



Analisis Perubahan Garis Pantai dan Kenaikan Muka Air Laut di Desa Bedono dan Sidogemah, Kecamatan Sayung, Kabupaten Demak

Bintang Aona Nur Saputra^{1*}, Dega Adi Prabowo², Ari Sentani³, Moh Faiqun Niam⁴

^{1,2}Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung

^{1*}bintangaonaa07@gmail.com, ²degaadiprabowo88@gmail.com

Abstrak

Pesisir Kecamatan Sayung, Demak, mengalami degradasi parah akibat abrasi, banjir rob, dan penurunan tanah yang mengganggu sistem drainase. Penelitian ini menganalisis perubahan garis pantai (2005–2025), kenaikan muka air laut (SLR), penurunan tanah, serta dampaknya pada kapasitas hidraulik saluran. Metode mencakup interpretasi citra satelit multitemporal dengan indeks MNDWI dan Digital Shoreline Analysis System (DSAS) untuk menghitung Net Shoreline Movement (NSM) dan End Point Rate (EPR), analisis data pasang surut Badan Informasi Geospasial, sintesis laju subsidensi dari berbagai studi InSAR (DInSAR, PS-InSAR, SBAS) dan GNSS, serta survei lapangan dimensi saluran dan genangan yang dianalisis dengan persamaan Manning. Hasil menunjukkan dominasi abrasi seluas 286,94 ha berbanding akresi 8,86 ha (rasio 32:1), dengan rata-rata mundur garis pantai 32,5 m/tahun dan total 650 m, serta laju tertinggi -44 m/tahun (2015–2020). HAT aktual +0,554 m, tipe pasut campuran dominan harian tunggal. Laju SLR absolut 4,4 mm/tahun, RSLR 7,9 mm/tahun, akumulasi 2005–2025 sebesar 15,8 cm; proyeksi 2050 mencapai 73,8–82,5 cm. Laju penurunan tanah rata-rata 12,07 cm/tahun (maksimum 21 cm/tahun) atau 32–40 kali SLR global, menjadikan 81,2% area tergenang permanen (data JRC). Saluran drainase meluap 15–29 cm saat HAT, menunjukkan kegagalan sistem gravitasi. Disimpulkan subsidensi sebagai faktor dominan kerusakan. Diperlukan pengendalian penurunan tanah, infrastruktur pengendali rob, dan rehabilitasi drainase adaptif dan pemantauan jangka panjang berbasis data satelit serta model hidraulik.

Kata Kunci: Abrasi, Kenaikan Muka Air Laut, Penurunan Tanah, Sistem Drainase.

1. Latar Belakang

1.1 Kondisi Wilayah Pesisir Demak dan Urgensi Permasalahan

Wilayah pesisir Kabupaten Demak merupakan salah satu kawasan pantai utara Pulau Jawa yang mengalami perubahan lingkungan paling signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Perubahan tersebut ditandai oleh mundurnya garis pantai, meningkatnya frekuensi banjir rob, serta terganggunya fungsi lahan pesisir seperti tambak dan permukiman. Kondisi ini tidak hanya berdampak pada aspek fisik wilayah, tetapi juga memengaruhi keberlangsungan aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat pesisir. Penelitian ini secara khusus difokuskan pada wilayah pesisir Kecamatan Sayung, yang berada pada kisaran koordinat 6°54'02,33"LS dan 110°29'48,68"BT, dan mencakup tiga desa terdampak, yaitu Desa Bedono, Desa Sidogemah, dan Desa Gemulak. Ketiga desa tersebut dipilih karena secara langsung mengalami dampak abrasi pantai, genangan rob, dan kerusakan sistem drainase yang semakin parah dari tahun ke tahun.

Secara konseptual, wilayah pesisir merupakan zona transisi antara ekosistem darat dan laut yang secara fundamental dipengaruhi oleh dinamika kedua ranah tersebut [9]. Batas wilayah pesisir ditentukan oleh interaksi timbal balik antara proses daratan dan lautan, sebagaimana diamanatkan dalam peraturan perundang-undangan mengenai pengelolaan wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil [18]. Sebagai kawasan pertemuan dua ekosistem, pesisir memiliki morfologi khas berupa garis pantai, kemiringan lereng, elevasi rendah, dan karakteristik sedimen aluvial yang secara alami rentan terhadap dinamika hidro-oseanografi maupun tekanan antropogenik.

Perubahan garis pantai menjadi salah satu indikator utama dalam mengamati dinamika suatu wilayah pesisir. Pergeseran garis pantai dapat terjadi akibat proses alami seperti abrasi dan sedimentasi, maupun akibat aktivitas manusia berupa alih fungsi lahan [6], [20]. Di wilayah pesisir Demak, kecenderungan garis pantai dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan pola kemunduran yang cukup signifikan, terutama di Kecamatan Sayung, sebagai akibat tekanan hidro-oseanografi yang besar terhadap kawasan tersebut.

Selain perubahan garis pantai, kenaikan muka air laut (sea level rise) menjadi faktor penting lain yang memengaruhi kondisi pesisir. Kenaikan muka air laut menyebabkan elevasi permukaan laut semakin tinggi sehingga meningkatkan potensi genangan pada wilayah daratan yang memiliki elevasi rendah [10]. Kondisi ini memperparah kejadian banjir rob yang sudah rutin terjadi di kawasan pesisir Demak. Di sisi lain, wilayah pesisir Demak juga mengalami penurunan muka tanah (land subsidence) yang menyebabkan elevasi daratan menjadi semakin rendah relatif terhadap muka air laut [1], [4]. Kombinasi antara kenaikan muka air laut dan penurunan tanah inilah yang mengakibatkan wilayah pesisir semakin rentan terhadap genangan dan abrasi secara simultan.

Ketiga fenomena tersebut pada akhirnya berdampak langsung pada kinerja sistem drainase pesisir. Sistem drainase yang berfungsi mengalirkan air dari daratan ke laut menjadi kurang optimal ketika muka air laut berada pada elevasi tinggi, terutama saat pasang [14], [15]. Air dari daratan tidak dapat mengalir dengan baik karena tertahan oleh muka air laut, sehingga menimbulkan genangan yang lebih luas dan berlangsung lebih lama. Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan suatu kajian terintegrasi yang dapat menggambarkan sejauh mana perubahan garis pantai yang terjadi, besarnya kenaikan muka air laut, tingkat penurunan tanah, serta pengaruh ketiga faktor tersebut terhadap kinerja sistem drainase pesisir Demak.

1.2 Tujuan dan Ruang Lingkup Penelitian

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini meliputi tiga pertanyaan utama, yaitu sejauh mana perubahan garis pantai yang terjadi di wilayah pesisir Demak, berapa besar kenaikan muka air laut yang terjadi dalam rentang waktu tertentu, dan berapa besar penurunan tanah yang terjadi di wilayah tersebut. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis perubahan garis pantai, mengetahui besarnya kenaikan muka air laut, serta mengetahui besarnya penurunan tanah di wilayah pesisir Kecamatan Sayung, Kabupaten Demak.

Penelitian ini dibatasi pada beberapa hal. Lokasi penelitian difokuskan pada wilayah pesisir Kecamatan Sayung dengan titik koordinat acuan 6°54'28,21"LS dan 110°26'35,91"BT. Data yang digunakan terdiri atas data primer berupa dimensi saluran drainase eksisting dan kondisi genangan rob, serta data sekunder berupa citra satelit, data muka air laut, dan data penurunan tanah. Analisis perubahan garis pantai dilakukan berdasarkan interpretasi citra satelit, analisis kenaikan muka air laut menggunakan metode deret waktu, sedangkan analisis penurunan tanah menggunakan data sekunder tanpa pengukuran langsung di lapangan. Analisis kinerja sistem drainase dilakukan secara umum berdasarkan kondisi elevasi dan arah aliran. Pengolahan data dibantu dengan perangkat lunak sistem informasi geografis (SIG), aplikasi Google Earth, dan Digital Shoreline Analysis System (DSAS).

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat berupa tambahan pengetahuan mengenai dinamika wilayah pesisir, referensi bagi penelitian selanjutnya di bidang hidrologi pesisir dan teknik pantai, serta gambaran kondisi eksisting sebagai dasar bagi upaya penanganan permasalahan pesisir Demak secara lebih terarah.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi dan Diagram Alur Penelitian

Penelitian dilakukan di wilayah pesisir Kabupaten Demak, khususnya di Kecamatan Sayung, pada koordinat sekitar 6°54'02,33" Lintang Selatan dan 110°29'48,68" Bujur Timur. Kawasan ini memiliki karakteristik dataran rendah yang berbatasan langsung dengan Laut Jawa, sehingga cukup rentan terhadap genangan, terutama saat terjadi pasang air laut.

Penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan yang terjadi di wilayah pesisir, dilanjutkan dengan studi literatur untuk memperoleh dasar teori. Tahap berikutnya adalah pengumpulan data yang meliputi data citra satelit, data muka air laut, data penurunan tanah, dan data elevasi. Data tersebut kemudian dianalisis untuk mengetahui perubahan garis pantai, kenaikan muka air laut, serta penurunan tanah. Hasil dari ketiga analisis tersebut kemudian dikaji keterkaitannya dan dilanjutkan dengan analisis kinerja sistem drainase pesisir, sebelum akhirnya sampai pada tahap penarikan kesimpulan dan penyusunan saran.

Secara garis besar, tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, studi literatur, pengumpulan data, pengolahan dan analisis data, evaluasi hasil analisis, serta penarikan kesimpulan dan pemberian saran. Setiap tahap saling berkaitan sehingga hasil yang diperoleh dapat menggambarkan kondisi wilayah penelitian secara menyeluruh dan sistematis.

2.2 Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan melalui dua jalur, yaitu data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber instansional dan data primer yang diperoleh langsung melalui survei lapangan. Data sekunder mencakup data citra satelit multitemporal untuk melihat perubahan garis pantai dari waktu ke waktu, data muka air laut untuk mengetahui fluktuasi pasang surut dan tren kenaikannya, data penurunan tanah dari studi dan jurnal

ilmiah terdahulu, serta data elevasi wilayah berupa Digital Elevation Model (DEM) untuk mengetahui kondisi ketinggian wilayah terhadap muka air laut.

Data primer meliputi panjang dan posisi garis pantai eksisting yang diukur langsung di lapangan untuk memvalidasi hasil ekstraksi citra satelit, dimensi saluran drainase eksisting berupa lebar dan kedalaman saluran, kondisi genangan rob berupa lokasi titik genangan, tinggi muka air, dan lama waktu genangan, serta elevasi permukaan tanah di sekitar wilayah pesisir. Rincian kebutuhan data dan peralatan lapangan yang digunakan disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Kebutuhan Data Primer dan Peralatan Lapangan

No	Jenis Data	Parameter yang Diukur	Alat Lapangan	Tujuan Data
1	Panjang dan Posisi Pantai Eksisting	Koordinat batas daratan-air, geometri garis pantai	GPS/HP GPS, alat tulis lapangan	Validasi posisi garis pantai hasil ekstraksi citra satelit
2	Dimensi Saluran Drainase Eksisting	Lebar dan kedalaman saluran	Meteran (roll meter), alat tulis lapangan	Menganalisis kapasitas tampung penampang saluran
3	Kondisi Genangan Rob	Lokasi titik tergenang, tinggi muka air, durasi genangan	Kamera/smartphone, alat tulis lapangan	Memetakan sebaran spasial luapan air laut
4	Elevasi Permukaan Tanah	Ketinggian/elevasi tanah pesisir	Waterpass/automatic level, alat tulis lapangan	Memetakan kerentanan wilayah terhadap genangan

Tabel 2. Kebutuhan Data Sekunder dan Sumber Instansional

No	Jenis Data	Parameter	Sumber/Platform	Tujuan Data
1	Data Citra Satelit Multitemporal	Nilai piksel indeks air (MNDWI)	Google Earth Engine (GEE), Landsat/Sentinel	Melihat perubahan garis pantai dari waktu ke waktu
2	Data Muka Air Laut	Fluktuasi pasang surut, tren SLR	GEE (data pasut global), Badan Informasi Geospasial (BIG)/Dishidros	Mengetahui perubahan tinggi muka air laut
3	Data Penurunan Tanah	Laju ambblasan permukaan tanah	Instansi terkait, jurnal ilmiah	Mengetahui besarnya penurunan permukaan tanah
4	Data Elevasi Wilayah	Digital Elevation Model (DEM)	GEE, DEMNAS/SRTM/NASADEM	Mengetahui kondisi ketinggian wilayah terhadap muka air laut

Data yang telah dikumpulkan kemudian diseleksi dan disusun agar siap digunakan pada tahap analisis. Kesesuaian karakteristik fisik dan permasalahan wilayah pesisir Kecamatan Sayung menjadikan lokasi ini representatif untuk mengkaji keterkaitan antara perubahan garis pantai, kenaikan permukaan air laut, dan dampaknya terhadap fungsi sistem drainase pesisir.

2.3 Metode Analisis Perubahan Garis Pantai

Analisis perubahan garis pantai dilakukan menggunakan pendekatan multitemporal dengan memanfaatkan citra satelit pada beberapa tahun pengamatan, yaitu tahun 2005, 2010, 2015, 2020, dan 2025. Tahap pertama adalah interpretasi citra satelit melalui platform Google Earth Engine (GEE) yang difokuskan untuk memisahkan batas antara daratan dan perairan secara konsisten. Prosesnya dimulai dari pra-pengolahan berupa koreksi radiometrik dan geometrik, dilanjutkan dengan pembuatan komposit warna dan transformasi indeks air Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) untuk memperkuat kontras antara objek air dan daratan.

Setelah garis pantai diekstraksi dalam bentuk vektor, dilakukan perhitungan pergeseran absolut garis pantai menggunakan metode Net Shoreline Movement (NSM) serta perhitungan laju perubahan tahunan menggunakan metode End Point Rate (EPR), sebagaimana lazim digunakan dalam kajian dinamika pantai [16], [17]. Nilai NSM dihitung dengan mencari selisih jarak antara posisi garis pantai pada tahun awal dan tahun akhir pada setiap jalur transek pengamatan, dengan jarak antar transek sebesar 50 meter, menggunakan fitur Ruler pada perangkat lunak Google Earth Pro. Nilai EPR diperoleh dengan membagi nilai NSM terhadap selang waktu pengamatan, sehingga laju perubahan garis pantai dapat dinyatakan dalam satuan meter per tahun. Klasifikasi tingkat abrasi dan akresi berdasarkan nilai EPR mengikuti enam kelas, mulai dari abrasi sangat tinggi ($EPR < -2$ m/tahun) hingga akresi tinggi ($EPR > 2$ m/tahun), sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi Perubahan Garis Pantai Berdasarkan Nilai EPR

No	Kelas	Nilai EPR (m/tahun)	Makna
1	Abrasi Sangat Tinggi	< -2	Garis pantai mundur cepat ke arah darat
2	Abrasi Tinggi	-2 s.d. -1	Garis pantai mundur cukup cepat

No	Kelas	Nilai EPR (m/tahun)	Makna
3	Abrasi Rendah	-1 s.d. 0	Garis pantai mundur lambat
4	Stabil	0 s.d. 1	Perubahan sangat kecil
5	Akresi Sedang	1 s.d. 2	Garis pantai maju lambat
6	Akresi Tinggi	> 2	Garis pantai maju cepat

2.4 Metode Analisis Kenaikan Muka Air Laut

Analisis kenaikan muka air laut dilakukan dengan mengolah data pasang surut jangka panjang yang bersumber dari Direktorat Sistem Referensi Geospasial, Badan Informasi Geospasial (BIG), pada koordinat titik pengamatan $-6,9138^{\circ}\text{S}/110,5161^{\circ}\text{E}$ untuk periode 13 Januari 2005 hingga 13 Juni 2026 dengan resolusi temporal satu jam. Data prediksi harmonik BIG bersifat deterministik sehingga tidak mengandung komponen kenaikan muka air laut akibat perubahan iklim; oleh karena itu, data BIG digunakan sebagai acuan datum dan tipe pasut, sedangkan laju kenaikan Mean Sea Level (MSL) jangka panjang diperoleh dari sintesis data tide gauge terukur dan literatur ilmiah terkait [10], [12]. Untuk mendukung validasi datum, digunakan pula data pasang surut aktual hasil pengukuran lapangan di Stasiun Semarang.

Perhitungan datum pasang surut meliputi Mean High Water (MHW), Mean Low Water (MLW), Mean Sea Level (MSL), Tidal Range (TR), amplitudo pasut, serta indeks asimetri pasang-surut. Tipe pasang surut ditentukan melalui perhitungan Form Factor (F) dengan rumus $F = (K_1 + O_1)/(M_2 + S_2)$, di mana K_1 dan O_1 merupakan komponen diurnal utama, sedangkan M_2 dan S_2 merupakan komponen semi-diurnal utama. Analisis tren jangka panjang HW maksimum dan LW minimum tahunan dilakukan menggunakan regresi linear Ordinary Least Squares (OLS) dengan persamaan $Y = a + b \cdot t$.

Laju kenaikan muka air laut (Sea Level Rise/SLR) diestimasi dari sintesis data tide gauge terukur, sedangkan laju kenaikan relatif (Relative Sea Level Rise/RSLR) memperhitungkan komponen penurunan tanah. Proyeksi RSLR untuk periode 2025–2050 dihitung dengan rumus $\text{RSLR} = \text{SLR iklim} + \text{subsidence}$, mengacu pada skenario IPCC AR6 [5] serta laju subsidence lokal dari literatur pendukung. Analisis spasial luas area genangan dilakukan menggunakan platform GEE dengan metode static inundation (model bathtub), yaitu overlay DEM pesisir dengan ambang batas ketinggian skenario +1 m dan +2 m terhadap MSL.

2.5 Metode Analisis Penurunan Tanah

Analisis penurunan tanah (land subsidence) dilakukan dengan menghimpun dan membandingkan data dari berbagai studi penginderaan jauh yang mencakup periode 2010–2023 di wilayah Kecamatan Sayung dan Kabupaten Demak secara umum [1], [4], [13], [19], [21]. Metode penginderaan jauh yang digunakan pada studi-studi rujukan tersebut meliputi Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR), Persistent Scatterer InSAR (PS-InSAR), Small Baseline Subset (SBAS), serta pengembangannya berupa 2.5D SBAS, yang seluruhnya berbasis citra Synthetic Aperture Radar (SAR) satelit Sentinel-1. Sebagai pembanding dan validasi, digunakan pula data pengukuran langsung berbasis Global Navigation Satellite System (GNSS).

Laju penurunan tanah representatif dihitung menggunakan rata-rata aritmetika dari studi-studi dengan periode pengamatan kontemporer (2020–2023) yang menggunakan basis data Sentinel-1, dengan rumus $\bar{v} = (\sum v_i)/n$. Proyeksi penurunan kumulatif dihitung dengan rumus $S(t) = v \times t$, terhadap baseline tahun 2020, untuk beberapa skenario laju penurunan. Relevansi setiap sumber data dinilai berdasarkan empat kriteria, yaitu kekhususan lokasi terhadap Kecamatan Sayung, kemutakhiran data, validitas metode, dan konsistensi hasil dengan sumber lain, sehingga diperoleh sumber-sumber dengan tingkat relevansi tertinggi sebagai basis perhitungan utama.

2.6 Metode Analisis Kapasitas Hidraulik Sistem Drainase

Analisis kapasitas saluran drainase menggunakan Persamaan Manning untuk aliran seragam (uniform flow) pada saluran terbuka berbentuk persegi panjang, sebagaimana lazim digunakan dalam analisis saluran drainase perkotaan dan perdesaan di Indonesia [14], [15]. Persamaan Manning dinyatakan sebagai $Q = (1/n) \times A \times R^{2/3} \times S^{1/2}$, dengan Q adalah debit aliran, n adalah koefisien kekasaran Manning, A adalah luas penampang basah, R adalah jari-jari hidraulik (A/P), P adalah keliling basah, dan S adalah kemiringan saluran.

Data primer dimensi saluran diperoleh dari dua titik pengukuran di lapangan, yaitu Titik 1 yang mewakili Desa Bedono/Gemulak dan Titik 2 yang mewakili Desa Sidogemah. Perhitungan meliputi geometri hidraulik penampang saluran, kemiringan saluran berdasarkan beda elevasi muka air antar titik, debit aktual dan debit kapasitas penuh saluran, tingkat pengisian saluran (rasio kedalaman air aktual terhadap tinggi total saluran), freeboard, serta debit rencana menggunakan Metode Rasional untuk periode ulang hujan dua tahunan. Analisis

potensi luapan saluran dilakukan dengan membandingkan elevasi Highest Astronomical Tide (HAT) terhadap elevasi bibir atas saluran drainase pada masing-masing titik pengukuran. Sebagai pelengkap, digunakan pula data statistik genangan dari dataset JRC Global Surface Water pada platform GEE untuk melihat konsistensi kondisi genangan jangka panjang (1984–2021) pada koordinat studi.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di daerah pesisir Kecamatan Sayung, Kabupaten Demak, Provinsi Jawa Tengah, yang mencakup tiga desa, yaitu Desa Bedono, Desa Sidogemah, dan Desa Gemulak. Ketiga desa tersebut dipilih karena menjadi wilayah yang langsung terkena dampak perubahan kondisi pesisir, khususnya abrasi pantai, banjir rob, dan genangan air yang semakin sering terjadi. Secara geografis, lokasi penelitian berada di sekitar koordinat 6°54'02,33" Lintang Selatan dan 110°29'48,68" Bujur Timur, di bagian utara Kabupaten Demak yang berbatasan langsung dengan Laut Jawa, dengan topografi relatif datar dan elevasi rendah sehingga sangat terpengaruh oleh gerakan pasang surut air laut.

Berdasarkan hasil observasi lapangan, kondisi fisik wilayah penelitian menunjukkan perbedaan karakteristik antar desa. Desa Gemulak masih memiliki sistem drainase yang berfungsi meskipun pada bagian tertentu telah mengalami sedimentasi dan genangan saat pasang tinggi. Sebaliknya, Desa Sidogemah dan Desa Bedono mengalami kondisi yang jauh lebih parah, di mana sebagian besar saluran drainase tidak berfungsi bahkan tidak lagi dapat dikenali akibat genangan rob berkepanjangan dan perubahan garis pantai yang terus berlangsung.

Desa Bedono merupakan wilayah yang mengalami perubahan garis pantai terbesar dibandingkan wilayah penelitian lainnya. Beberapa area yang dahulu berupa daratan kini telah berubah menjadi area perairan akibat abrasi dan genangan pasang surut yang berlangsung terus-menerus dalam waktu lama, sehingga sebagian besar saluran drainase di kawasan ini sudah tidak dapat dikenali lagi karena tertutup air laut. Karakteristik tanah di daerah yang diteliti didominasi oleh jenis tanah aluvial hasil endapan material sungai dan laut, yang bersifat lembek dan mengandung banyak air sehingga lebih mudah mengalami penurunan permukaan tanah.

3.2 Perubahan Garis Pantai Tahun 2005–2025

Hasil ekstraksi indeks air MNDWI dari citra satelit tahun 2026 menunjukkan nilai berkisar antara -0,2483 hingga 0,2091, dengan nilai rata-rata sebesar 0,1259. Nilai minimum mencerminkan objek daratan kering seperti permukiman padat dan lahan pertanian, nilai maksimum menunjukkan badan air terbuka yang jernih di Laut Jawa, sedangkan nilai rata-rata yang positif menunjukkan bahwa wilayah kajian secara umum didominasi oleh objek air atau lahan basah. Hasil ini konsisten dengan temuan Muskananfola dkk. (2020) yang mencatat abrasi parah dan penurunan permukaan tanah besar di pesisir Sayung, Demak, serta hasil kajian kerentanan pesisir Demak oleh Marfai dkk. yang menunjukkan mundurnya garis pantai akibat dinamika hidro-oseanografi.

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan GEE, luas area yang mengalami abrasi mencapai 2.869.368,31 m² (± 286,94 ha), sedangkan luas area yang mengalami akresi hanya 88.561,27 m² (± 8,86 ha). Perbandingan kedua nilai tersebut menunjukkan bahwa perubahan garis pantai di wilayah kajian lebih banyak bersifat merusak, dengan rasio erosi terhadap penambahan sedimen sekitar 32:1. Pola dominasi abrasi yang sangat tinggi ini sejalan dengan penelitian di pesisir Pekalongan yang mencatat tingkat perubahan mencapai 3,95–4,02 meter per tahun, serta konsisten dengan temuan bahwa persentase abrasi di Kecamatan Sayung mencapai 82% dengan laju rata-rata 13,08 meter per tahun, jauh lebih tinggi dari laju akresi yang hanya 8,22 meter per tahun. Meskipun demikian, rasio 32:1 yang diperoleh jauh lebih besar dibandingkan hasil penelitian di pesisir Kabupaten Rembang, di mana luas akresi (70,2 ha) justru lebih besar daripada abrasi (5,08 ha) pada periode 2009–2019, sebuah perbedaan yang kemungkinan dipengaruhi faktor lokal seperti penurunan tanah, minimnya vegetasi mangrove, dan keterbatasan bangunan pelindung pantai di wilayah kajian.

Analisis Net Shoreline Movement (NSM) dilakukan menggunakan citra tahun 2005, 2010, 2015, 2020, dan 2025 pada Google Earth Pro dengan transek berjarak 50 meter. Hasil pengukuran jarak garis pantai terhadap titik acuan tetap di daratan disajikan pada Tabel 4, sedangkan hasil perhitungan NSM disajikan pada Tabel 5.

Tabel 4. Jarak Garis Pantai terhadap Titik Acuan (2005–2025)

No Tahun Jarak (km)		
1	2005	1,39
2	2010	1,23
3	2015	1,11

No	Tahun	Jarak (km)
4	2020	0,89
5	2025	0,74

Tabel 5. Hasil Perhitungan Net Shoreline Movement (NSM)

No	Periode	Hasil (km)	Hasil (m)	Keterangan
1	2005–2010	-0,16	-160	Mundur 160 m
2	2010–2015	-0,12	-120	Mundur 120 m
3	2015–2020	-0,22	-220	Mundur 220 m
4	2020–2025	-0,15	-150	Mundur 150 m
5	2005–2025	-0,65	-650	Mundur 650 m

Nilai negatif pada seluruh periode menunjukkan bahwa garis pantai mengalami kemunduran secara konsisten, dengan total kemunduran mencapai 650 meter selama 20 tahun pengamatan (2005–2025).



Gambar 1. Grafik Perubahan Garis Pantai Berdasarkan Nilai NSM Tahun 2005–2025

Selanjutnya, dilakukan perhitungan End Point Rate (EPR) dengan membagi nilai NSM terhadap selang waktu masing-masing periode. Hasil rekapitulasi EPR disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Perhitungan End Point Rate (EPR)

No	Periode	Jarak Perubahan	Selisih Waktu	EPR (m/tahun)	Klasifikasi
1	2005–2010	-160 m	5 tahun	-32	Abrasi Sangat Tinggi
2	2010–2015	-120 m	5 tahun	-24	Abrasi Sangat Tinggi
3	2015–2020	-220 m	5 tahun	-44	Abrasi Sangat Tinggi
4	2020–2025	-150 m	5 tahun	-30	Abrasi Sangat Tinggi
5	2005–2025	-650 m	20 tahun	-32,5	Abrasi Sangat Tinggi



Gambar 2 Grafik Perubahan Garis Pantai Berdasarkan Nilai EPR Tahun 2005–2025

Seluruh periode menunjukkan nilai EPR negatif dengan klasifikasi abrasi sangat tinggi. Laju abrasi tertinggi terjadi pada periode 2015–2020 sebesar -44 m/tahun, sedangkan laju rata-rata untuk keseluruhan periode 2005–2025 adalah -32,5 m/tahun. Pendekatan gabungan interpretasi citra satelit, NSM, dan EPR yang digunakan dalam penelitian ini sejalan dengan tren metodologis terbaru pada kajian garis pantai berbasis GEE dan MNDWI dengan resolusi sub-piksel, seperti yang diterapkan pada kajian di pesisir Kota Cirebon, sehingga menegaskan bahwa pendekatan yang digunakan memiliki dasar ilmiah yang kuat dan konsisten dengan literatur.

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12331>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

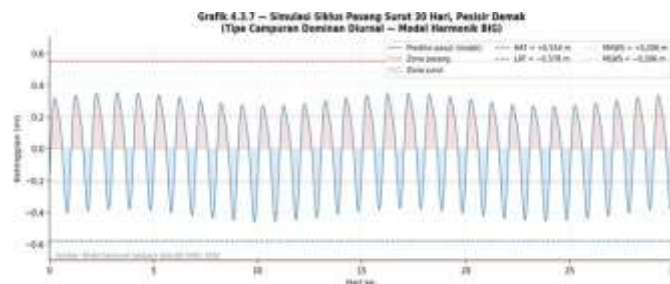
3.3 Kenaikan Muka Air Laut

Pengolahan 187.728 data prediksi pasang surut BIG periode 2005–2026 menghasilkan datum pasang surut sebagaimana disajikan pada Tabel 7. Nilai Highest Astronomical Tide (HAT) aktual tercatat +0,554 m dan Lowest Astronomical Tide (LAT) aktual –0,578 m, sehingga Astronomical Tidal Range (ATR) mencapai 1,132 m, lebih besar dibandingkan datum model referensi BIG karena data aktual merekam variasi siklus nodal 18,6 tahun secara penuh.

Tabel 7. Datum Pasang Surut Pesisir Demak Berdasarkan Data Prediksi BIG (2005–2026)

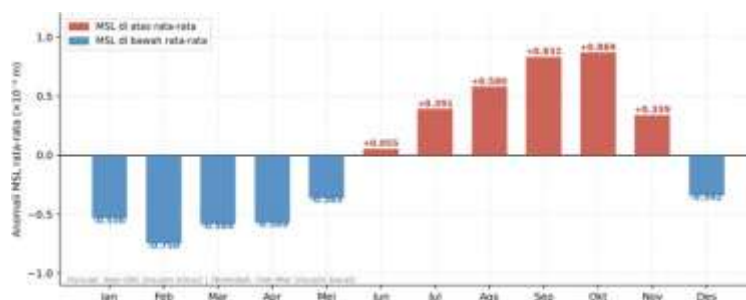
Datum Pasang Surut	Simbol	Nilai (m)	Keterangan
Highest Astronomical Tide	HAT	+0,554	Muka air tertinggi astronomis (aktual)
Mean High Water Springs	MHWS	+0,206	Rata-rata pasang purnama (model BIG)
Mean Sea Level	MSL	0,000	Datum referensi
Mean Low Water Springs	MLWS	–0,206	Rata-rata surut purnama (model BIG)
Lowest Astronomical Tide	LAT	–0,578	Muka air terendah astronomis (aktual)
Astronomical Tidal Range	ATR	1,132	HAT – LAT
Spring Tidal Range	STR	0,412	MHWS – MLWS

Analisis pola temporal data BIG menunjukkan bahwa tipe pasang surut di pesisir Demak adalah pasut campuran yang dominan harian tunggal (mixed, mainly diurnal), sebagaimana ditunjukkan oleh nilai Form Factor lebih besar dari 3,00. Karakteristik ini berimplikasi pada durasi genangan yang lebih panjang dibandingkan tipe pasut semi-diurnal, karena muka air tinggi berlangsung lebih lama dalam satu siklus harian.



Gambar 3 Simulasi Siklus Pasang Surut 30 Hari Pesisir Demak (Model Harmonik BIG)

Analisis regresi linear OLS terhadap data HW maksimum dan LW minimum tahunan (2005–2025) menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat rendah (0,21% untuk HWmax dan 0,01% untuk LWmin), yang mengindikasikan bahwa variasi tahunan lebih didominasi oleh siklus nodal bulan 18,6 tahun dibandingkan tren linear murni. Oleh karena itu, estimasi laju kenaikan muka air laut (SLR) diperoleh dari sintesis data tide gauge terukur dan literatur ilmiah. Berdasarkan studi terdahulu, laju SLR Stasiun Semarang tercatat sebesar 4,4 mm/tahun untuk periode 1996–2015, sedangkan laju kenaikan muka air laut relatif (RSLR) yang telah memperhitungkan penurunan tanah mencapai 7,9 mm/tahun untuk periode 1999–2009. Sebagai konteks pembandingan, laju SLR global tercatat sebesar 1,75 mm/tahun, dan laju SLR Indonesia sekitar 4,0 mm/tahun, sehingga laju SLR di kawasan Semarang–Demak tergolong 2,5 kali lebih besar dibandingkan rata-rata global.



DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12331>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Gambar 4. Variasi Musiman MSL Bulanan Rata-rata Pesisir Demak (2005–2026)

Berdasarkan laju SLR dan RSLR tersebut, dihitung kenaikan kumulatif muka air laut selama periode 2005–2025 ($\Delta t = 20$ tahun). Kenaikan kumulatif akibat SLR iklim murni tercatat sebesar 8,8 cm, sedangkan kenaikan kumulatif RSLR yang telah memperhitungkan penurunan tanah mencapai 15,8 cm. Selisih keduanya mengindikasikan komponen penurunan tanah (subsidence) yang terimplikasi sebesar 3,5 mm/tahun, nilai yang berada dalam rentang wajar 3–8 cm/tahun sebagaimana dilaporkan pada literatur terdahulu mengenai land subsidence pesisir Semarang–Demak.

Proyeksi kenaikan muka air laut relatif (RSLR) untuk periode 2025–2050 dihitung menggunakan skenario IPCC AR6 (SLR iklim RCP 4.5 sebesar 4,5 mm/tahun dan RCP 8.5 sebesar 8,0 mm/tahun) yang dikombinasikan dengan laju subsidence lokal moderat sebesar 25 mm/tahun. Hasil proyeksi disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Proyeksi Kenaikan Muka Air Laut Relatif (RSLR) Pesisir Demak 2025–2050

Tahun	SLR Iklim RCP 4.5 (cm)	SLR Iklim RCP 8.5 (cm)	RSLR RCP 4.5 + Subsidence (cm)	RSLR RCP 8.5 + Subsidence (cm)
2030	+2,3	+4,0	+14,8	+16,5
2035	+4,5	+8,0	+29,5	+33,0
2040	+6,8	+12,0	+44,3	+49,5
2045	+9,0	+16,0	+59,0	+66,0
2050	+11,3	+20,0	+73,8	+82,5

Hasil proyeksi menunjukkan bahwa hingga tahun 2050, RSLR pesisir Demak diperkirakan mencapai 73,8 cm pada skenario RCP 4.5 dan 82,5 cm pada skenario RCP 8.5, dengan selisih kedua skenario yang semakin melebar seiring waktu (dari 1,7 cm pada 2030 menjadi 8,7 cm pada 2050). Analisis spasial luas genangan menggunakan metode static inundation pada platform GEE menunjukkan bahwa luas genangan pada skenario kenaikan +1 m mencapai 6,054 km² (605,4 ha), sedangkan pada skenario +2 m mencapai 7,144 km² (714,4 ha), atau meningkat 18,0% dari skenario sebelumnya, sebagaimana disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Luas Area Tergenang Berdasarkan Skenario SLR, Pesisir Demak

Parameter	Skenario +1 m SLR	Skenario +2 m SLR	Selisih
Luas genangan (km ²)	6,054	7,144	+1,090
Luas genangan (ha)	605,39	714,38	+108,98
Peningkatan terhadap +1 m	— (baseline)	+18,0%	+18,0%
Estimasi waktu tercapai (RCP 8.5)	~Tahun 2055	~Tahun 2085	—

Berdasarkan nilai HAT aktual +0,554 m, seluruh daratan pesisir Demak dengan elevasi di bawah nilai tersebut sudah berpotensi tergenang pada kondisi pasang astronomis tertinggi, bahkan tanpa tambahan SLR iklim. Dengan mengacu pada studi terdahulu mengenai hubungan antara kenaikan muka air dan luas genangan di pesisir Semarang–Demak, proyeksi RSLR RCP 8.5 tahun 2050 sebesar 82,5 cm diperkirakan berpotensi memperluas area genangan hingga mendekati 41,74 km², mencakup wilayah yang lebih luas dari kondisi saat ini.

3.4 Penurunan Tanah (Land Subsidence)

Penurunan tanah menjadi penyebab utama terjadinya banjir rob yang terus-menerus di pesisir Demak, terutama di Kecamatan Sayung. Berbeda dengan kenaikan muka air laut yang berlangsung perlahan dan bersifat global, penurunan tanah di kawasan ini terjadi dengan kecepatan yang jauh lebih cepat dan bersifat lokal. Rekapitulasi data laju penurunan tanah dari tujuh sumber penelitian yang mencakup periode 2010–2023 disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Rekapitulasi Data Laju Penurunan Tanah Kecamatan Sayung/Pesisir Demak (2010–2023)

No	Sumber	Periode	Lokasi	Metode	Laju (cm/tahun)
1	UNDIP IJOCE (2023)	2021–2023	Kec. Sayung	DInSAR Sentinel-1	7–21 (± 14 avg)

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12331>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

No	Sumber	Periode	Lokasi	Metode	Laju (cm/tahun)
2	UIN Walisongo (2023)	2020–2023	Sayung	PS-InSAR	11,7
3	UIN Walisongo (2023)	2020–2023	Kab. Demak	PS-InSAR	10,0
4	Frontiers/Yuwono (2019) [21]	2016–2019	Pesisir Demak	DSInSAR + GNSS	0–2 s/d >10
5	MDPI (2025)	2017–2023	Demak	SBAS Sentinel-1	10,0
6	IJOG (2025)	2020–2023	Kab. Demak	2.5D SBAS	14,645
7	Nature Sci. Data (2023)	2010–2021	Pantura–Demak	GNSS	>3,0

Rata-rata laju penurunan tanah gabungan dari lima studi kontemporer berbasis Sentinel-1 (2020–2023) dihitung sebesar 12,07 cm/tahun ($\bar{v} = 60,345/5$). Berdasarkan nilai tersebut, disusun proyeksi penurunan kumulatif untuk tiga skenario laju, sebagaimana disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Proyeksi Penurunan Kumulatif Kecamatan Sayung (Baseline 2020)

t (tahun)	Periode	Skenario Rata-rata (12,07 cm/thn)	Skenario IJOG (14,645 cm/thn)	Skenario UIN Sayung (11,7 cm/thn)
3	2020–2023	36,21 cm	43,94 cm	35,10 cm
5	2020–2025	60,35 cm	73,23 cm	58,50 cm
7	2020–2027	84,49 cm	102,52 cm	81,90 cm
10	2020–2030	120,70 cm	146,45 cm	117,00 cm

Perbandingan laju penurunan tanah dengan laju kenaikan muka laut global (3,7 mm/tahun) menunjukkan rasio sekitar 32,6 hingga 39,6 kali lebih cepat, menegaskan bahwa penurunan tanah, bukan kenaikan muka laut global, merupakan faktor dominan dalam memperparah genangan rob di pesisir Demak. Faktor-faktor utama penyebab penurunan tanah di kawasan ini meliputi ekstraksi air tanah berlebihan untuk kebutuhan pertanian, industri pengolahan ikan, dan domestik; beban bangunan dan infrastruktur di atas lapisan tanah aluvial kompresibel; konsolidasi alami sedimen muda yang belum terkonsolidasi penuh; serta perubahan penggunaan lahan berupa konversi tambak dan lahan basah menjadi permukiman dan pertanian yang mengurangi fungsi ekohidrologi penstabil permukaan tanah.

Berdasarkan analisis komprehensif ketujuh sumber tersebut, dapat disimpulkan bahwa laju penurunan tanah di Kecamatan Sayung berkisar 11,7–14,645 cm/tahun dengan rata-rata gabungan studi kontemporer 12,07 cm/tahun, dan nilai maksimum mencapai 21 cm/tahun pada titik-titik tertentu, menjadikan Kabupaten Demak sebagai kawasan dengan laju penurunan tanah tertinggi di sepanjang pantai utara Jawa.

3.5 Kondisi dan Kapasitas Sistem Drainase Pesisir

Sistem drainase di kawasan pesisir Kecamatan Sayung berada dalam kondisi kritis akibat kombinasi tiga faktor yang saling memperkuat, yaitu penurunan muka tanah sebesar 11–15 cm/tahun, kenaikan muka air laut sebesar 4,4 mm/tahun, serta kapasitas sistem drainase yang tidak lagi memadai karena didesain sebelum subsidensi masif terjadi. Berbeda dengan sistem polder di Kota Semarang yang dilengkapi pompa mekanis dan tanggul keliling, sistem drainase di Desa Gemulak, Sidogemah, dan Bedono sepenuhnya mengandalkan gravitasi, yang hanya efektif apabila muka air di saluran lebih tinggi daripada muka air laut. Dengan elevasi daratan yang hanya berkisar 8–16 cm di atas MSL, sistem gravitasi ini mengalami kegagalan total saat pasang astronomis tertinggi.

Tabel 12. Karakteristik Geologi dan Implikasi Hidrologi Kecamatan Sayung

Parameter	Kondisi Lapangan	Implikasi Hidrologi
Jenis tanah	Lempung lunak (soft clay)	Permeabilitas rendah, air lambat meresap
Kedalaman lapisan lempung	>100 m (normally consolidated)	Potensi konsolidasi dan subsidence tinggi
Laju land subsidence	5–21 cm/tahun	Elevasi tanah terus menurun relatif terhadap laut
Elevasi kawasan	Sebagian di bawah MSL; 8–16 cm di atas MSL	Genangan sulit surut secara gravitasi

Parameter	Kondisi Lapangan	Implikasi Hidrologi
Sistem drainase	Gravitasi penuh, tanpa pompa/pintu air	Gagal total saat HAT; rentan tidal backflow

Pengukuran data primer dilakukan pada dua titik yang mewakili kondisi berbeda, yaitu Titik 1 (Desa Bedono/Gemulak) dan Titik 2 (Desa Sidogemah), dengan spesifikasi penampang saluran yang sama berupa lebar 160 cm dan kedalaman air 48 cm. Hasil pengukuran elevasi disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13. Data Primer Pengamatan Drainase dan Elevasi Kecamatan Sayung

Parameter	Titik 1 (Gemulak)	Titik 2 (Sidogemah)	Satuan
Lebar saluran (b)	160	160	cm
Kedalaman air (h)	48	48	cm
Elevasi jalan	+13,50	+9,65	cm MSL
Muka air drainase	+15,65	+8,40	cm MSL
Elevasi permukiman	+13,00	+8,10	cm MSL
Tinggi total saluran (H)	58,5	80,0	cm
Hasil: jalan vs muka air	Tergenang (-2,15 cm)	Aman (+1,25 cm)	cm
Hasil: permukiman vs muka air	Tergenang (+2,65 cm)	Hampir tergenang (+0,30 cm)	cm

Data primer menunjukkan bahwa di Titik 1, muka air drainase (+15,65 cm MSL) sudah berada di atas elevasi jalan (+13,50 cm) dan permukiman (+13,00 cm), sehingga genangan terjadi bahkan pada kondisi pasang normal, bukan hanya saat rob ekstrem. Di Titik 2, margin permukiman terhadap muka air drainase hanya 0,30 cm, kondisi kritis yang berpotensi terlampaui dalam waktu kurang dari satu tahun dengan laju penurunan tanah 11,7 cm/tahun.

Perhitungan kapasitas hidraulik menggunakan Persamaan Manning menghasilkan luas penampang basah 0,768 m² pada Drainase 1 dan 1,280 m² pada Drainase 2, dengan jari-jari hidraulik masing-masing 0,300 m dan 0,400 m. Debit aktual Drainase 1 tercatat sebesar 0,371 m³/detik, sedangkan debit rencana metode rasional untuk hujan periode ulang dua tahun sebesar 0,417 m³/detik, sehingga terjadi defisit sekitar 11% pada Drainase 1, sementara Drainase 2 mengalami surplus sekitar 31%. Rekapitulasi hasil perhitungan hidraulik disajikan pada Tabel 14.

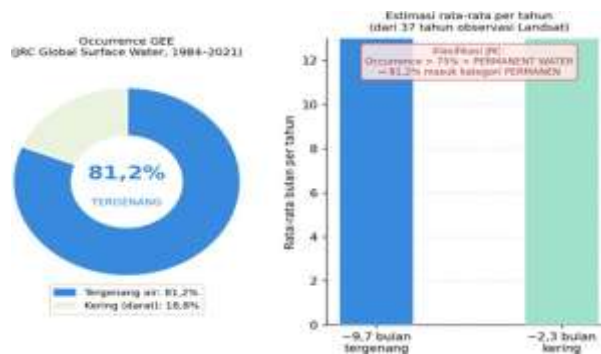
Tabel 14. Rekapitulasi Kapasitas Hidraulik Saluran Drainase Kecamatan Sayung

Parameter Hidraulik	Drainase 1 (Bedono/Gemulak)	Drainase 2 (Sidogemah)	Satuan
Luas penampang (A)	0,768	1,280	m ²
Jari-jari hidraulik (R)	0,300	0,400	m
Kemiringan (S)	0,0005	0,0003	m/m
Debit aktual (Q)	0,371	—	m ³ /s
Tingkat pengisian	82,1% (kritis)	60,0%	%
Freeboard	10,5 (kritis)	32,0	cm
Debit rencana	Defisit 11%	Surplus 31%	m ³ /s
Luapan saat HAT (+55,4 cm)	+29,25 cm (meluap)	+15,00 cm (meluap)	cm

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kedua saluran drainase meluap saat terjadi pasang astronomis tertinggi (HAT +55,4 cm MSL), dengan Drainase 1 meluap 29,25 cm dan Drainase 2 meluap 15,00 cm di atas bibir saluran, sehingga terjadi tidal backflow, yaitu masuknya air laut ke daratan melalui saluran drainase.

Sebagai validasi independen, analisis dataset JRC Global Surface Water pada platform GEE untuk koordinat studi menunjukkan nilai occurrence genangan sebesar 81,20% selama periode pengamatan 1984–2021 (37 tahun), yang menurut klasifikasi JRC termasuk kategori permanent water (occurrence > 75%). Nilai ini berarti

lokasi studi hanya tampak kering rata-rata sekitar 2,3 bulan per tahun. Perbandingan data primer lapangan dan hasil GEE disajikan pada Tabel 15, yang menunjukkan konsistensi tinggi antara kedua sumber data.



Gambar 5. Statistik Genangan Air GEE — Occurrence 81,2% (JRC Global Surface Water, 1984–2021)

3.6 Keterkaitan Antar Faktor dan Pembahasan Terpadu

Hasil analisis dari sub-bab 3.1 hingga 3.5 mengindikasikan bahwa kerusakan pesisir Kecamatan Sayung tidak disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan oleh interaksi empat proses yang saling memperkuat, yaitu perubahan garis pantai, kenaikan muka air laut, penurunan tanah, dan penurunan kinerja sistem drainase. Perubahan garis pantai yang didominasi abrasi seluas 286,94 ha dibandingkan akresi 8,86 ha (rasio 32:1), dengan laju rata-rata -32,5 m/tahun, tidak hanya merupakan proses alami akibat gelombang dan arus laut, tetapi juga sangat terkait dengan kenaikan muka air laut dan penurunan tanah yang mempercepat hilangnya daratan.

Nilai HAT aktual +0,554 m yang berada di atas rata-rata elevasi daratan pesisir Demak (0,0–0,5 m) menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah telah berada pada ambang kritis genangan saat pasang tertinggi, bahkan tanpa tambahan SLR. Namun, laju SLR sebesar 4,4 mm/tahun tergolong sedang secara global, sehingga faktor penurunan tanah menjadi kunci untuk memahami mengapa abrasi di wilayah ini berlangsung jauh lebih cepat dibandingkan kawasan pesisir lain di pantai utara Jawa dengan laju subsidence lebih rendah. Dengan laju 11,7–14,645 cm/tahun atau 32–40 kali lebih cepat dibandingkan kenaikan muka laut global, penurunan tanah menyebabkan garis pantai yang sebelumnya berupa daratan berangsur-angsur berubah menjadi wilayah perairan permanen, seperti yang terjadi di Desa Bedono, sehingga abrasi yang terdeteksi pada citra satelit sesungguhnya merupakan gabungan antara erosi gelombang dan tenggelamnya daratan akibat subsidence.

Keterkaitan ketiga faktor tersebut pada akhirnya bermuara pada kegagalan sistem drainase. Data lapangan menunjukkan muka air drainase di Titik 1 (+15,65 cm MSL) telah melampaui elevasi jalan dan permukiman, sehingga menimbulkan genangan bahkan pada kondisi pasang normal, sementara analisis hidraulik Manning membuktikan kedua saluran meluap saat HAT. Sistem drainase gravitasi tanpa bantuan pompa mekanis atau pintu air menjadi tidak berfungsi ketika elevasi daratan telah turun mendekati atau di bawah MSL, sehingga menimbulkan tidal backflow. Konsistensi antara data primer, perhitungan hidraulik, dan data penginderaan jauh jangka panjang (occurrence 81,20%) menegaskan bahwa genangan rob di Kecamatan Sayung bukan peristiwa musiman, melainkan kondisi kronis yang terus memburuk seiring waktu. Temuan ini menunjukkan bahwa strategi penanganan yang hanya berfokus pada perbaikan dimensi saluran tanpa menangani penurunan tanah akan bersifat sementara, karena elevasi daratan akan terus menurun melampaui perbaikan yang dilakukan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan terhadap wilayah pesisir Kecamatan Sayung, Kabupaten Demak, dapat disimpulkan beberapa hal berikut. Pertama, perubahan garis pantai di wilayah kajian didominasi oleh abrasi seluas 286,94 hektar dibandingkan akresi yang hanya 8,86 hektar, dengan rasio sekitar 32:1. Garis pantai bergerak mundur rata-rata 32,5 meter per tahun selama periode 2005–2025, dengan laju tercepat mencapai -44 meter per tahun pada periode 2015–2020, seluruhnya masuk kategori abrasi sangat tinggi. Kedua, kenaikan muka air laut ditunjukkan oleh nilai HAT aktual +0,554 m dan LAT aktual -0,578 m. Laju SLR tercatat 4,4 mm/tahun, sedangkan RSLR yang memperhitungkan subsidence mencapai 7,9 mm/tahun, menghasilkan kenaikan kumulatif 2005–2025 sebesar 8,8 cm (SLR) dan 15,8 cm (RSLR). Proyeksi hingga tahun 2050 menunjukkan potensi kenaikan RSLR sebesar 73,8–82,5 cm, yang berpotensi memperluas area genangan hingga sekitar 41,74 km². Ketiga, penurunan tanah di Kecamatan Sayung berlangsung dengan laju 11,7–14,645 cm/tahun (rata-rata 12,07 cm/tahun), dengan nilai maksimum mencapai 21 cm/tahun pada titik tertentu — 32 hingga 40 kali lebih cepat dibandingkan laju kenaikan muka laut global. Penurunan tanah terbukti menjadi faktor dominan penyebab

genangan rob, didukung oleh data primer yang menunjukkan margin genangan permukiman hanya 0,30 cm di Desa Sidogemah, serta data GEE yang menunjukkan 81,2% area kajian berada dalam kategori genangan permanen. Analisis kapasitas hidrolik turut membuktikan bahwa sistem drainase gravitasi eksisting di kedua titik pengukuran meluap saat pasang astronomis tertinggi, dengan Drainase 1 meluap 29,25 cm dan Drainase 2 meluap 15,00 cm di atas bibir saluran. Berdasarkan temuan tersebut, disarankan agar penelitian lanjutan menambah titik pengukuran lapangan terutama di Desa Bedono dengan pemantauan berkelanjutan minimal satu tahun; melakukan pengukuran penurunan tanah langsung menggunakan GNSS untuk validasi data sekunder; menerapkan pemodelan hidrodinamika tidak tetap seperti HEC-RAS untuk menganalisis tidal backflow secara lebih akurat; mengembangkan konsep mitigasi struktural secara teknis dan finansial; mengkaji aspek sosial masyarakat terdampak untuk mendukung perumusan kebijakan adaptasi; serta membangun sistem pemantauan jangka panjang yang mampu menangkap pengaruh siklus nodal 18,6 tahun terhadap dinamika pesisir Demak.

Referensi

- [1] H. Z. Abidin, H. Andreas, I. Gumilar, and Y. Fukuda, "Land subsidence in coastal city of Semarang (Indonesia): characteristics, impacts and causes," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 4, no. 3, pp. 226–240, 2013.
- [2] H. Bakti, "Analisis genangan banjir rob di wilayah pesisir," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 15, no. 2, pp. 85–92, 2010.
- [3] D. L. Galloway, D. R. Jones, and S. E. Ingebritsen, *Land Subsidence in the United States*, U.S. Geological Survey Circular 1182, 2008.
- [4] S. Hutabarat, *Geologi Lingkungan dan Penurunan Tanah di Indonesia*. Jakarta: Badan Geologi, 2017.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2021.
- [6] F. Kasim and M. A. Salam, "Analisis perubahan garis pantai menggunakan data penginderaan jauh," *Jurnal Ilmu Kelautan*, vol. 20, no. 4, pp. 211–220, 2015.
- [7] R. J. Kodoatie and R. Sjarief, *Pengelolaan Sumber Daya Air Terpadu*. Yogyakarta: Andi, 2005.
- [8] M. A. Marfai, "Pemodelan spasial banjir rob di wilayah pesisir Semarang," *Jurnal Geografi*, vol. 1, no. 2, pp. 45–53, 2004.
- [9] A. Nontji, *Laut Nusantara*. Jakarta: Djambatan, 2002.
- [10] E. Nurhayati, "Pengaruh perubahan iklim terhadap kenaikan muka air laut di Indonesia," *Jurnal Sains dan Teknologi Kelautan*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, 2012.
- [11] M. Panjaitan et al., "Analisis penyebab banjir rob di wilayah pesisir," *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 27, no. 1, pp. 55–63, 2021.
- [12] D. T. Pugh, *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 1987.
- [13] D. Sarah, "Kajian penurunan tanah di wilayah pesisir Indonesia," *Jurnal Geoteknik Indonesia*, vol. 18, no. 1, pp. 33–42, 2022.
- [14] Suripin, *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan*. Yogyakarta: Andi, 2003.
- [15] Suripin, *Drainase Perkotaan*. Yogyakarta: Andi, 2004.
- [16] B. Triatmodjo, *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset, 1999.
- [17] B. Triatmodjo, *Perencanaan Bangunan Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset, 2012.
- [18] Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2007 tentang Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil.
- [19] Wetlands International, *Laporan Penurunan Tanah di Wilayah Pesisir Indonesia*, 2019.
- [20] S. I. Wahyudi, "Perubahan garis pantai akibat aktivitas manusia," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 16, no. 2, pp. 101–110, 2009.
- [21] B. D. Yuwono, S. Subiyanto, A. S. Pratomo, and N. Najib, "Time series of land subsidence rate on coastal Demak using GNSS CORS UDIP and DInSAR," *E3S Web of Conferences*, vol. 94, 2019.