan permukiman.

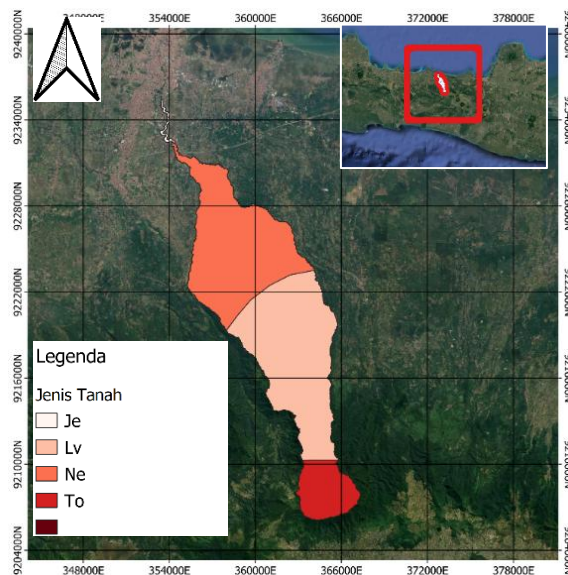


Gambar 5 Tutupan Lahan DAS Kupang

Tabel 3 Klasifikasi Tutupan Lahan DAS Kupang

Tutupan Lahan	Luas (ha)	Persentase
Belukar	29	0,23%
Hutan Lahan Kering Sekunder	2278	18,06%
Hutan Tanaman	1244	9,86%
Pemukiman	912	7,23%
Perkebunan	804	6,38%
Pertanian Lahan Kering	914	7,24%
Pertanian Lahan Kering Campur	3421	27,13%
Sawah	3010	23,86%

DAS Kupang memiliki beberapa jenis tanah, yaitu tanah aluvial dan tanah latosol. Menurut klasifikasi sistem FAO, *Eutric Fluvisols* (Je) adalah tanah aluvial yang terbentuk dari endapan sungai. *Vertic Luvisols* (Lv) memiliki kandungan liat yang tinggi dengan retakan besar saat kering. *Eutric Nitosols* (Ne) merupakan tanah yang kaya basa dengan struktur granular baik, berwarna merah atau coklat tua. *Ochric Andosols* (To) adalah tanah vulkanik muda yang kaya material organik, berwarna gelap, dan memiliki daya serap air tinggi. Gambar 6 dan Tabel 4 menunjukkan jenis-jenis tanah yang terdapat di DAS Kupang.

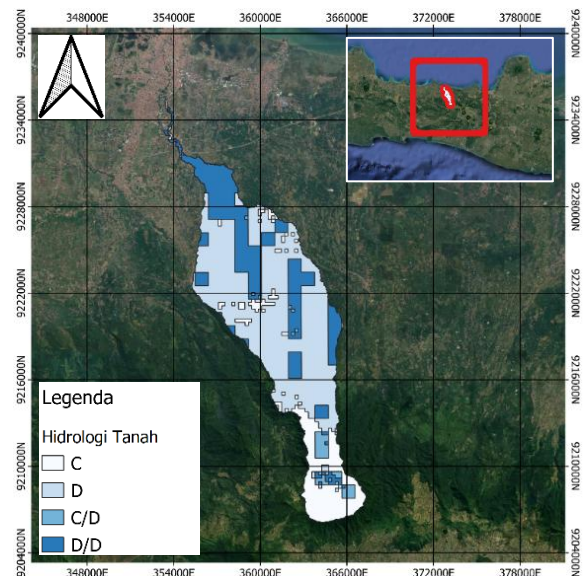


Gambar 6 Jenis Tanah DAS Kupang

Tabel 4 Klasifikasi Jenis Tanah DAS Kupang

Jenis Tanah	Luas (ha)	Persentase
Je (<i>Eutric Fluvisols</i>)	63	0%
Lv (<i>Vertic Luvisols</i>)	5761	46%
Ne (<i>Eutric Nitosols</i>)	5398	43%
To (<i>Ochric Andosols</i>)	1391	11%

Seperti pada Gambar 7 dan Tabel 5, didapatkan bahwa *Hydrology Soil Group* (HSG) pada DAS Kupang terdiri dari 4 jenis HSG, yaitu C, D, C/D, dan D/D. HSG C memiliki potensi limpasan sedang hingga tinggi dengan karakteristik tanah yang umumnya mengandung 20–40% lempung dan kurang dari 50% pasir. HSG D menunjukkan potensi limpasan tinggi dengan kandungan lempung lebih dari 40% dan pasir kurang dari 50%. HSG C/D memiliki potensi limpasan tinggi kecuali jika terdapat sistem drainase yang baik, dengan kandungan pasir kurang dari 50% dan lempung 20–40%. HSG D/D juga memiliki potensi limpasan tinggi kecuali jika dikeringkan, dengan karakteristik tanah yang memiliki lebih dari 40% lempung dan kurang dari 50% pasir.



Gambar 7 Hidrologi Tanah DAS Kupang

Tabel 5 Klasifikasi Hidrologi Tanah DAS Kupang

DN	HSG	Luas (ha)	Persentase
3	C	1936	15,35%
4	D	7075	56,09%
13	C/D	355	2,82%
14	D/D	3246	25,74%

Analisis Hidrologi

a. Pengisian Data Hujan Kosong

Berdasarkan hasil rekapitulasi dan pemeriksaan awal terhadap data curah hujan harian maksimum tahunan dari beberapa stasiun hujan di wilayah kajian, ditemukan bahwa kelengkapan data pada sebagian stasiun belum memenuhi kriteria yang dipersyaratkan. Mengacu pada SNI 2415:2016 tentang Tata Cara Perhitungan Debit Banjir, data curah hujan yang

digunakan untuk analisis hidrologi dan perhitungan debit banjir harus memiliki rentang waktu pengamatan minimal 20 tahun yang kontinu. Ketidaklengkapan data tersebut berpotensi memengaruhi akurasi analisis frekuensi hujan dan penentuan hujan rencana.

Tabel 6 menyajikan data curah hujan harian maksimum tahunan sebelum dilakukan pengisian data kosong, di mana masih terdapat beberapa nilai yang hilang pada stasiun tertentu dan tahun tertentu. Kekosongan data tersebut kemudian diisi menggunakan metode *Inverse Square Distance* sehingga diperoleh data curah hujan yang lengkap sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7. Setelah dilakukan pengisian data kosong, seluruh stasiun hujan memiliki deret data yang memenuhi persyaratan jumlah tahun pengamatan sehingga data tersebut dapat digunakan secara lebih andal dalam analisis hidrologi selanjutnya.

Tabel 6 Data Curah Hujan Sebelum Dikoreksi

Tahun	Curah Hujan Harian Maksimum Tahunan (mm)						
	Tapak Menjangan	Pekalongan	Pesantren Kletak	Batang	Kutosari Doro	Bandar Blado	
2001	112,5	125	122	67	105	103	123
2002	227	175	166	102	209	237	164
2003	138	150	154	124	96	76	131
2004	114	159	153	123	113		135
2005	110	91	81	91	82	97,7	120
2006	184	240	127	94	199	132	277
2007	233	209	133	125	222	151	125
2008	112	187	95	110	145	135	115
2009	128	138	87	150	114	137	165
2010	110	161	75	124		140	133
2011	177			179	114	138	212
2012	160			79		129	183
2013	155		95	82	106	115	107
2014	287	239	216	95	285	180	151
2015	242	135	119	72	200	100	108
2016	114	112	106	115	125	100	90
2017	125	130	89	38	102	100	115
2018	114	162	130	80	121	80	106
2019	160	130	168	125	114	152	75
2020	218	242	146	125	155	158	171

Tabel 7 Data Curah Hujan Setelah Dikoreksi

Tahun	Curah Hujan Harian Maksimum Tahunan Terkoreksi (mm)						
	Tapak Menjangan	Pekalongan	Pesantren Kletak	Batang	Kutosari Doro	Bandar Blado	
2001	112,5	125	122	67	105	103	123
2002	227	175	166	102	209	237	164
2003	138	150	154	124	96	76	131
2004	114	159	153	123	113	165	135
2005	110	91	81	91	82	97,7	120
2006	184	240	127	94	199	132	277
2007	233	209	133	125	222	151	125
2008	112	187	95	110	145	135	115
2009	128	138	87	150	114	137	165
2010	110	161	75	124	128	140	133
2011	177	138,5	102	179	114	138	212
2012	160	67,8	115,3	79	155,3	129	183
2013	155	77,7	95	82	106	115	107
2014	287	239	216	95	285	180	151
2015	242	135	119	72	200	100	108
2016	114	112	106	115	125	100	90
2017	125	130	89	38	102	100	115
2018	114	162	130	80	121	80	106
2019	160	130	168	125	114	152	75
2020	218	242	146	125	155	158	171

b. Pengujian Data Hujan

Data hidrologi harus memenuhi standar tertentu yang dapat menentukan apakah data tersebut dapat dipertimbangkan untuk digunakan dalam perhitungan lebih lanjut. Evaluasi diperlukan untuk menentukan apakah data tersebut dapat digunakan atau memerlukan perbaikan sebelum digunakan. Data pos curah hujan perlu diuji kelayakannya sebelum digunakan dalam pengolahan selanjutnya meliputi uji outlier, uji tren, uji stabilitas, uji independensi, dan analisis kurva massa ganda (Bagiawan dkk., 2011). Tabel 8 merupakan hasil pengujian data curah hujan.

Tabel 8 Hasil Pengujian Data Curah Hujan

Uji	Pos Curah Hujan						
	Tapak Menjangan	Pekalongan	Pesantren Kletak	Batang	Kutosari Doro	Bandar	Blado
Uji Outlier (US Water Resources / Grubbs & Beck)	Tidak Ada Outlier	Tidak Ada Outlier	Tidak Ada Outlier	Ada Outlier Bawah	Tidak Ada Outlier	Tidak Ada Outlier	Ada Outlier Atas
Uji Trend (Sperman Korelasi Trend & Peringkat)	Tidak Terdapat Korelasi	Tidak Terdapat Korelasi	Tidak Terdapat Korelasi	Tidak Terdapat Korelasi	Tidak Terdapat Korelasi	Tidak Terdapat Korelasi	Tidak Terdapat Korelasi
Uji Stabilitas (Mean dan Variance)	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil
Uji Independensi	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi
Kurva Massa Ganda	Gradien Stabil	Gradien Stabil	Gradien Stabil	Gradien Stabil	Gradien Stabil	Gradien Stabil	Gradien Stabil

Pengujian data hujan yang telah dilakukan menghasilkan nilai curah hujan lolos uji sebagaimana disajikan dalam Tabel 9. Stasiun Batang memiliki *outlier* bawah yang menyebabkan data tersebut tidak digunakan dalam analisis selanjutnya. Stasiun Blado memiliki *outlier* atas sehingga data tertinggi kedua pada stasiun tersebut dipilih untuk digunakan guna menjaga keandalan model.

Tabel 9 Data Curah Hujan Lolos Uji

Tahun	Curah Hujan Harian Maksimum Tahunan (mm)						
	Tapak Menjangan	Pekalongan	Pesantren Kletak	Batang	Kutosari Doro	Bandar	Blado
2001	112,5	125	122	67	105	103	123
2002	227	175	166	102	209	237	164
2003	138	150	154	124	96	76	131
2004	114	159	153	123	113	165	135
2005	110	91	81	91	82	97,7	120
2006	184	240	127	94	199	132	141
2007	233	209	133	125	222	151	125
2008	112	187	95	110	145	135	115
2009	128	138	87	150	114	137	165
2010	110	161	75	124	128	140	133
2011	177	138,5	102	179	114	138	212
2012	160	67,8	115,3	79	155,3	129	183
2013	155	77,7	95	82	106	115	107
2014	287	239	216	95	285	180	151
2015	242	135	119	72	200	100	108
2016	114	112	106	115	125	100	90
2017	125	130	89		102	100	115
2018	114	162	130	80	121	80	106
2019	160	130	168	125	114	152	75
2020	218	242	146	125	155	158	171

c. Analisis Frekuensi

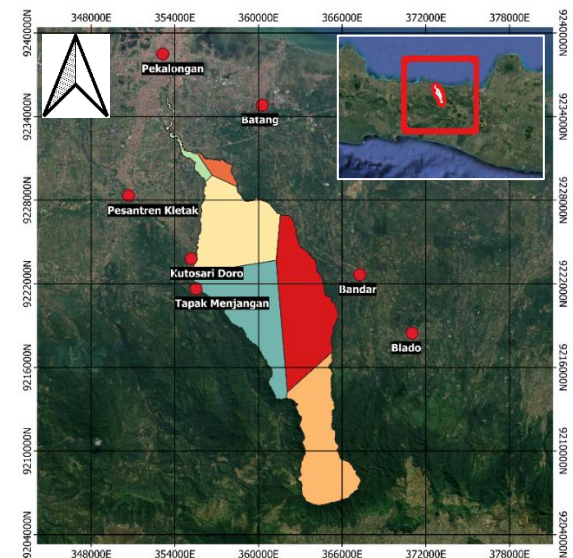
Hasil pengujian data curah hujan tersebut selanjutnya dilakukan analisis frekuensi pada setiap stasiun. Metode yang digunakan sebagai pendekatan distribusi curah hujan rencana adalah metode normal, log normal, gumbel, dan log pearson III, dan *Generalized Extreme Value* (GEV). Analisis frekuensi dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Hydrognomon 4. Metode yang digunakan sebagai penentuan distribusi analisis frekuensi adalah uji *Chi-Square* dan uji Kolmogorov-Smirnov (Upom dkk., 2016). Tabel 10 merupakan hasil rekapitulasi dari analisis frekuensi berupa curah hujan rencana untuk periode ulang 20 tahun.

Tabel 10 Curah Hujan Rencana

Curah Hujan Rencana Periode Ulang 20 Tahun		
Curah Hujan Rencana (mm)	Tapak Menjangan	261,3
	Pekalongan	248,1
	Pesantren Kletak	189,1
	Batang	159,6
	Kutosari Doro	248,7
	Bandar	200,4
	Blado	196,6

d. Curah Hujan Wilayah

Metode *Polygon* Thiessen seperti pada Gambar 8 digunakan untuk menentukan curah hujan wilayah (Handayani & Ningsih, 2012) dengan adanya faktor *Area Reduction Factor* (ARF) sebesar 0,89 sehingga diperoleh luasan pengaruh dan hujan rencana wilayah pada Tabel 11.



Gambar 8 Polygon Thiessen DAS Kupang

Tabel 11 Curah Hujan Wilayah DAS Kupang

Pos Curah Hujan	Hujan Rencana (mm)	Luas Pengaruh (ha)	Persentase
Tapak Menjangan	261,3	2935	23,3%
Kutosari Doro	248,1	3029	24,0%
Bandar	189,1	3297	26,1%
Pesantren Kletak	159,6	212	1,7%
Batang	248,7	268	2,1%
Blado	200,4	2831	22,4%
Pekalongan	196,6	41	0,3%
Hujan Rencana Wilayah = 200 mm			

e. Distribusi Hujan Jam-Jaman

Penentuan distribusi hujan jam-jaman dalam studi ini mengacu pada pola distribusi PSA-007 sebagaimana diterapkan dalam penelitian Kent dkk. (2022). Metode ini digunakan untuk mendistribusikan total hujan rencana periode ulang 20 tahun sebesar 200 mm ke dalam durasi 6 jam, di mana puncak hujan terjadi pada jam ke-3 dengan persentase sebesar 60% (120 mm) dari total volume hujan (Kent dkk., 2022). Penggunaan rujukan ini memastikan bahwa simulasi hidrologi DAS Kupang memiliki landasan teoretis yang tervalidasi untuk wilayah dengan karakteristik hujan serupa. Hasil distribusi hujan jam-jaman periode ulang 20 tahun dengan durasi 6 jam yang disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12 Distribusi Hujan Jam-Jaman DAS Kupang

Jam	Distribusi PSA 007	Hujan = 200 mm
		Tr = 20
0	0	0
1	0,05	10
2	0,1	20
3	0,6	120
4	0,16	32
5	0,06	12
6	0,03	6

f. Curah Hujan Efektif

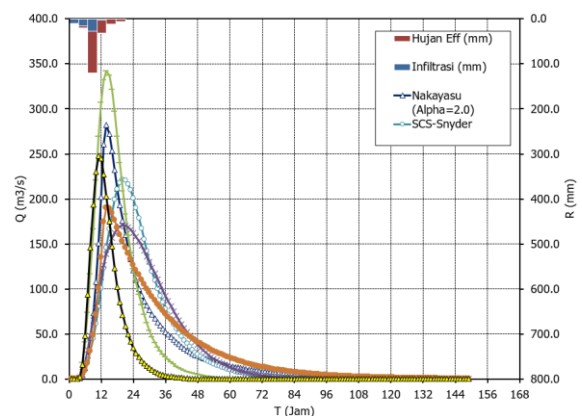
Perhitungan curah hujan efektif mempertimbangkan proses infiltrasi menggunakan metode *SCS CN Losses Method*, dengan nilai dari *Curve Number* yang merepresentasikan tutupan lahan dan kondisi hidrologi tanah pada DAS Kupang (Delani & Dasanto, 2015). Berdasarkan hasil analisis diperoleh nilai CN komposit sebesar 80,89. Tabel 13 merupakan hasil perhitungan hujan efektif DAS Kupang.

Tabel 13 Distribusi Hujan Efektif DAS Kupang

t (jam)	P (mm)	Pkum (mm)	Ia (mm)	Fa (mm)	Reff Kum (mm)	Reff (mm)	Infiltrasi (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	5,9	5,9	5,9	0	0	0	5,9
2	11,9	17,9	12	5,4	0,5	0,5	11,4
3	71,7	89,6	12	33,8	43,8	43,3	28,4
4	19,1	108,8	12	37	59,7	15,9	3,2
5	7,2	115,9	12	38	65,9	6,2	1
6	3,6	119,5	12	38,5	69	3,1	0,5

g. Debit Banjir Rencana

Perhitungan debit banjir dilakukan dengan Metoda Hidrograf Satuan Sintetis. Beberapa metode Hidrograf Satuan Sintesis (HSS) yang digunakan dalam analisis debit banjir rencana pada DAS Kupang diantaranya adalah Nakayasu, SCS-CN, SCS Snyder, ITB-1b, dan ITB-2b (Natakusumah dkk., 2011). Kota Pekalongan termasuk kategori Ibukota Kabupaten / Kota sehingga berdasarkan Permen PUPR No.5 tahun 2022, debit banjir rencana yang digunakan adalah debit banjir rencana Q20. Hasil dari perhitungan debit banjir rencana Q20 adalah seperti pada Gambar 9 dan Tabel 14.



Gambar 9 HSS DAS Kupang Q20

Tabel 14 Rekapitulasi HSS DAS Kupang

Nakayasu	SCS-CN	SCS-Snyder	ITB-1b	ITB-2b
281,9 m ³ /s	341,7 m ³ /s	221,5 m ³ /s	170,5 m ³ /s	190 m ³ /s

Pemilihan metode HSS dilakukan melalui kalibrasi terhadap data debit Pos Duga Air di outlet DAS Kupang. Berdasarkan data debit banjir berdasarkan AWLR tersebut, debit Q20 adalah sebesar 301 m³/s sehingga nilai debit rencana yang dipilih adalah HSS metode Nakayasu.

Analisis Pasang Surut

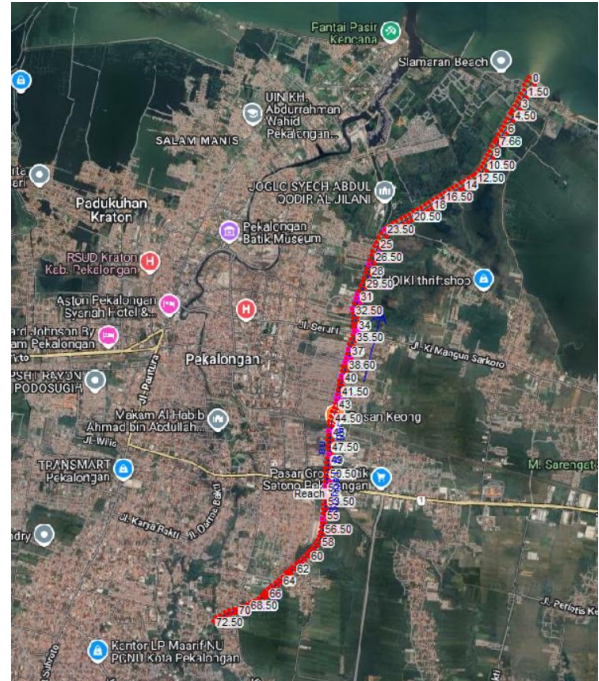
Peramalan pasang surut dilakukan dengan menggunakan metode *Least Square*. Tabel 15 merupakan analisis simulasi pasang surut dengan beberapa hasil dari elevasi penting pasang surut.

Tabel 15 Nilai Elevasi Penting Pasang Surut

Elevasi Muka Air	Least Square	
	Ref. Peil (m)	Ref. LLWL (m)
HHWL	0,58	1,17
MHWS	0,36	0,95
MHWL	0,15	0,74
MSL	0,00	0,59
MLWL	-0,15	0,44
MLWS	-0,32	0,27
LLWL	-0,59	0,00

Analisis Hidraulika

Analisis hidraulika dilakukan menggunakan pemodelan 1D dengan menggunakan perangkat lunak HEC-RAS untuk menghitung tinggi muka air dengan debit rencana untuk berbagai penampang sungai, pemodelan hidraulika 1D menggunakan HEC-RAS dalam penelitian ini didasarkan pada kerangka kerja yang dibuktikan oleh Vozinaki dkk. (2017), yang menunjukkan bahwa simulasi 1D tetap memberikan hasil yang akurat pada area dengan data topografi beresolusi tinggi dibandingkan dengan model 2D yang lebih kompleks (Vozinaki dkk., 2017). Nilai kekasaran manning berdasarkan Ven Te Chow dan SNI-2830:2008 tentang Tata Cara Perhitungan Tinggi Muka Air Sungai dengan Cara Pias berdasarkan rumus Manning (Chow, 1973). Tabel 16 merupakan nilai kekasaran Manning dari tiap ruas sungai yang divisualisasikan pada Gambar 10.

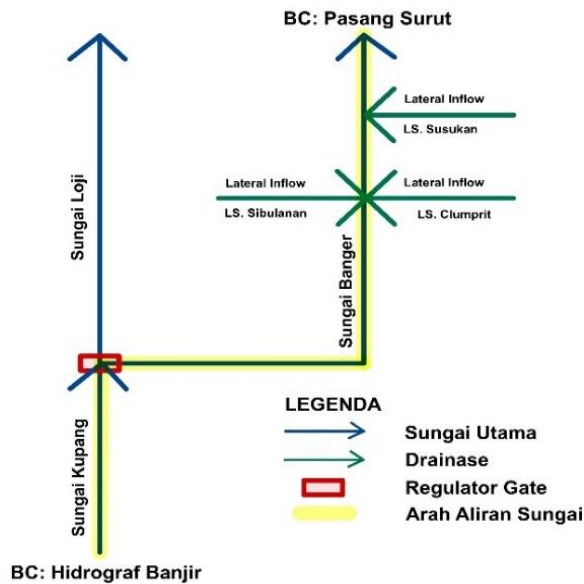


Gambar 10 Ruas Sungai Banger

Tabel 16 Nilai Koefisien Manning Sungai Banger

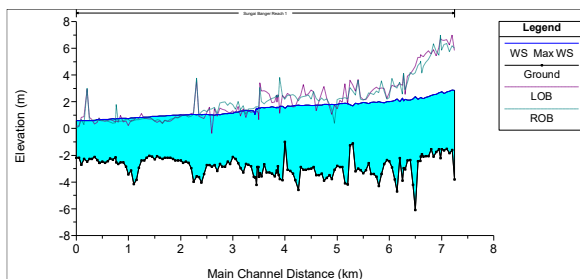
Ruas	Kondisi	Koefisien Manning (n)
72,50 - 53	Sungai kecil (lebar muka air banjir < 30 m); Sakuran alam; Saluran di belukar	0,05
52,50 – 45,50	Sungai besar (lebar muka air banjir > 30 m); Bagian yang tidak teratur dan kasar	0,025
45 – 5,50	Sungai besar (lebar muka air banjir > 30 m); Bagian yang teratur tanpa batu-batu besar	0,035
5,50 - 0	Sungai besar (lebar muka air banjir > 30 m); Bagian yang tidak teratur dan kasar	0,025

Skema pemodelan banjir ditunjukkan pada Gambar 11, *boundary condition* hulu dimodelkan sebagai *flow hydrograph* berupa hidrograf banjir Q20, sedangkan *boundary condition* hilir dimodelkan sebagai *stage hydrograph* menggunakan elevasi pasang tertinggi (HHWL) di muara Sungai Banger untuk merepresentasikan kondisi *backwater* terburuk akibat pasang surut. Pada ruas-ruas tertentu dilakukan input *boundary condition* dengan tipe *lateral inflow* sesuai titik *outlet* setiap drainase *long storage* (Susukan, Sibulanan, Clumprit).



Gambar 11 Skema Pemodelan Simulasi Banjir

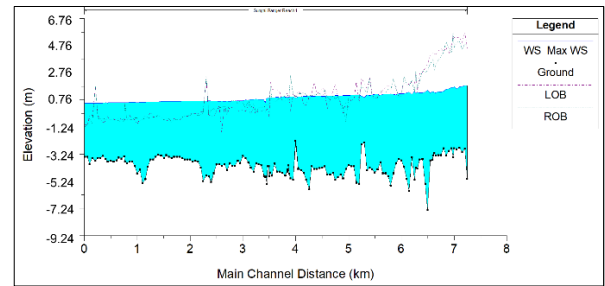
Simulasi kondisi eksisting diperlukan untuk mengetahui kapasitas sungai dan genangan yang terjadi, Gambar 12 merupakan hasil simulasi kondisi eksisting dalam bentuk profil memanjang.



Gambar 12 Long Section Skenario Banjir Eksisting

Berdasarkan hasil pemodelan 1D, 59 *Left Over Bank* (LOB) (36,88%) dan 43 *Right Over Bank* (ROB) (26,88%) mengalami genangan sekitar 0,27 m. Oleh karena itu, diperlukan suatu alternatif solusi pengendalian banjir untuk mereduksi banjir yang terjadi di sekitar lokasi Sungai Banger.

Jika kondisi eksisting tersebut tidak dilakukan penanganan, maka pada 10 tahun yang akan datang dengan adanya penurunan permukaan tanah yang diasumsikan terjadi secara linear sebesar 12 cm per tahun dan kenaikan permukaan laut diasumsikan sebesar 4,3 mm per tahun terjadi kenaikan tinggi genangan rata-rata menjadi 0,85 m pada 97 LOB (60,63%) dan 98 ROB (61,25%) seperti pada Gambar 13 yang menunjukkan bahwa kenaikan *boundary* hilir dapat meningkatkan genangan hingga 214% dibanding kondisi eksisting.



Gambar 13 Long Section Skenario Banjir Eksisting Jangka Panjang

Pada perencanaan pengendalian banjir Sungai Banger, terdapat beberapa alternatif dan solusi yang dapat dilakukan untuk menambah kapasitas sungai seperti melakukan normalisasi sungai atau membuat tanggul. Pemilihan alternatif solusi berupa normalisasi sungai dan pembangunan parapet (tanggul dinding) didasarkan pada analisis kapasitas sungai yang sudah tidak mencukupi untuk menampung debit rencana Q20 akibat dampak gabungan *land subsidence* dan *sea level rise*. Strategi ini sejalan dengan temuan Rahadiyitno & Dewi (2025) yang menunjukkan bahwa pada sungai dengan keterbatasan lahan bantaran, normalisasi dan penambahan tanggul merupakan pilihan teknis yang paling efektif untuk mereduksi luas genangan secara signifikan tanpa memerlukan pembebasan lahan yang luas (Rahadiyitno & Dewi, 2025). Pengendalian banjir dapat menggabungkan beberapa alternatif solusi jika satu solusi belum efektif dalam mereduksi banjir. Perencanaan pengendalian banjir Sungai Banger dibuat dalam beberapa kombinasi alternatif pengendalian banjir yang disajikan pada Tabel 17.

Tabel 17 Skenario Alternatif Solusi Pengendalian Banjir Sungai Banger

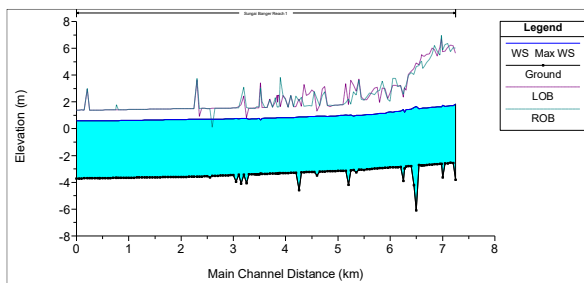
Skenario Alternatif Solusi
Normalisasi + Tanggul Tanah
Normalisasi + Tanggul Tanah + Parapet
Parapet

Alternatif solusi dipertimbangkan melalui dua skenario, yaitu skenario jangka pendek dan jangka panjang. Skenario jangka pendek merupakan kondisi eksisting tanpa mempertimbangkan faktor penurunan permukaan tanah dan kenaikan permukaan laut. Sementara itu, skenario jangka panjang menggambarkan prediksi yang akan terjadi dalam 10 tahun mendatang dengan faktor penurunan permukaan tanah dan kenaikan permukaan laut.

a. Normalisasi + Tanggul Tanah

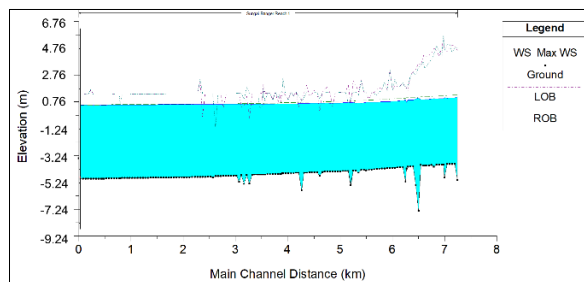
Normalisasi Sungai Banger dilakukan melalui kegiatan pengerukan dan pelebaran dimensi sungai untuk meningkatkan kapasitas aliran. Penampang sungai yang semula tidak beraturan direncanakan menjadi berbentuk trapesium. Kemiringan lereng dibuat dengan kemiringan 1:1 dan *slope* sungai sebesar 0,01. Selain itu, dilakukan penimbunan tanah untuk pembuatan tanggul tanah dengan elevasi nya didasarkan pada tinggi muka air maksimum ditambah tinggi jagaan sesuai debit rencana.

Berdasarkan hasil pemodelan skenario jangka pendek (Gambar 14), dapat disimpulkan bahwa setelah dilakukan perencanaan normalisasi dan pembangunan tanggul tanah, genangan banjir yang terjadi mengalami penurunan yang signifikan dibandingkan dengan kondisi eksisting, namun masih terdapat genangan pada penampang melintang (*cross section*) nomor 26 sisi kanan setinggi 0,62 m dan pada beberapa *cross section* masih rawan terjadi genangan.



Gambar 14 Long Section Hasil Pemodelan Normalisasi + Tanggul Tanah Jangka Pendek

Berdasarkan hasil pemodelan skenario jangka panjang (Gambar 15), 9 LOB (5,63%) dan 9 ROB (5,63%) masih terjadi genangan dengan rata-rata tinggi genangan sebesar 0,46 m.



Gambar 15 Long Section Hasil Pemodelan Normalisasi + Tanggul Tanah Jangka Panjang

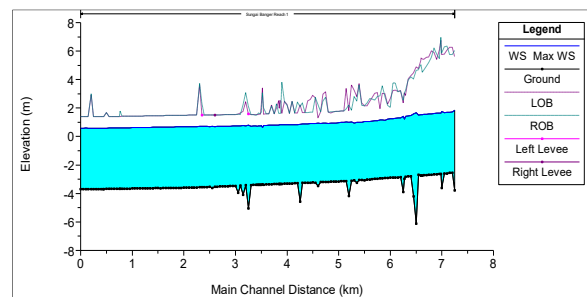
Normalisasi dengan *slope* 0,01 dikombinasikan dengan tanggul tanah

menunjukkan efektivitas dalam skenario jangka pendek, tetapi dalam jangka panjang (dengan kenaikan muka air laut dan penurunan tanah), masih terjadi genangan rata-rata 0,46 m di beberapa *cross-section*. Hal tersebut menunjukkan bahwa jika *boundary* hilir memiliki muka air yang tinggi, normalisasi saja tidak cukup sehingga perlu tambahan parapet.

b. Normalisasi + Tanggul Tanah + Parapet

Berdasarkan analisis *cross section* setelah dinormalisasi dan penimbunan tanggul tanah diketahui bahwa genangan masih terjadi pada beberapa *cross section*. Oleh karena itu, salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah dengan penambahan dinding parapet.

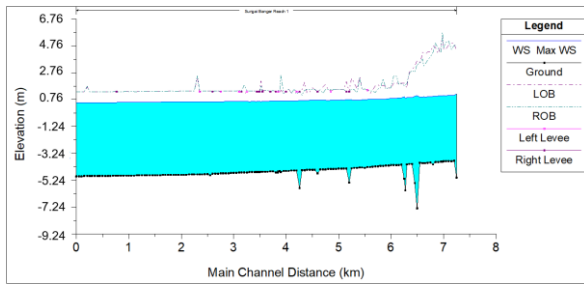
Berdasarkan Gambar 16, perencanaan penambahan parapet pada CS yang terjadi genangan dan rawan melimpas didasarkan pada elevasi muka air banjir ditambah dengan tinggi jagaan sesuai debit rencana sehingga tanggul dipastikan mampu mengendalikan banjir pada skenario jangka pendek.



Gambar 16 Long Section Hasil Pemodelan Normalisasi + Tanggul Tanah + Parapet Jangka Pendek

Dengan adanya penurunan tanah dan kenaikan muka air, dalam 10 tahun terjadi kenaikan total sekitar 1,24 meter. Jika tanggul tidak ditinggikan, maka berpotensi terlampaui dalam kurun 8-12 tahun, tergantung pada tinggi tanggul awal dan desain tinggi jagaan yang digunakan.

Normalisasi dan pembangunan tanggul tanah yang telah dilakukan sebelumnya kemudian dikombinasikan dengan penambahan parapet pada beberapa titik. Perencanaan penambahan dan peninggian tanggul tanah serta parapet didasarkan pada elevasi muka air banjir ditambah tinggi jagaan sesuai debit rencana sehingga berdasarkan pemodelan (Gambar 17) mampu mengendalikan permasalahan banjir jangka panjang.



Gambar 17 Long Section Hasil Pemodelan Normalisasi + Tanggul Tanah + Parapet Jangka Panjang

c. Parapet

Berdasarkan hasil pemodelan kondisi eksisting diketahui bahwa genangan masih terjadi pada beberapa *cross section*. Oleh karena itu, langkah perbaikan lanjutan dilakukan dengan membangun pengendali banjir berupa dinding parapet, mengingat biaya pembangunannya relatif lebih terjangkau jika dibandingkan dengan tanggul *sheet pile*.

Berdasarkan hasil Gambar 18, perencanaan penambahan parapet pada beberapa *cross section* didasarkan pada elevasi muka air banjir ditambah tinggi jagaan sesuai debit rencana sehingga parapet dipastikan mampu mengendalikan permasalahan banjir jangka pendek.

Berdasarkan hasil Gambar 19, perencanaan penambahan dan peninggian parapet pada beberapa *cross section* didasarkan pada elevasi muka air banjir ditambah tinggi jagaan sesuai debit rencana, sehingga parapet dipastikan mampu mengendalikan permasalahan banjir jangka panjang.

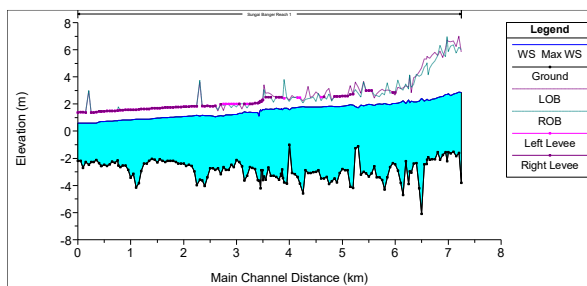
Validasi Model dan Pembahasan Lanjutan

Proses verifikasi dan validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi hidraulika

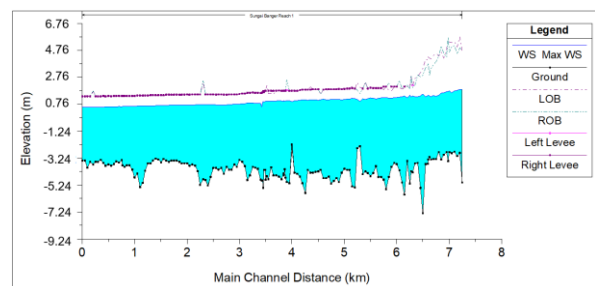
dengan kejadian banjir aktual yang tercatat di lapangan (Teshome dkk., 2020). Validasi model hidraulika dilakukan dengan membandingkan tinggi muka air hasil simulasi dengan data tinggi genangan banjir aktual di beberapa titik pengamatan lapangan dan penampang melintang sungai yang mewakili kondisi kritis.

Perbandingan antara tinggi muka air rata-rata hasil model dan tinggi genangan banjir aktual di lapangan menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup baik. Tinggi muka air hasil model berada pada kisaran 0,27–0,85 m, sedangkan tinggi genangan aktual di lapangan berkisar antara 0,3–0,9 m (BPBD Jawa Tengah., 2022). Selisih rata-rata antara hasil model dan observasi lapangan memiliki deviasi relatif sekitar 6,7%. Nilai ini menunjukkan bahwa model masih mampu merepresentasikan kondisi banjir Sungai Banger secara memadai, dengan perbedaan yang dipengaruhi oleh variasi kondisi lapangan, topografi lokal, serta dinamika aliran akibat pasang laut dan penurunan muka tanah.

Berdasarkan hasil pemodelan hidraulik dan evaluasi kinerja beberapa skenario pengendalian banjir, dilakukan perbandingan efektivitas alternatif solusi struktural yang diusulkan untuk Sungai Banger. Perbandingan ini mencakup aspek efektivitas jangka pendek pada kondisi eksisting serta efektivitas jangka panjang dengan mempertimbangkan proyeksi penurunan muka tanah (land subsidence) dan kenaikan muka air laut (sea level rise). Selain itu, analisis juga mempertimbangkan keterbatasan ruang di kawasan perkotaan serta aspek teknis dan inovasi dari masing-masing skenario. Ringkasan hasil perbandingan alternatif solusi pengendalian banjir Sungai Banger disajikan pada Tabel 18.



Gambar 18 Long Section Hasil Pemodelan Parapet Jangka Pendek



Gambar 19 Long Section Hasil Pemodelan Parapet Jangka Panjang

Tabel 18 Perbandingan Skenario Pengendalian Banjir Sungai Banger

Skenario Solusi	Efektivitas Jangka Pendek	Efektivitas Jangka Panjang	Catatan Teknis & Inovasi
Normalisasi + Tanggul Tanah	Menurunkan banjir secara signifikan, namun masih terdapat sisa genangan setinggi 0,62 m pada <i>cross section</i> 26.	Kurang memadai; sebesar 5,63% area masih tergenang dengan kedalaman rata-rata 0,46 m.	Normalisasi saja tidak cukup menahan pasang laut di hilir jika muka air laut tinggi.
Kombinasi (Normalisasi + Tanggul + Parapet)	Sangat Efektif; seluruh masalah banjir teratasi sesuai elevasi rencana.	Sangat Efektif; mampu menahan total kenaikan air 1,24 m akibat penurunan tanah dan kenaikan laut.	Inovasi terbaik; meningkatkan kapasitas sungai maksimal tanpa perlu pembebasan lahan luas.
Parapet	Efektif; mencegah luapan pada titik-titik rawan banjir rencana.	Efektif; peninggian bertahap mengimbangi penurunan tanah 12 cm/tahun.	Solusi pilihan karena biaya lebih terjangkau dibandingkan penggunaan tanggul <i>sheet pile</i> .

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pembangunan *floodway* mampu mengurangi tingkat air hingga 28%. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan dengan mempertimbangkan dampak jangka panjang dari *land subsidence* dan *sea level rise* yang sebelumnya belum dibahas secara komprehensif (Nugroho dkk., 2023).

Studi mengenai banjir majemuk (*compound flooding*) di Jakarta menggunakan HEC-RAS 1D-2D, menunjukkan kombinasi pasang laut dan *subsidence* dapat melampaui pertahanan saat ini pada tahun 2100 (Bennett dkk., 2023). Temuan ini sejalan dengan peningkatan genangan di Pekalongan dalam skenario jangka panjang. Selain itu, integrasi antara HEC-RAS dan GIS untuk memprediksi risiko banjir masa depan di wilayah pesisir urban mengadopsi metodologi yang dikembangkan oleh Boddepalli dkk. (2024), yang menekankan pentingnya model spasial dalam mengevaluasi efektivitas solusi struktural pada skenario jangka panjang (Boddepalli dkk., 2024). Hal ini menguatkan pentingnya penggunaan model spasial untuk evaluasi efektivitas solusi struktural di Pekalongan.

Jika dibandingkan dengan referensi terkini, hasil ini mengonfirmasi bahwa faktor-faktor seperti *sea level rise* dan *land subsidence* memiliki kontribusi signifikan terhadap risiko banjir (Lutfitiana dkk., 2022). Penelitian ini memperkuat temuan tersebut dengan memberikan solusi teknis yang dapat diterapkan di Sungai Banger.

Berdasarkan hasil pemodelan skenario jangka panjang, terlihat bahwa meskipun solusi struktural seperti pembangunan parapet dan normalisasi efektif mereduksi banjir saat ini, tantangan penurunan muka tanah dan kenaikan muka air laut bersifat dinamis dan berkelanjutan. Jika hanya mengandalkan tinggi jagaan dinding parapet tanpa mengontrol laju penurunan tanah, efektivitas infrastruktur fisik tersebut diprediksi akan terlampaui dalam beberapa tahun berikutnya. Oleh karena itu, analisis kapasitas sungai ini mengindikasikan bahwa intervensi teknis harus dibarengi dengan kebijakan penataan ruang berbasis risiko untuk membatasi pengambilan air tanah yang menjadi pemicu utama subsidensi (Tahir dkk., 2023).

Selain itu, adanya ketidakpastian dalam data hidrologi dan fenomena *compound flooding* di wilayah pesisir menuntut adanya sistem pemantauan yang bersifat *real-time*. Implementasi *Early Warning System* (EWS) yang mengintegrasikan data sensor ketinggian air berbasis *IoT* dan prediksi cuaca dari BMKG menjadi krusial untuk memberikan waktu respons bagi masyarakat sebelum puncak banjir terjadi (BMKG, 2025). Keberhasilan teknis di lapangan juga sangat bergantung pada modal sosial dan partisipasi masyarakat; tanpa adanya literasi risiko dan kesadaran lingkungan seperti menjaga kebersihan drainase dari limbah dan sampah, beban kapasitas saluran yang telah dinormalisasi akan kembali meningkat akibat sedimentasi antropogenik (Fernandes, 2025). Dengan demikian, data teknis dari simulasi HEC-RAS ini harus dipandang sebagai fondasi bagi strategi manajemen banjir yang lebih luas dan adaptif.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengonfirmasi hipotesis bahwa fenomena penurunan muka tanah (*land subsidence*) sebesar 12 cm/tahun dan kenaikan muka air laut sebesar 4,3 mm/tahun merupakan faktor dominan yang meningkatkan risiko banjir secara signifikan di Sungai Banger. Melalui pemodelan hidraulika HEC-RAS, terlihat bahwa tanpa intervensi teknis, rata-rata tinggi genangan di wilayah pesisir Pekalongan diprediksi akan meningkat drastis dari 0,27 meter pada kondisi saat ini menjadi 0,85 meter dalam sepuluh tahun ke depan. Hasil analisis

menunjukkan bahwa target utama penelitian untuk menemukan solusi teknis paling efisien berhasil dicapai dengan mengidentifikasi bahwa penggunaan parapet atau kombinasi antara normalisasi sungai, pembangunan tanggul tanah, dan dinding parapet merupakan strategi yang paling efektif. Inovasi kombinasi ini terbukti mampu meningkatkan kapasitas tampung sungai tanpa memerlukan pembebasan lahan yang luas, yang menjadi kendala utama di wilayah urban padat.

Temuan ini menunjukkan pola serupa dengan fenomena banjir di kota pesisir lainnya, seperti Jakarta dan Chennai (India), di mana integrasi pemodelan hidraulika 1D/2D dan penggunaan data topografi beresolusi tinggi menjadi kunci dalam mengevaluasi efektivitas solusi struktural jangka panjang. Berdasarkan bukti teknis bahwa normalisasi saja tidak cukup untuk menahan laju penurunan tanah linear, maka kesimpulan penelitian ini mengarah pada perlunya pendekatan multi-sektoral. Strategi struktural berupa pembangunan parapet harus diintegrasikan dengan kebijakan non-struktural, seperti penguatan tata ruang berbasis risiko dan pembatasan pengambilan air tanah untuk memperlambat laju subsidensi. Dengan demikian, penelitian ini memberikan landasan data dan proyeksi jangka panjang bagi pemangku kebijakan untuk merumuskan strategi pengendalian banjir yang berkelanjutan dan adaptif terhadap dinamika perubahan iklim serta geomorfologi pesisir.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik berkat dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana, Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, Pemerintah Kota Pekalongan, BAPPERIDA Kota Pekalongan, Laboratorium Teknik Sumber Daya Air, serta Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung.

DAFTAR PUSTAKA

- Andari, L., Sugianto, D. N., Wirasatriya, A., & Ginanjar, S. (2023). Identification of sea level rise and land subsidence based on Sentinel-1 data in the coastal city of Pekalongan, Central Java, Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, 26(2), 329–339. <https://doi.org/10.14710/jkt.v26i2.18324>
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2025). Peran sistem peringatan dini (early warning system/EWS) BMKG dalam pengurangan risiko bencana di Sulawesi Tengah. <https://gaw-bariri.bmkg.go.id>
- Badan Penanggulangan Bencana Daerah Provinsi Jawa Tengah. (2022). *Banjir rob di Kota Pekalongan*. <https://bpbpd.jatengprov.go.id/main/banjir-rob-di-kota-pekalongan-4/>
- Bagiawan, A., Yuningsih, S. M., & Windatiningsih, D. (2011). Pengujian data hidrologi dalam rangka peningkatan efektivitas dan efisiensi pengelolaan sumber daya air. *Jurnal Sumber Daya Air*, 7(1).
- Bennett, W. G., Karunarathna, H., Xuan, Y., Kusuma, M. S. B., Farid, M., Kuntoro, A. A., Rahayu, H. P., Kombaitan, B., Septiadi, D., Kesuma, T. N. A., Haigh, R., & Amaratunga, D. (2023). Modelling compound flooding: A case study from Jakarta, Indonesia. *Natural Hazards*, 118(1), 277–305. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06001-1>
- Boddepalli, M., Pasupuleti, L. N., & Nalli, B. R. (2024). A comprehensive study of floodplain analysis utilising HEC-HMS, HEC-RAS, and GIS on the Kosasthalaiyar River sub-basin. *Water Practice and Technology*, 19(11), 4612–4628. <https://doi.org/10.2166/WPT.2024.269>
- Chow, V. T. (1973). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
- Delani, O. M., & Dasanto, B. D. (2015). Perbandingan hidrograf banjir menggunakan beberapa metode perhitungan curah hujan efektif (studi kasus: DAS Cisadane Hulu). *Jurnal Sumber Daya Air*, 12(2), 187–198. <https://doi.org/10.32679/JSDA.V12I2.65>
- Driyogo, Y. W., Satriadi, A., & Hariadi, H. (2013). Influx sedimen dan laju sedimentasi di perairan muara Sungai Banger, Pekalongan, Jawa Tengah. *Journal of Oceanography*, 2(3), 293–298.
- Fernandes, J. N. (2025). Core challenges for sustainable river flood management. *Sustainability*, 17(24), 10981. <https://doi.org/10.3390/su172410981>
- Gradiyanto, F., Parmantoro, P. N., & Suharyanto. (2024). Impact of climate change on Kupang River flow and hydrological extremes in Greater Pekalongan, Indonesia. *Water Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2024.03.005>
- Handayani, D., & Ningsih, U. (2012). Metode Thiessen polygon untuk ramalan sebaran curah hujan periode tertentu pada wilayah yang tidak memiliki data curah hujan. *Jurnal Teknologi Informasi Dinamik*, 17(2), 154–163.
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>

- Huda, M., Murtiningrum, M., & Prasetyo, A. (2023). Mitigasi dampak banjir dan rob terhadap lahan pertanian di Kota Pekalongan. *Jurnal Litbang Kota Pekalongan*, 21(1), 45–58.
- Huda, N., Sudarsono, B., & Sasmito, B. (2014). Analisis debit maksimum untuk pembuatan peta alokasi penggunaan air permukaan (studi kasus: DAS Kupang, Jawa Tengah). *Jurnal Teknik Geodesi*, 3(2).
- Iskandar, S. A., Helmi, M., Muslim, M., & Sasmito, B. (2020). Analisis geospasial area genangan banjir rob dan dampaknya terhadap penggunaan lahan tahun 2020–2025 di Kota Pekalongan, Provinsi Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(3), 201–210.
- Juliadi, S. A., Soekarno, I., Widyaningtiyas, E. O. N., Adi, A., & Rahmawati, D. (2024). Kajian banjir dan perubahan dasar Sungai Banger akibat penutupan regulator gate, Kota Pekalongan, Provinsi Jawa Tengah. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil dan Sumber Daya Air*, 4, 292–302.
- Kent, S., Yudianto, D., & Fitriana, F. (2022). Studi pengelolaan air hujan dalam rangka pengembangan taman konservasi di Kota Sawahlunto, Sumatera Barat. *Jurnal Sumber Daya Air*, 18(2), 109–120. <https://doi.org/10.32679/jsda.v18i2.820>
- Laksmi, G. S. (2020). Dampak alih fungsi lahan dan curah hujan terhadap banjir di Kota Pekalongan, Jawa Tengah. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal ke-8* (hlm. 382–391).
- Lutfitiana, P., Ramadhani, R. P., & Cahyono, M. (2022). Study of Loji Riverbed change in Pekalongan City. *Journal of Oceanography*, 11(2), 95–104.
- Miftakhudin, S. (2021). Strategi penanganan banjir rob Kota Pekalongan. *Jurnal Litbang Kota Pekalongan*.
- Natakusumah, D. K., Hatmoko, W., & Harlan, D. (2011). Prosedur umum perhitungan hidrograf satuan sintesis dengan cara ITB dan beberapa contoh penerapannya. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 18(3), 251–291. <https://doi.org/10.5614/JTS.2011.18.3.6>
- Nugroho, E. O., Ramadhani, R., Lutfitiana, P., Cahyono, M., Lestari, S., & Kumala, Y. (2023). Investigating the effectiveness of Banger River floodway on reducing water level of Loji River in Pekalongan City using HEC-RAS 1D model. Dalam *Proceedings of ICSBE* (hlm. 292–302). <https://doi.org/10.20885/ICSBE.VOL4.ART28>
- Putri, S. I. P. (2024). An overview of flood risk components: The land subsidence case of Pekalongan City. Dalam *E3S Web of Conferences* (Vol. 513). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451301001>
- Rahadiyitno, I., & Dewi, V. A. K. (2025). Analisis kapasitas Sungai Tengin di Kabupaten Penajam Paser Utara, Ibu Kota Nusantara, sebagai alternatif penanggulangan banjir. *Jurnal Media Teknik Sipil*, 23(1), 20–32. <https://doi.org/10.22219/JMTS.V23I1.38182>
- Tahir, S., Susanti, S., Amar, M., & Arifin, Z. (2023). Kebijakan penataan ruang kawasan rawan bencana di Desa Pattongko, Kecamatan Sinjai Tengah. *Administrasita: Jurnal Ilmu Administrasi Negara*, 14(2), 1–10.
- Tatonas. (2023). *Early warning system (EWS) pada banjir*. <https://web.tatonas.co.id/early-warning-system>
- Teshome, F. T., Bayabil, H. K., Thakural, L. N., & Welidehanna, F. G. (2020). Verification of the MIKE11-NAM model for simulating streamflow. *Journal of Environmental Protection*, 11(2), 152–167. <https://doi.org/10.4236/JEP.2020.112010>
- Upomo, T., Upomo, T. C., & Kusumawardani, R. (2016). Pemilihan distribusi probabilitas pada analisa hujan dengan metode goodness of fit test. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 18(2), 139–148. <https://doi.org/10.15294/jtsp.v18i2.7480>
- Vozinaki, A. E. K., Morianou, G. G., Alexakis, D. D., & Tsanis, I. K. (2017). Comparing 1D and combined 1D/2D hydraulic simulations using high-resolution topographic data: A case study of the Koiliaris Basin, Greece. *Hydrological Sciences Journal*, 62(4), 642–656. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1255746>