

Pemodelan Prediksi Perubahan Garis Pantai di Pantai Legian (Kuta–Seminyak)-Bali

MORDEKHAI I.G.SIMATUPANG¹, DIAN NOOR HANDIANI¹

¹Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional
Bandung, Jl. PHH Hasan Mustopa No.23,
Neglasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40124, Indonesia

Email: mordekhaisimatupang@gmail.com

Article History: Submitted 22 Agustus 2026 Revised 25 September 2026 Accepted 26 September 2026

ABSTRAK

Pantai Legian (Kuta–Seminyak) merupakan kawasan wisata pesisir Bali yang rentan abrasi. Penelitian ini menganalisis perubahan garis pantai periode 2016–2025 dan memprediksi posisinya tahun 2035 menggunakan QGIS Shoreline Change Analysis Tool (QSCAT). Data citra Sentinel-2 dikoreksi pasang surut dan dianalisis pada 114 transek. Hasil menunjukkan secara agregat pantai stabil hingga akresi ringan ($EPR +0,445$ m/tahun), namun LRR rata-rata ($-0,064$ m/tahun) mengindikasikan abrasi jangka panjang. Segmen Legian memiliki abrasi tertinggi ($LRR -0,959$ m/tahun; 93% transek). Nilai R^2 rendah ($0,066-0,133$) dan LCI lebar ($\pm 3,8-\pm 5,5$ m/tahun) menunjukkan ketidakpastian tinggi, sehingga tren tidak signifikan secara statistik. Prediksi 2035 menunjukkan abrasi pada 113 dari 114 transek dengan pergeseran terbesar di Legian ($-54,16$ m, ketidakpastian $\pm 59,44$ m). Hasil ini bersifat skenario eksploratif, bukan prediksi pasti. Diperlukan penambahan data tahunan dan pendekatan non-linear untuk meningkatkan akurasi.

Kata kunci: Garis pantai, QSCAT, Koreksi pasang surut, Abrasi, Pantai Legian

ABSTRACT

Legian Beach (Kuta–Seminyak) is a coastal tourism area in Bali that is vulnerable to erosion. This study analyzes shoreline changes for the 2016–2025 period and predicts its position in 2035 using the QGIS Shoreline Change Analysis Tool (QSCAT). Sentinel-2 imagery was tide-corrected and analyzed across 114 transects. Results show that, in aggregate, the shoreline was stable to slight accretion ($EPR +0.445$ m/year), yet the average LRR (-0.064 m/year) indicates a slight long-term erosion trend. The Legian segment exhibited the highest erosion rate ($LRR -0.959$ m/year; 93% of transects). Low R^2 values ($0.066-0.133$) and wide LCI ($\pm 3.8-\pm 5.5$ m/year) indicate high uncertainty, making the trends statistically insignificant. The 2035 projection shows erosion in 113 of 114 transects, with the largest shift in Legian (-54.16 m, uncertainty ± 59.44 m). These results should be interpreted as exploratory scenarios rather than deterministic predictions. Further research with extended annual data and non-linear approaches is recommended to improve accuracy.

Keywords: Shoreline, QSCAT, Tidal correction, Erosion, Legian Beach

1. PENDAHULUAN

Pantai Legian, yang membentang di antara Kuta dan Seminyak di Kabupaten Badung, Bali, merupakan salah satu kawasan wisata pesisir dengan keindahan alamnya, keunikan budayanya, serta keramahtamahan masyarakat lokalnya (Bryan dkk., 2025). Badan Pusat Statistik (BPS Bali, 2023) mencatat Pantai Kuta menerima lebih dari satu juta wisatawan setiap tahunnya dan ini mempengaruhi lingkungan di sekitar area tersebut. Sepanjang 5,3 kilometer garis pantai Kuta–Legian–Seminyak tercatat mengalami abrasi (Safitri dan Arief, 2026) dan penelitian oleh Hastuti dkk. (2024) menunjukkan bahwa garis pantai Provinsi Bali secara keseluruhan menyusut rata-rata 1,21 meter per tahun selama periode 2016–2021. Perubahan lingkungan pesisir dalam lingkup garis pantai ini, bagi kawasan wisata padat bangunan, seperti Pantai Legian, dapat berdampak langsung pada aktivitas ekonomi dan keselamatan infrastruktur di sepanjang pantai.

Analisis perubahan garis pantai berbasis penginderaan jauh, khususnya menggunakan modul Shoreline Change Analysis Tool (QSCAT) pada Geographic Information System (QGIS) dan mengadopsi algoritma Digital Shoreline Analysis System (DSAS) (Thieler dkk., 2009; Himmelstoss dkk., 2021; Facun dkk., 2025). Modul ini telah banyak diterapkan untuk memetakan laju perubahan garis pantai di berbagai lokasi di Indonesia, termasuk Bali (Hastuti dkk., 2024). Di wilayah Indonesia lainnya, diantaranya di Sayung, Demak (Muskananfola dkk., 2020) dan Pulau Belitung (Sabina dkk., 2024), serta penilaian kerentanan pesisir Bali (Hastuti dkk., 2022). Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut belum dilengkapi dengan komponen pemodelan prediksi untuk mengestimasi posisi garis pantai pada masa mendatang, padahal informasi tersebut penting bagi perencanaan mitigasi jangka panjang.

Beberapa studi implementasi model prediksi garis pantai berbasis Kalman Filter telah dilakukan, diantaranya Long dan Plant (2012) mengembangkan kerangka Extended Kalman Filter untuk memproyeksikan evolusi garis pantai berdasarkan data observasi historis. Selanjutnya, Laksono dkk. (2022) menerapkan pendekatan serupa pada Dataran Pantai Catania, Italia, dan menunjukkan bahwa keandalan model prediksi sangat dipengaruhi oleh morfologi pesisir setempat, termasuk keberadaan struktur pelindung pantai.

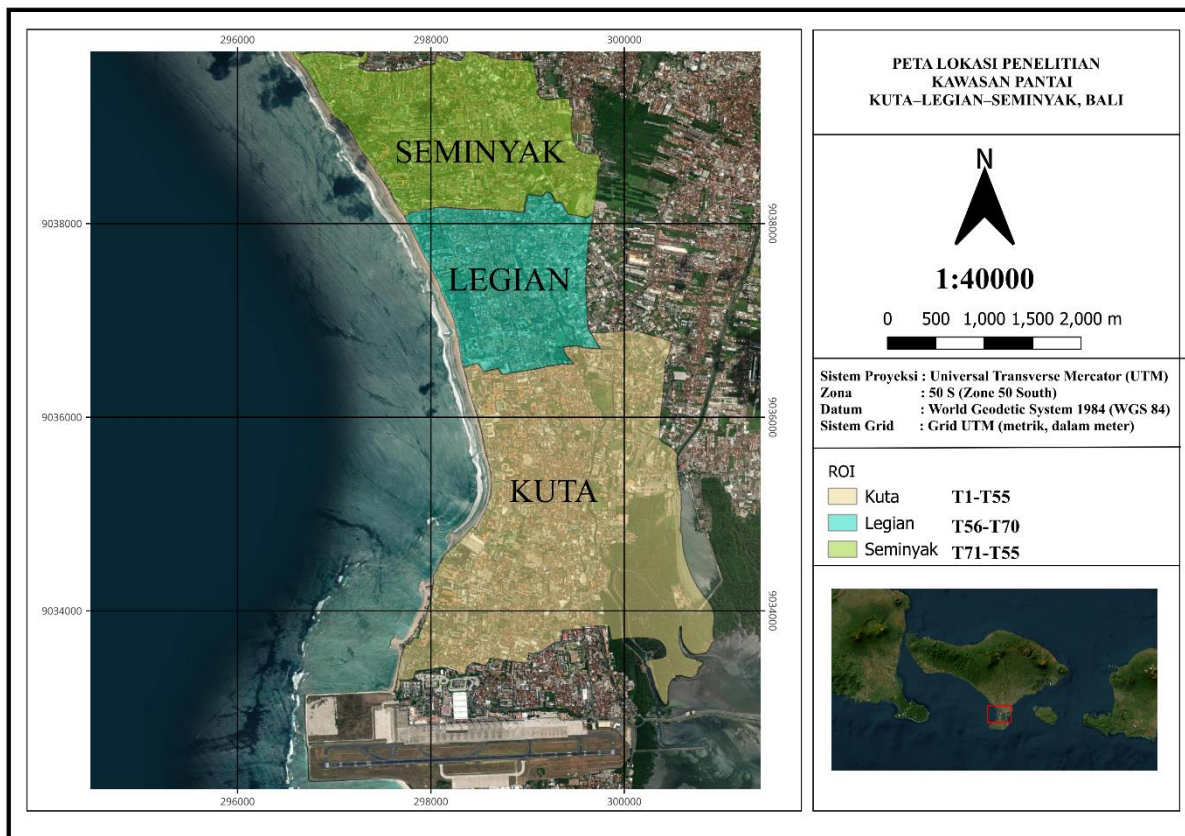
Penelitian ini bertujuan menganalisis laju perubahan garis pantai Legian (Kuta–Seminyak) periode 2016–2025 menggunakan modul QSCAT pada QGIS dan prediksi posisi garis pantai di tahun 2035 menggunakan algoritma Kalman Filter pada modul tersebut. Pemodelan perubahan garis pantai ini digunakan untuk mendukung perencanaan mitigasi abrasi di kawasan tersebut. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi pemerintah daerah, pengelola kawasan wisata, dan instansi terkait pengelolaan pesisir dalam menetapkan prioritas lokasi serta strategi mitigasi abrasi di kawasan Kuta–Legian–Seminyak.

2. METODOLOGI

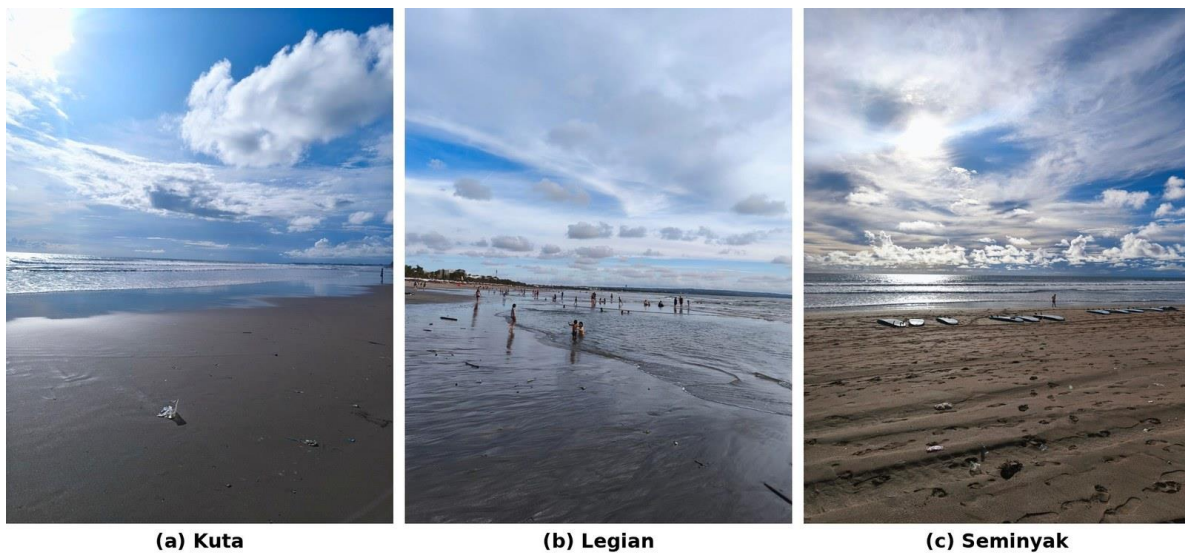
2.1 Lokasi dan Data Penelitian

Penelitian dilakukan di Pantai Legian yang membentang dari Kuta hingga Seminyak, Kabupaten Badung, Bali, dengan panjang garis pantai sekitar 5–7 km (Gambar 1). Kawasan penelitian dibagi menjadi tiga segmen transek berdasarkan batas administratif, yaitu Kuta (transek T1–T55), Legian (T56–T70), dan Seminyak (T71–T114), dengan total 114 transek dan rentang setiap transeknya sebesar 50 m.

Data utama yang digunakan adalah citra Sentinel-2 Level-2A selama 10 tahun dari 2016–2025 dengan tutupan awan minimal (European Space Agency, 2024). Data pendukung meliputi data pasang surut prediksi pada saat akuisisi tiap citra dan Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS) untuk estimasi kemiringan pantai pada zona intertidal (Badan Informasi Geospasial, 2018). Citra Sentinel-2 Level-2A memiliki resolusi spasial 10 meter pada band yang digunakan untuk digitasi garis pantai, sedangkan DEMNAS memiliki resolusi spasial 8,3 meter. Gambar 2 menunjukkan dokumentasi lapangan di bagian area pantai, mewakili di setiap batas administratifnya.



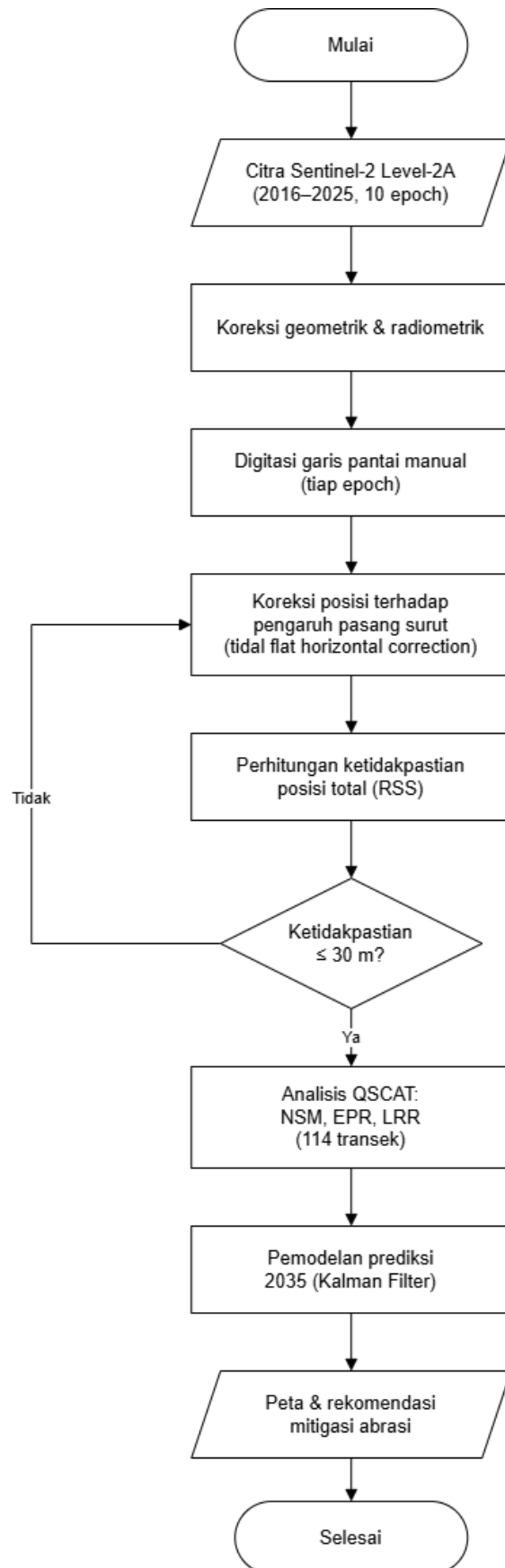
Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian Beserta Informasi Transek dari Awal di Arah Utara



Gambar 2. Dokumentasi Kondisi Lapangan: (a) Kuta, (b) Legian, dan (c) Seminyak (Sumber: Survei Lapangan, Maret 2026)

2.2 Prosedur Perhitungan dan Analisis Perubahan Garis Pantai

Model perubahan garis pantai dihitung menggunakan tool QSCAT pada perangkat lunak QGIS. Detil proses pengolahan data ditunjukkan di Gambar 3, dimulai dari akuisisi citra Sentinel-2, koreksi geometrik dan radiometrik, digitasi garis pantai, koreksi terhadap pengaruh pasang surut, perhitungan ketidakpastian posisi, hingga analisis QSCAT dan pemodelan prediksi.



Gambar 3. Diagram Alir Pengolahan Data

Garis pantai pada setiap tahun didigitasi secara manual dari citra yang telah dikoreksi secara geometrik dan radiometrik. Sebelum dianalisis, posisi garis pantai dikoreksi terhadap pengaruh pasang surut menggunakan pendekatan *tidal flat horizontal correction* (Vos dkk., 2019), sebagaimana dituliskan pada Persamaan (1).

$$\Delta x = \frac{Z_{tide} - Z_{ref}}{\tan \beta} \quad (1)$$

dengan Δx adalah pergeseran horisontal, Z_{tide} adalah tinggi muka air saat akuisisi citra, Z_{ref} adalah datum referensi (Mean Sea Level), dan β adalah kemiringan pantai hasil ekstraksi DEMNAS. Ketidakpastian total posisi garis pantai dihitung dengan menggabungkan ketidakpastian posisi akibat resolusi spasial citra ($q_{sunc} = 14,14$ m) dan ketidakpastian koreksi pasut secara *root sum square* menghasilkan ambang deteksi total 29,41 m (Himmelstoss dkk., 2021). Nilai ini melebihi panjang horisontal dari piksel citra Sentinel-2, yaitu sebesar 10m. Sehingga masing-masing garis pantai perlu dikoreksi sebagai akibat dari pengaruh pasang surutnya. Koreksi dilakukan dengan menggeser lokasi garis pantai ke arah darat atau laut sesuai dengan kondisi pasut dari masing-masing data pengamatan di setiap tahunnya. Garis pantai terkoreksi selanjutnya dianalisis di modul QSCAT dan dihitung nilai NSM, EPR, dan LRR. Hasil ini kemudian digunakan sebagai input pemodelan prediksi posisi garis pantai di tahun 2035 menggunakan algoritma Kalman Filter. Algoritma ini menghitung secara adaptif dengan memperbarui estimasi tren setiap kali data tahun baru dimasukkan (Facun dkk., 2025).

Selain nilai LRR, QSCAT turut menghasilkan tiga parameter statistik pendukung yang saling terkait secara matematis, yaitu Linear Standard Error (LSE), koefisien determinasi (R^2), dan Lower Confidence Interval (LCI). Ketiganya diturunkan dari sumber perhitungan yang sama, yaitu jumlah kuadrat residual antara posisi shoreline hasil pengamatan dan posisi hasil prediksi garis regresi pada tiap transek (Zar, 1999). LSE mengukur rata-rata simpangan garis pantai terhadap garis regresi model *linear*. Nilai R^2 mengukur proporsi variasi posisi garis pantai yang dapat dijelaskan oleh model linear dan LCI menyatakan batas ketidakpastian nilai LRR pada tingkat kepercayaan tertentu. Ketiganya bersumber dari residual yang sama, semakin besar simpangan (*error*) antar garis pantai pada suatu transek, semakin besar nilai LSE dan LCI yang dihasilkan, serta semakin kecil nilai R^2 yang diperoleh, dan sebaliknya. Nilai LCI besar dan R^2 kecil artinya secara statistik nilai LRR menunjukkan ketidakpastian yang cukup besar sehingga tren yang teramati belum dapat dianggap signifikan secara statistik. Sebaliknya, nilai LCI kecil dan R^2 mendekati 1, maka tren yang diamati dapat dianggap signifikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perubahan Garis Pantai Historis (2016–2025)

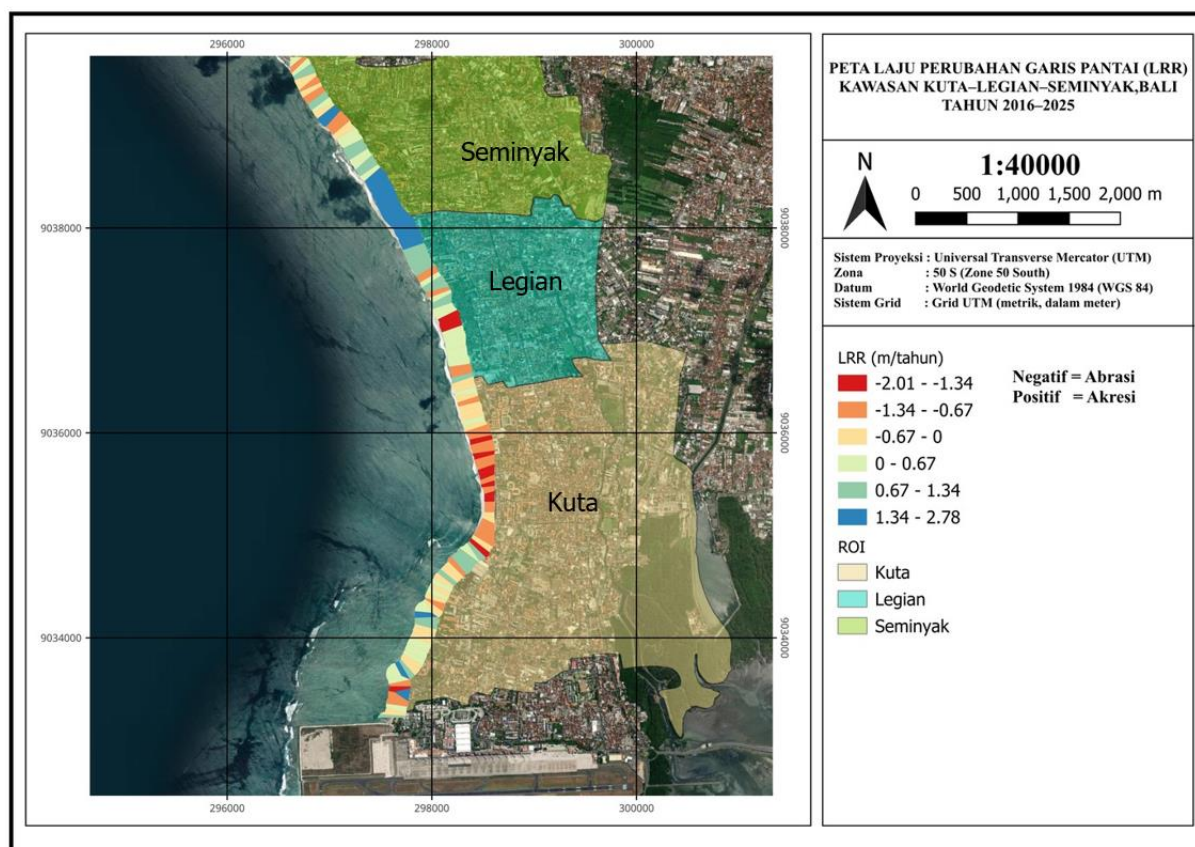
Analisis QSCAT terhadap 114 transek menunjukkan kondisi garis pantai Kuta–Legian–Seminyak secara agregat stabil hingga mengalami akresi ringan, dengan EPR rata-rata +0,445 m/tahun dan NSM rata-rata +4,112 m (Tabel 1). Namun, nilai LRR rata-rata −0,064 m/tahun dan nilai ini mengindikasikan kecenderungan abrasi ringan pada skala jangka panjang. Perhitungan LRR berdasarkan dari 10 garis pantai dan tidak hanya garis pantai awal dan akhir. Perbedaan arah antara EPR dan LRR ini menegaskan pentingnya penggunaan metode regresi multi-tahun untuk menangkap tren yang tidak selalu konsisten dengan perbandingan dua titik waktu saja (Himmelstoss dkk., 2021).

Hasil analisis perubahan garis pantai untuk ketiga segmen disajikan pada Tabel 1 dan Visual perubahan garis pantai di setiap segmennya ditunjukkan di Gambar 4. Secara kuantitatif, nilai Linear Regression Rate (LRR) menunjukkan bahwa Segmen Legian memiliki laju abrasi tertinggi (−0,959 m/tahun), diikuti oleh Kuta (−0,128 m/tahun), sementara Seminyak menunjukkan tren akresi (+0,322 m/tahun). Berdasarkan proporsi spasial, 55% dari total 114 transek menunjukkan kecenderungan mundur (LRR negatif), dengan dominasi tertinggi di Legian (93%) dan Kuta (60%).

Tabel 1. Ringkasan Hasil Analisis Per Segmen

Segmen	Jumlah transek total (n)	EPR (m/th)	NSM (m)	LRR (m/th)	R ²	LCI (±m/th)	Transek LRR Negatif (n)
Kuta	55	+0,331	+3,061	−0,128	0,133	3,859	33/55
Legian	15	−0,319	−2,948	−0,959	0,113	4,607	14/15
Seminyak	44	+0,847	+7,833	+0,322	0,066	5,476	16/44
Total	114	+0,445	+4,112	−0,064	0,105	4,582	63/114

Kolom LCI pada Tabel 1 menunjukkan nilai cukup besar, dan R² sangat kecil mendekati nol. Hasil ini menunjukkan bahwa tidak ada satupun segmen yang memiliki tren perubahan garis pantai signifikan. Akan tetapi, meskipun nilai LRR secara statistik memiliki ketidakpastian sangat besar, angka-angka yang dihasilkan dari perhitungan secara matematis benar. Besarnya nilai ketidakpastian ini menyebabkan lemahnya trend LRR yang dibangun berdasarkan data tahun 2016-2025, sehingga nilai LRR ini belum tentu akan terus berlanjut di masa depan. Maka nilai input ini bisa saja digunakan untuk prediksi ke masa depan, akan tetapi hanya berupa skenario kemungkinan (*possibility scenario*).



Gambar 4. Peta Sebaran Perubahan Garis Pantai Tahun 2016–2025

Gambar 4 menunjukkan visual laju perubahan garis pantai, proses erosi dan deposisi di setiap segmen area kajian. Secara spasial, laju tersebut menunjukkan pola erosi dan deposisi yang bervariasi antar segmen. Segmen Legian sebelah selatan teridentifikasi sebagai area dengan tingkat erosi tertinggi, yang ditunjukkan oleh dominasi warna merah dan jingga (LRR -0,67 hingga -2,01 m/tahun). Sedangkan, di sebelah utara segmen Legian menunjukkan sedimentasi antara 1,34–2,78 m/tahun. Di sisi lain, Segmen Seminyak menunjukkan pola yang beragam. Bagian selatan Seminyak (perbatasan dengan Legian) didominasi oleh deposisi (warna hijau dan biru), sementara bagian utaranya didominasi oleh erosi (warna kuning dan jingga), dengan erosi tertinggi mencapai LRR -0,67 hingga -1,34 m/tahun. Segmen Kuta menunjukkan erosi yang relatif merata di sepanjang segmen, dengan intensitas bervariasi dari

rendah hingga sangat tinggi. Tidak terlihat pola deposisi yang signifikan di segmen ini, kecuali beberapa titik kecil di bagian utara perbatasan Legian.

Meskipun hasil penelitian saat ini menunjukkan trend LRR tidak signifikan secara statistik, akan tetapi nilai perhitungan matematisnya benar. Hasil ini didukung penelitian-penelitian terdahulu, diantaranya penelitian oleh Makfiya dkk. (2020) menggunakan model numerik (*one-line model*) untuk memprediksi perubahan garis pantai di Kecamatan Kuta. Temuan utama mereka adalah laju perubahan abrasi (LRR) berkisar antara 1 hingga 2 meter per tahun. Studi ini secara spesifik menyebutkan bahwa pantai di Legian dan Seminyak yang tidak memiliki perlindungan (seperti pemecah gelombang) menunjukkan perubahan yang tergolong sedang hingga besar. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian saat ini yang menunjukkan area Legian memiliki proporsi abrasi tertinggi (93% transek) dan laju LRR hingga $-0,959$ m/tahun, mendekati 1. Selanjutnya, Rahmawati dkk. (2021) menganalisis perubahan garis pantai di Bali Selatan (termasuk Kuta) dari tahun 2004 hingga 2021. Mereka menemukan bahwa tingkat kemunduran garis pantai di Kuta, Sanur, dan Nusa Dua di bawah $1,0$ m/tahun dengan nilai maksimum $0,39$ m/tahun. Nilai inipun cukup dekat dengan nilai rata-rata LRR pada penelitian ini, yaitu di Kuta ($-0,128$ m/tahun) dan Legian ($-0,959$ m/tahun). Studi mereka juga menekankan bahwa perubahan garis pantai sangat dinamis dan dipengaruhi oleh struktur pantai (seperti groin) yang dapat menyebabkan akresi di satu sisi dan erosi di sisi lainnya. Penelitian lainnya oleh Purba dkk. (2025), menggunakan citra Landsat 8 dan metode LRR periode 2014–2022, melaporkan bahwa kawasan Kuta secara umum didominasi akresi ringan (rata-rata $+1,50$ m/tahun) dengan erosi ringan pada sebagian area (rata-rata $-1,30$ m/tahun), konsisten dengan temuan penelitian ini bahwa Kuta dan Seminyak secara umum lebih stabil dibandingkan Legian. Chandra dkk. (2024), menggunakan metode DSAS dengan citra Landsat periode 2004–2024, juga melaporkan bahwa sebagian besar pesisir Kuta–Seminyak–Legian mengalami abrasi yang memerlukan tindak lanjut mitigasi, memperkuat rekomendasi penelitian ini. Selain itu data pemerintah daerah setempat yang didokumentasikan oleh Prasetyo (2020) menunjukkan bahwa antara tahun 1972–2020, erosi di wilayah Kuta terjadi dengan laju rata-rata 46 cm/tahun. Hasil-hasil penelitian terdahulu ini konteks historis bahwa abrasi memang sudah menjadi masalah sejak lama dan konsisten dengan tren jangka panjang di lokasi Pantai Legian.

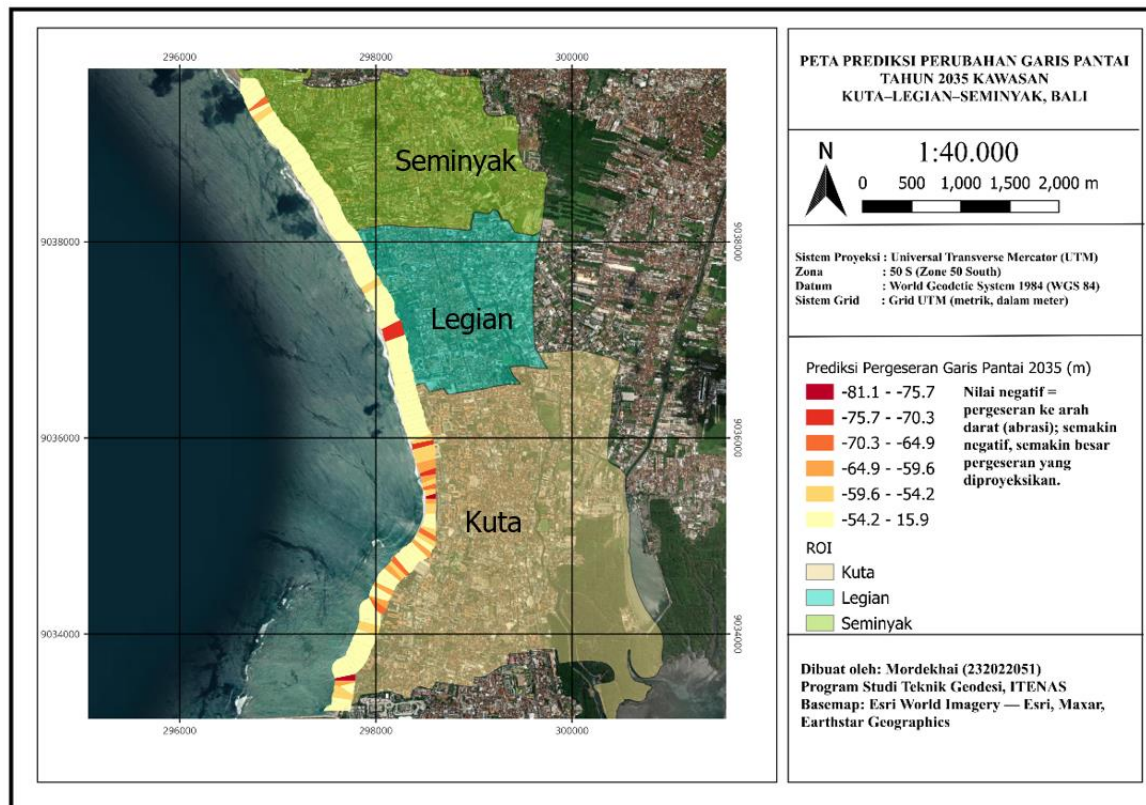
Selain itu tingginya nilai ketidakpastian pada trend LRR dapat diartikan juga sebagai keterbatasan metode statistik yang digunakan pada perhitungan perubahan garis pantai di modul QSCAT. Diketahui bahwa perubahan garis pantai secara alami sangat jarang bersifat linear sempurna, sehingga nilai R^2 yang sangat rendah ($0,066 - 0,133$) dalam penelitian ini mengindikasikan bahwa model regresi linear (garis lurus) mungkin tidak tepat untuk merepresentasikan dinamika pantai di area kajian. Terdapat kemungkinan bahwa perubahan garis pantai di area kajian saat ini dipengaruhi oleh berbagai faktor kejadian yang berulang secara periodik dalam siklus waktu tertentu atau kejadian secara tiba-tiba, sporadis, tidak teratur, dan tidak memiliki interval waktu yang tetap. Penelitian oleh Makfiya dkk. (2020) yang menganalisis perubahan garis pantai di Kecamatan Kuta dengan pemodelan numerik (*one-line model*) menunjukkan bahwa keberadaan atau ketiadaan struktur pelindung pantai mempengaruhi perubahan garis pantai di wilayah tersebut. Keberadaan atau ketiadaan struktur pelindung pantai dalam penelitian tersebut dapat dikategorikan sebagai kejadian tiba-tiba yang merupakan intervensi antropogenik secara lokal. Pembahasan detail keterbatasan model ini tidak mencakup dalam penelitian saat ini.

3.2. Prediksi Perubahan Garis Pantai 2035

Berdasarkan hasil prediksi menggunakan modul *Forecasting* QSCAT dengan algoritma Kalman Filter, diperkirakan pada tahun 2035 seluruh segmen pantai akan mengalami abrasi (Gambar 5), dengan nilai prediksi berkisar antara $-32,46$ meter (Seminyak) hingga $-54,16$ meter (Legian), dan rata-rata keseluruhan sebesar $-41,59$ meter (Tabel 2). Segmen Legian diprediksi mengalami pergeseran mundur terbesar, yang konsisten dengan kecenderungan abrasi tertinggi yang teramati secara spasial dalam data historis (Muskananfola dkk., 2020; Muhammad & Mardiatno, 2023).

Tabel 2. Prediksi Pergeseran Garis Pantai per Segmen Tahun 2035

Segmen	Prediksi (m)	Ketidakpastian ($\pm$ m)
Kuta	-45,450	54,810
Legian	-54,160	59,440
Seminyak	-32,460	64,650
Total	-41,590	59,220



Gambar 5. Peta Prediksi Perubahan Garis Pantai di Tahun 2035

Meskipun hasil prediksi menunjukkan abrasi, akan tetapi dengan rentang ketidakpastian yang sangat lebar berarti skenario akresi juga masih mungkin terjadi. Sehingga, hasil prediksi ini lebih tepat diinterpretasikan sebagai skenario eksploratif (*exploratory scenario*) atau proyeksi tentatif yang menggambarkan kemungkinan arah perubahan apabila tren historis berlanjut tanpa perubahan signifikan. Hasil ini tidak dapat dianggap sebagai prediksi pasti (*deterministic prediction*) yang dapat diandalkan untuk perencanaan teknis detail.

Kondisi hasil ini sejalan dengan karakteristik data yang digunakan dari periode pengamatan 10 tahun (2016–2025), dimana waktu pengamatan berada pada batas kategori jangka pendek hingga menengah menurut Crowell dkk. (1993). Sehingga, nilai R^2 untuk seluruh segmen masih sangat rendah (0,066–0,133), yang berarti hanya 6,6 sampai 13,3 persen variasi posisi garis pantai dapat dijelaskan oleh model regresi linear. Untuk meningkatkan akurasi dan mengurangi ketidakpastian prediksi di masa mendatang, disarankan melakukan pemantauan berkala dengan penambahan data tahunan. Hal ini sejalan dengan temuan Chen dkk. (2025) di Pantai Hasaki, Jepang, yang menunjukkan bahwa kalibrasi model dengan data frekuensi tinggi selama periode kalibrasi 20 tahun mampu menangkap peristiwa ekstrem dengan lebih baik dibandingkan pendekatan parameter tetap (*stationary*). Selain itu, disarankan pula menjajaki pendekatan analisis non-linear, seperti *polynomial regression* atau *smoothing spline*, yang berpotensi lebih mampu menangkap pola fluktuatif dari dinamika garis pantai.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini memodelkan perubahan garis pantai periode tahun 2016–2025 dan prediksinya di tahun 2035. Hasil analisis 114 transek pada kawasan Kuta–Legian–Seminyak periode 2016–2025 menunjukkan kondisi agregat yang stabil hingga sedikit positif (EPR +0,445 m/tahun), namun segmen Legian secara konsisten menunjukkan tren abrasi (LRR –0,959 m/tahun) yang berbeda dari kedua segmen tetangganya meskipun menghadapi paparan gelombang dan iklim yang relatif seragam. Pemodelan Kalman Filter memproyeksikan 113 dari 114 transek akan mengalami abrasi pada tahun 2035, dengan segmen Legian diproyeksikan mengalami pergeseran terbesar (–54,16 m). Temuan ini menempatkan segmen Legian sebagai prioritas utama dalam perencanaan mitigasi abrasi di kawasan tersebut. Penelitian selanjutnya disarankan memperpanjang periode pengamatan seiring bertambahnya ketersediaan citra Sentinel-2, serta melakukan verifikasi lapangan untuk mengonfirmasi faktor-faktor lokal yang menyebabkan perbedaan tren antar segmen yang bersebelahan.

DAFTAR RUJUKAN

- BPS Bali. (2023). Perkembangan Pariwisata Provinsi Bali Desember 2023. *Berita Resmi Statistik*. <https://bali.bps.go.id/id/pressrelease/2024/02/01/717890/perkembangan-pariwisata-provinsi-bali-desember-2023.html>
- Bryan, A., Sunarta, I. N., & Suryawan, I. B. (2025). Evaluasi implementasi mitigasi kebencanaan di daya tarik wisata Pantai SAMIGITA, Bali. *Jurnal Destinasi Pariwisata*, 13(1), 282–294.
- Chandra, M. A. P. M., Putra, D. N. C. A., Baskara, I. G. M. D., IDS, R. A., Saptawan, I. K. D., Putra, I. B. P. M. R., & Aditya, M. (2024). Pemetaan abrasi dan akresi pesisir pantai dengan metode Digital Shoreline Analysis System. Studi kasus: Kawasan wisata Pantai Kuta, Kabupaten Badung, Bali. *Prosiding Seminar Nasional Ketekniksipilan Bidang Vokasional*, 3, 821–829.
- Chen, X., Banno, M., & Mori, N. (2025). Equilibrium shoreline change model with non-stationary free parameters at Hasaki Beach, Japan. *Coastal Engineering*, 200, 104761. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2025.104761>
- Crowell, M., Leatherman, S. P., & Buckley, M. K. (1993). Shoreline change rate analysis: long term versus short term data. *Shore and Beach*, 61(2), 13–20.
- Facun, L. P., Sta Maria, M. Y., Ducao, R., Clemente, J. J., Carmelo, E. M., Maon, A., Malaya, A. R., Cuison, F., & Siringan, F. (2025). QGIS Shoreline Change Analysis Tool (QSCAT): A fast, open-source shoreline change analysis plugin for QGIS. *Environmental Modelling and Software*, 184, 106263 <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106263>
- Hastuti, A. W., Nagai, M., & Suniada, K. I. (2022). Coastal vulnerability assessment of Bali Province, Indonesia using remote sensing and GIS approaches. *Remote Sensing*, 14(17), 4409. <https://doi.org/10.3390/rs14174409>
- Hastuti, A. W., Nagai, M., Ismail, N. P., Priyono, B., Suniada, K. I., & Wijaya, A. (2024). Spatiotemporal analysis of shoreline change trends and adaptation in Bali Province, Indonesia. *Regional Studies in Marine Science*, 76, 103598. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103598>
- Himmelstoss, E. A., Farris, A. S., Henderson, R. E., Zichichi, J. L., Kratzmann, M. G., Ergul, A., Vallee, L. A., & Thieler, E. R. (2021). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide* (Open-File Report No. 2021-1091). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20211091>
- Laksono, F. A. T., Borzì, L., Distefano, S., Di Stefano, A., & Kovács, J. (2022). Shoreline prediction modelling as a base tool for coastal management: The Catania Plain case study (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1988. <https://doi.org/10.3390/jmse10121988>
- Long, J. W., & Plant, N. G. (2012). Extended Kalman filter framework for forecasting shoreline evolution. *Geophysical Research Letters*, 39(13), L13603. <https://doi.org/10.1029/2012GL052180>
- Makfiya, N., Siladharma, IGB., & Karang, I. W. G. A. (2020). Analisis perubahan garis pantai dengan menggunakan metode one-line model (Studi kasus: Pantai Kecamatan Kuta, Bali). *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 6(2), 196–204. <https://doi.org/10.24843/jmas.2020.v06.i02.p6>

- Muhammad, D. T. N., & Mardiatno, D. (2023). Dinamika garis pantai Pulau Karimunjawa dan Kemajuan tahun 2000–2030. *Journal of Marine Research*, 12(3), 351–363. <https://doi.org/10.14710/jmr.v12i3.32269>
- Muskananfola, M. R., Supriharyono, & Febrianto, S. (2020). Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. *Regional Studies in Marine Science*, 34, 101060. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101060>
- Prasetyo, H. (2020). Bali's Kuta Beach faces 'grave' erosion. Earth Journalism Network. <https://earthjournalism.net/stories/balis-kuta-beach-faces-grave-erosion>
- Purba, S., Baskoro, W. T., Gunawan, T., Artawan, I. N., Adnyana, I. G. A. P., & Sandi, I. N. (2025). Analisis perubahan garis pantai menggunakan citra satelit Landsat 8 dengan metode Linear Regression Rate di wilayah pesisir Kecamatan Kuta. *Kappa Journal*, 9(2), 177–183. <https://doi.org/10.29408/kpj.v9i2.29955>
- Rahmawati, R. R., Putro, A. H. S., & Lee, J. L. (2021). Analysis of long-term shoreline observations in the vicinity of coastal structures: A case study of South Bali beaches. *Water*, 13(24), 3527. <https://doi.org/10.3390/w13243527>
- Sabina, A., Yulius, Agus, S. B., Salim, H. L., Dillenia, I., Arifin, T., Prihantono, J., Purbani, D., Heriati, A., Ramdhan, M., Suryawati, S. H., Wahyono, A., Wisna, U. J., & Zulfiandi. (2024). GIS-based estimation of shoreline change at the Olie Pier Harbor Heritage Site, Manggar, East Belitung, Indonesia. *Geo Journal of Tourism and Geosites*, 53(2), 431–441. <https://doi.org/10.30892/gtg.53206-1218>
- Safitri, K., & Arief, T. M. V. (2026). Penanganan abrasi pesisir Bali membutuhkan anggaran Rp 4 triliun. *Koranmanado.co.id*. <https://www.koranmanado.co.id/penanganan-abrasi-pesisir-bali-butuh-anggaran>
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2009). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change* (Open-File Report No. 2008-1278). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20081278>
- Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>
- Zar, J. (1999). *Biostatistical analysis* (4th ed.). Prentice-Hall.USA