Prediksi Algal Bloom di Teluk Jakarta Menggunakan Deep Learning

PPMI FITB 2026

Susanna Nurdjaman[1], Hanif Diastomo[1], Dayu Wiyati Purnaningtyas[1], Feri Saputra [1], Fauzan Pratama [1], Dimas Rama Dhinata [1], Hudzaifah [1]

[1] Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung

Latar Belakang

Teluk Jakarta rentan terhadap algal bloom akibat pasokan hara dari daratan, sehingga memerlukan sistem peringatan dini yang proaktif.

Penanganan algal bloom selama ini dilakukan setelah kejadian berlangsung dan dampak ekologis sudah muncul, sehingga kurang efektif untuk peringatan dini. Klorofil-a dipakai sebagai proksi algal bloom: di Teluk Jakarta umumnya 2–5 mg/m³, sedangkan saat bloom berada di atas 10 mg/m³.

Satelit orbit polar hanya memberi cakupan setiap beberapa hari, sehingga fase awal bloom sulit tertangkap. Satelit geostasioner Himawari-8/9 (sensor AHI, 16 kanal spektral, pemindaian full-disk setiap 10 menit) memungkinkan pemantauan klorofil-a harian.

Arsitektur bidirectional stacked LSTM (BS-LSTM) dipilih karena mampu mempelajari pola temporal non-linier secara otomatis dan mengatasi masalah vanishing gradient.

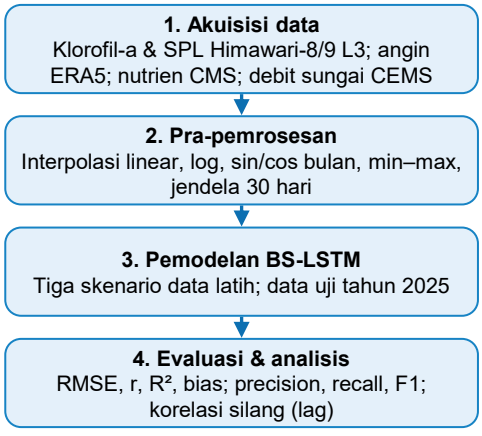
Kata kunci: Teluk Jakarta, klorofil-a, algal bloom, Himawari-8/9, LSTM, deep learning.

Tujuan & Ruang Lingkup

Memprediksi algal bloom di Teluk Jakarta dan mengkaji faktor lingkungan yang berasosiasi dengan kejadiannya.

1. Memprediksi algal bloom di Teluk Jakarta dengan deep learning berbasis bidirectional stacked long short-term memory (BS-LSTM).
2. Mengkaji kondisi klorofil-a, suhu permukaan laut (SPL), kecepatan angin, nutrien (fosfat dan nitrat), serta debit sungai saat algal bloom.

Cakupan: 28 stasiun (zonasi A–E, dari offshore hingga inner bay) dengan data harian 2020–2025. Bloom didefinisikan sebagai klorofil-a ≥ 10 mg/m³ untuk analisis regional dan ambang dinamis 3–10 mg/m³ per stasiun untuk sistem peringatan dini.

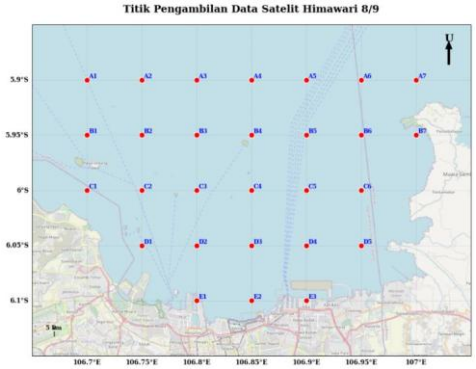


Gambar 1. Alur penelitian

Data & Metode

Data harian Himawari-8/9 Level-3 periode 2020–2025 pada 28 stasiun diolah dengan model BS-LSTM.

Klorofil-a dan SPL diunduh otomatis dari server FTP JAXA; kecepatan angin dari ERA5; fosfat dan nitrat dari Copernicus Marine Service (CMS); debit sungai dari Copernicus Emergency Management Service (CEMS). Validasi dilakukan terhadap citra MODIS dan pengukuran lapangan pada 24–25 April 2026.

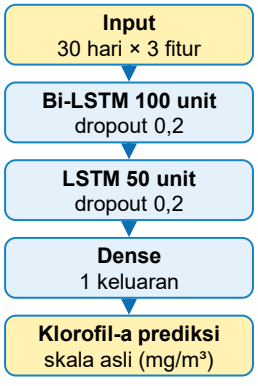


Gambar 2. Titik pengambilan data satelit (28 stasiun, zonasi A–E)

Pra-pemrosesan: celah akibat awan diisi dengan interpolasi linear, klorofil-a ditransformasi logaritma, waktu dikodekan sinusoidal (sin dan cos bulan), lalu seluruh fitur dinormalisasi min–max. Masukan model berupa jendela 30 hari dengan 3 fitur (chl-a log, month_sin, month_cos).

Data dibagi secara kronologis dan diuji pada tahun 2025 dengan tiga skenario data latih: 3 tahun (2022–2024), 4 tahun (2021–2024), dan 5 tahun (2020–2024).

Kinerja prediksi dinilai dengan RMSE, korelasi (r), R^2, dan bias; deteksi bloom dengan precision, recall, dan F1-score. Hubungan faktor lingkungan dianalisis dengan cross-correlation function (CCF) untuk menentukan jeda waktu (lag) terbaik ($p < 0,05$).



Pelatihan

Adam, learning rate 0,001

Huber loss

Batch 64, maks. 200 epoch

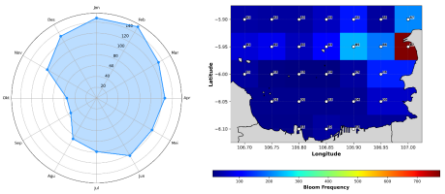
Early stopping dan ReduceLR

Gambar 3. Arsitektur BS-LSTM dan konfigurasi pelatihan

Hasil & Pembahasan

Bloom bersifat musiman (puncak Februari dan Juni); BS-LSTM mengikuti pola umum klorofil-a.

Puncak Februari berkaitan dengan musim hujan dan debit sungai tinggi; puncak Juni dengan perairan stabil dan penetrasi cahaya meningkat. Bloom didominasi kategori low risk (10–20 mg/m³). Stasiun B7 (outer bay timur, delta Citarum) paling sering mengalami bloom: 777 hari pada 2020–2025, dengan durasi beruntun rata-rata 1–1,5 hari dan maksimum 11 hari yang berpotensi meningkatkan risiko hipoksia. Korelasi spasial klorofil-a tertinggi pada inner bay–nearshore (r = 0,68), terendah pada inner bay–outer bay (r = 0,22).



Gambar 4. Bloom: (a) bulanan, (b) per stasiun

Skenario 3 (data latih 5 tahun) terbaik tanpa indikasi overfitting, namun prediksi cenderung underestimate dan menghaluskan nilai ekstrem; performa spasial terbaik di offshore barat. Untuk peringatan dini di B7: precision 0,72; recall 0,247; F1-score 0,367, masih dibatasi ketidakseimbangan data.

Tabel 1. Kinerja global model (RMSE: mg/m³)

Data latih	3 tahun	4 tahun	5 tahun
r	0,356	0,362	**0,367**
R^2	0,105	0,116	**0,122**
RMSE	1,566	1,549	**1,546**
Bias	−0,339	−0,291	**−0,285**

Pemicu di B7 (2020). Februari: klorofil-a naik bersama debit Citarum (r = 0,43; lag 10 hari) dan fosfat (r = 0,78; lag 3 hari); SPL berkorelasi negatif (r = −0,75; lag 6 hari) akibat masuknya air tawar. Oktober: nitrat (r = 0,49; lag 10 hari) mengawali bloom, angin (r = 0,46; lag 4 hari) mengangkut air kaya nutrien, lalu SPL menghangat (r = 0,45; lag 2 hari) dan menstabilkan kolom air.

Kesimpulan & Saran

BS-LSTM berpotensi mendukung pemantauan perairan pesisir Teluk Jakarta yang lebih proaktif.

1. Skenario 3 (data latih 5 tahun) terbaik: r = 0,367; RMSE = 1,546 mg/m³; bias = −0,285.
2. Bloom bersifat musiman dan umumnya low risk; B7 menjadi hotspot.
3. Pemicu di B7: nutrien dan debit Citarum (Februari), angin dan kenaikan SPL (Oktober).

Saran: data balancing, LSTM multivariat dengan variabel tambahan, dan model hibrida CNN-LSTM untuk hubungan spasial antarstasiun.