



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

LAPORAN DISERTASI

ANALISIS FENOLOGI DAN PREDIKSI *WATER STRESS* LAHAN TEBU MENGGUNAKAN *RANDOM FOREST REGRESSOR* DENGAN DATA MULTI INDEKS VEGETASI

ARIES SUHARSO



PROGRAM STUDI ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Analisis Fenologi dan Prediksi *Water Stress* Lahan Tebu Menggunakan *Random Forest Regressor* dengan Data Multi Indeks Vegetasi” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini. Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2025

Aries Suharso
G661190121

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

ARIES SUHARSO. Analisis Fenologi dan Prediksi *Water Stress* Lahan Tebu Menggunakan *Random Forest Regressor* dengan Data Multi Indeks Vegetasi. Dibimbing oleh YENI HERDIYENI, SURIA DARMA TARIGAN dan YANDRA ARKEMAN.

Tanaman tebu (*Saccharum spp.*) merupakan komoditas strategis di Indonesia yang rentan terhadap cekaman air, khususnya pada lahan tadah hujan. Penelitian ini menganalisis dinamika fenologi dan mengembangkan model prediksi *Crop Water Stress Index* (CWSI) berbasis integrasi multi-indeks vegetasi *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Difference Water Index* (NDWI), *Normalized Difference Drought Index* (NDDI), *Land Surface Water Index* (LSWI), *Optimized Soil Adjusted Vegetation Index* (OSAVI) dengan variabel cuaca harian menggunakan algoritma *Random Forest Regressor* (RFR). Data berasal dari citra Landsat 8 dan data meteorologis BMKG periode 2021–2023, melalui tahapan pra-pemrosesan, pemulusan harmonik, serta konstruksi fitur berbasis *lag time* dan *rolling mean*.

Evaluasi sepuluh skema kombinasi fitur menunjukkan kinerja terbaik pada model gabungan indeks vegetasi dan cuaca dengan *lag_cws* tanpa *Land Surface Temperature* (LST), menghasilkan R^2 sebesar 91,01% dan MAPE 9,08%. Meski akurasi turun $\pm 6\%$ dibanding model berbasis LST, pendekatan ini tetap efektif dan praktis mengingat keterbatasan data LST di wilayah tropis.

Analisis *SHapley Additive exPlanations* (SHAP) mengidentifikasi fitur penting LSWI, NDWI, NDDI, NDVI, OSAVI, curah hujan, lama penyinaran, dan kelembapan relatif sebagai kontributor utama. Fitur *lag* dan *rolling mean* memperkuat prediksi pola *water stres* musiman pada lahan tebu, sehingga temuan ini berpotensi mendukung keputusan agronomis dan sistem pemantauan stres air berbasis *spasial-temporal*.

Kata kunci: fenologi *water stress* tebu, fitur penting, indeks spektral Landsat 8, *Random Forest Regressor*

SUMMARY

ARIES SUHARSO. Phenological Analysis and Prediction of Sugarcane Water Stress Using Random Forest Regressor with Multi Vegetation Index Data. Supervised by YENI HERDIYENI, SURIA DARMA TARIGAN and YANDRA ARKEMAN.

Sugarcane (*Saccharum spp.*) is a strategic commodity in Indonesia that is vulnerable to water stress, particularly on rainfed land. This study analyzes phenological dynamics and develops a Crop Water Stress Index (CWSI) prediction model based on the integration of multi-vegetation indices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Normalized Difference Drought Index (NDDI), Land Surface Water Index (LSWI), Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI), and daily weather variables using the Random Forest Regressor (RFR) algorithm. Data comes from Landsat 8 imagery and BMKG meteorological data for the 2021–2023 period, through preprocessing, harmonic smoothing, and feature construction based on lag time and rolling mean.

Evaluation of ten feature combination schemes demonstrated the best performance in the combined vegetation and climate index model with lag_cwsi without Land Surface Temperature (LST), resulting in an R^2 of 91.01% and a MAPE of 9.08%. Although accuracy decreased by $\pm 6\%$ compared to LST-based models, this approach remains effective and practical given the limited LST data available in tropical regions.

SHapley Additive exPlanations (SHAP) analysis identified key features: LSWI, NDWI, NDDI, NDVI, OSAVI, rainfall, solar radiation duration, and relative humidity as key contributors. The lag and rolling mean features strengthen the prediction of seasonal water stress patterns in sugarcane fields, potentially supporting agronomic decisions and spatio-temporal water stress monitoring systems.

Keywords: important features, Landsat 8 spectral index, Random Forest Regressor, Sugarcane water stress phenology,



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025¹
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



ANALISIS FENOLOGI DAN PREDIKSI *WATER STRESS* LAHAN TEBU MENGGUNAKAN *RANDOM FOREST REGRESSOR* DENGAN DATA MULTI INDEKS VEGETASI

ARIES SUHARSO

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor pada
Program Studi Ilmu Komputer

**PROGRAM STUDI ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom
- 2 Prof. Dr. Sulistyo Sidik Purnomo, Ir., M.Si.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom
- 2 Prof. Dr. Sulistyo Sidik Purnomo, Ir., M.Si.

Judul Disertasi : Analisis Fenologi dan Prediksi *Water Stress* Lahan Tebu Menggunakan *Random Forest Regressor* dengan Data Multi Indeks Vegetasi

Nama : Aries Suharso, S.Si., M.Kom
NIM : G661190121

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Yeni Hedriyeni, S.Si., M.Kom



Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Suria Darma Tarigan, M.Sc



Pembimbing 3:
Prof. Dr. Ir. Yandra Arkeman, M.Eng



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom
NIP 197501301998022001



Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika
Prof. Dr. Ir. Agus Bueno, M.Si., M.Kom
NIP 196607021993021001



Tanggal Ujian:
18 Juni 2025

Tanggal Lulus:



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga Disertasi yang berjudul “*Analisis Fenologi dan Prediksi Water Stress Lahan Tebu Menggunakan Random Forest Regressor dengan Data Multi Indeks Vegetasi*” ini dapat terselesaikan dengan baik. Penelitian ini merupakan bidang *Computer Intelligent and Optimalization* yang dilaksanakan sejak bulan Januari 2022 sampai bulan Mei 2025.

Ucapan Terima kasih penulis sampaikan kepada para pihak yang telah berkontribusi selama penelitian ini:

1. Kedua orang tua, mediang Almarhum (Ayah) Emid Supriadi, (Ibu) Komariah, (Kakak) Agus Ridwan Zani, Ika Zani Priadi (Alm), Dony Richard, (Adik) Dewi Hajjar, Bukit Mariadi serta seluruh saudara dan keluarga.
2. Khusus untuk Koesrini (istri), Shalwa Nuansa Apsarini dan Gadiza Raisyanissa (anak-anakku) yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayang penuh kehangatan selama proses menempuh studi S3 ini.
3. Prof. Dr. Yeni Hedriyeni, S.Si., M.Kom, Prof. Dr. Ir. Suria Darma Tarigan, M.Sc, dan Prof. Dr. Ir. Yandra Arkeman, M.Eng yang telah membimbing, mengarahkan dan memberikan saran nasihat serta pencerahan dengan penuh kesabaran selama proses penelitian dan penyusunan disertasi ini.
4. Penguji luar komisi pembimbing pada ujian tertutup dan sidang promosi, Ibu Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom dan Bapak Prof. Dr. Ir., Sulistyono Sidik Purnomo, M.Si. yang telah memberikan masukan dan saran dalam perbaikan disertasi penelitian ini.
5. Rektor IPB University, Sekolah Pascasarjana IPB, Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika dan Ketua Program Studi Pascasarjana Doktorat Ilmu Komputer yang telah memberikan layanan administrasi dan fasilitas pengajaran prima dengan sangat baik selama menempuh studi ini.
6. Rektor Universitas Singaperbangsa Karawang dan Dekan Fakultas Ilmu Komputer beserta jajarannya yang telah memberikan kesempatan serta dukungan penuh dalam menempuh studi Doctoral ini.
7. Pimpinan Puslit Gula PTPN X Jengkol Kediri Jawa Timur yang telah memberi izin penelitian, beserta staf Laboratorium pak Ashari, pak Yandi dan pak Rendi dari Pihak HGU yang telah membantu selama proses pengumpulan data dalam studi ini.
8. Para Reviewer paper publikasi di *International Journal Computer Science* IAENG dan Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi) yang telah menerima hasil karya ilmiah dari penelitian ini.
9. Ketua STMIK IKMI Cirebon, Bapak Assoc. Prof. Dr. Dadang Sudrajat, S.Si., M.Kom beserta jajarannya atas dukungannya berupa pelatihan penulisan disertasi yang baik.
10. Rekan-rekan sejawat dosen dan tenaga kependidikan tempat penulis bekerja di Fakultas Ilmu Komputer Universitas Singaperbangsa Karawang yang selalu memberikan dukungan motivasi.
11. Teman-teman kuliah S3 Program Studi Ilmu Komputer khususnya angkatan 2019 yang telah bersama-sama berjuang menimba ilmu dan saling memotivasi selama studi.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Tak cipta mntk IPB University

12. Teman-teman bimbingan S1, S2, dan S3 yang telah berbagi ilmu dan saling memberikan semangat mental selama menyelesaikan studi ini.
13. Teman-teman Alumni SMAN 1 Karawang, Teman kuliah S1 Matematika Unpad 95, Teman kuliah S2 STMIK Nusa Mandiri Jakarta yang memberikan semangat untuk terus lanjut studi hingga ke jenjang S3 ini.
14. Para Guru SMA dan Dosen semasa kuliah penulis di S1 dan S2 yang secara tidak langsung menjadi motivasi penulis untuk lanjut studi S3 ini.
15. Para mahasiswa wali dan bimbingan penulis di Prodi Informatika Fakultas Ilmu Komputer Universitas Singaperbangsa Karawang.
16. Pak Tono dan Bu Suci yang telah berkenan menerima penulis tinggal bermukim selama proses pengumpulan data lapangan di Puslit Gula Jengkol Plosok Klaten Kediri Jawa Timur.
17. Ketua dan Pengurus DKM Nurul Hikmah dan Teman-teman pengajian Yayasan Cahaya Ilahi Perumahan Gading Elok 2 Warungbambu Karawang atas dukungan dan do'a penyemangat untuk tetap istiqomah menyelesaikan studi ini.
18. Serta Sahabat handai taulan yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang secara langsung maupun tidak langsung turut berkontribusi selama penyelesaian studi dan penyusunan disertasi ini.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari sempurna, namun demikian penulis berharap bahwa tulisan ini dapat bermanfaat bagi pihak-pihak yang membutuhkan bagi studi dan perkembangan kemajuan ilmu pengetahuan. Semoga Allah SWT membalas budi baik para pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian studi ini dan semoga hasil karya ilmiah ini dapat menjadi berkah bagi kehidupan sesama, Aminn.

Bogor, Agustus 2025

Aries Suharso



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vi
DAFTAR ISTILAH	vii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat dan Kontribusi Penelitian	5
1.5 Ruang Lingkup	6
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	7
II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Stres Air pada Tanaman Tebu	8
2.2 Penelitian Terdahulu Terkait Pengukuran Stres Air	12
2.3 Penginderaan Jauh Landsat 8 untuk Prediksi Stres Air	15
2.4 Indeks Vegetasi untuk Prediksi Stres Air Tanaman Tebu	19
2.5 <i>Data Time Series</i>	26
2.6 Imputasi dan Pengisian Kesenjangan	28
2.7 Penghalusan dengan Deret Harmonik	30
2.8 Proses Standarisasi Data	31
2.9 Proses <i>Rolling Windows</i>	31
2.10 Pengujian Kualitas dengan Visualisasi, Validasi	32
2.11 Pembelajaran Mesin	33
2.12 <i>Random Forest Regressor (RFR)</i>	39
2.13 <i>Hyperparameter Random Forest Regressor (RFR)</i>	42
2.14 Metode <i>k-Fold Cross-Validation</i>	44
2.15 Analisis Fitur Penting <i>Shapley Additive exPlanations (SHAP)</i>	46
III METODE	50
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	50
3.2 Metode Penelitian	51
3.3 Tahapan Proses Penelitian	53
3.3.1 Identifikasi Masalah dan Pengumpulan Data	53
3.3.2 Pra-Pemrosesan Data	54
3.3.3 Ekstraksi Fitur Indeks <i>Water Stress</i>	56
3.3.4 Imputasi dan Penghalusan	56
3.3.5 Analisis Fenologi Tebu	57
3.3.6 Pemodelan (<i>model development</i>)	58
3.3.7 Evaluasi dan Pengujian Model	58
3.3.8 Analisis Hasil Pengujian	59
IV ANALISIS FENOLOGI <i>WATER STRESS</i> TEBU	60
4.1 Pendahuluan	60
4.2 Data	64
4.2.1 Peta Lahan Tebu Aktif	65

@Hak cipta milik IPB University



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
@Hak cipta milik IPB University

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang menggunakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

4.2.2	Data Citra Landsat 8	65
4.2.3	Data Jadwal Tanam Tebu	67
4.2.4	Data Meteorologi Lokal	69
4.3	Metode Penelitian	70
4.4	Hasil dan Pembahasan	72
4.4.1	Akuisisi Data	72
4.4.2	Pra-Proses Data Satelit dan Ekstraksi Fitur Vegetasi	72
4.4.3	Koreksi Data Temporal dan Pola Musiman	75
4.4.4	Uji Stasioner	86
4.4.5	Standarisasi	89
4.4.6	Analisis Korelasi <i>Bivariate</i> Indeks Vegetasi	90
4.4.7	Korelasi <i>Bivariate</i> Positif	92
4.4.8	Korelasi <i>Bivariate</i> Negatif	94
4.4.9	Analisis Fenologi <i>Water stress</i> Tebu	97
4.5	Simpulan	108
V	MODEL PREDIKSI <i>WATER STRESS</i> TEBU MENGGUNAKAN <i>RANDOM FOREST REGRESSOR</i>	110
5.1	Pendahuluan	110
5.2	Data	111
5.3	Metode Penelitian	112
5.4	Hasil dan pembahasan	116
5.5	Simpulan	134
VI	PEMBAHASAN UMUM	136
6.1	Analisis perubahan fenologi tanaman tebu	136
6.2	Pengembangan Model Prediksi <i>Water Stress</i> lahan tebu	136
6.3	Analisa Fitur Penting pada Model Prediksi <i>Water Stress</i> Lahan Tebu	138
VII	SIMPULAN DAN SARAN	140
7.1	Kesimpulan	140
7.2	Saran	141
	DAFTAR PUSTAKA	143
	LAMPIRAN	165
	DAFTAR RIWAYAT HIDUP	172



DAFTAR TABEL

1	Karakteristik pita gelombang (<i>band</i>) pada Landsat-8	16
2	<i>Threshold</i> kandungan air kanopi tebu	20
3	<i>Threshold Water Stress</i> tebu	24
4	Kontribusi indeks spektral Landsat 8 terhadap (CWSI)	25
5	Riset terdahulu pembelajaran mesin untuk kekeringan pertanian	34
6	Perbandingan RFC dan RFR	40
7	Deskripsi kelas parameter pada <i>Random Forest Regressor</i>	43
8	Kebutuhan air setiap fase pertumbuhan tebu	64
9	Koleksi Data Landsat 8 bebas awan 30%	66
10	Jadwal masa tanam tebu di area blok G tahun 2019-2023	67
11	Perbandingan realisasi hasil panen tebu	68
12	Jadwal tanam tebu blok G3 periode 2021-2023	69
13	Data Meteorologi lokal dari BMKG Malang 2021-2023	69
14	Ringkasan statistik data <i>time-series</i> NDVI	82
15	Uji Stasioner ADF	87
16	Ringkasan statistik proses standarisasi	89
17	Metrik korelasi <i>bivariate</i> antar fitur indeks spektral	90
18	Rangkuman statistik nilai <i>lag time</i>	99
19	Rangkuman statistik korelasi silang	102
20	Fitur meteorologi baru (<i>lag</i>) dan (<i>rolling mean</i>)	117
21	Skema komposisi <i>dataset</i>	118
22	Penyetelan <i>hyperparameter</i> untuk RFR	120
23	Formasi penyetelan <i>hyperparameter</i> setiap skema	121
24	Kinerja evaluasi model prediksi	122
25	Komparasi skema kelompok tanpa fitur LST	123
26	Interpretasi pohon keputusan	131

DAFTAR GAMBAR

1	Tingkat produksi dan konsumsi gula nasional 2013-2023	1
2	Berbagai pola respon daun tebu	9
3	Dampak vegetatif <i>water stress</i> tanaman tebu	10
4	Perbandingan morfologi akar tebu	11
5	Dampak <i>water stress</i> menularkan penyakit kerdil ratun	12
6	Faktor lingkungan <i>abiotik</i> dan <i>biotik</i> terhadap stres air	13
7	Metode populer mengukur tingkat kondisi <i>water stress</i> tanaman	14
8	Spektrum <i>Band</i> satelit Landsat 8	15
9	Interaksi spektral terhadap respon fisiologi tumbuhan	17
10	Ilustrasi imputasi dengan interpolasi linear dan <i>moving average</i>	29
11	Ilustrasi teknik <i>rolling windows</i> pada data <i>time-series</i>	32
12	Ilustrasi model prediksi <i>Random Forest</i>	41
13	Diagram alir validasi silang	44
14	<i>Split</i> data pada <i>k-fold Cross Validation</i>	45
15	Lokasi penelitian	50
16	Ketinggian dan kemiringan lahan tebu yang diamati	51
17	Alur metode yang diusulkan	52



18	Fase tumbuh tebu	60
19	Varitas unggul tebu Bululawang (BL)	62
20	Tebu varitas PS-882	63
21	Peta Lanskap Lahan Tebu periode 2021-2022	65
22	Tiga kombinasi <i>path/row</i> Landsat 8 melintasi lokasi penelitian	66
23	Alur analisis fenologi <i>water stress</i> tebu	71
24	(a) <i>region of interest</i> (ROI), (b) Pemotongan ROI G33	72
25	Penajaman citra: a) Citra asli, b) Citra <i>Pan-sharp</i>	73
26	Koleksi citra Landsat 8 sebelum diekstraksi fitur	74
27	Data indeks spektral awal sebelum imputasi	76
28	Data indeks spektral awal sebelum imputasi	79
29	Penghalusan dengan filter harmonik	80
30	Pola harmonik indeks spektral	82
31	Pola musiman tebu	83
32	Kemiripan pola musiman tebu fitur indeks spektral	85
33	Pola musiman CWSI aktual, <i>rolling</i> dan <i>stasioner</i>	87
34	Fenologi korelasi positif antar fitur indeks spektral tebu	93
35	Fenologi korelasi negatif antar fitur indeks spektral tebu	95
36	Korelasi silang jeda waktu CWSI dengan fitur indeks spektral	98
37	Korelasi silang jeda waktu CWSI dengan fitur cuaca	102
38	Fenologi Tebu NDWI-CWSI area kebun G30 hingga G36	106
39	Fenologi NDWI, CWSI dan Curah hujan	107
40	Diagram alir pengembangan model prediksi <i>water stress</i>	113
41	Ilustrasi <i>Split time-series cross validation</i>	115
42	Performa model RFR berdasarkan <i>heatmap GridSearchCV</i>	125
43	Kombinasi parameter berdasarkan <i>parallel coordinates</i>	126
44	Performa model prediksi <i>water stress</i> dengan RFR	128
45	<i>Error</i> model prediksi <i>water stress</i> dengan RFR	129
46	Interpretasi pohon keputusan model prediksi	130
47	Fitur penting skema data indeks spektral vegetasi	132
48	Fitur penting skema data cuaca meteorologi	133
49	Fitur penting skema data indeks Gabungan Tanpa LST	134

DAFTAR LAMPIRAN

1	Permohonan Ijin Penelitian IPB	166
2	Pemberian Ijin Penelitian PTPN X	167
3	Koleksi file landsat 8 hasil filter tutupan awan maksimal 30%	168
4	Data cuaca dari Stasiun Geofisika Malang Jawa Timur	170



DAFTAR ISTILAH

Aktivitas <i>antropogenik</i>	istilah yang digunakan untuk menggambarkan segala bentuk intervensi manusia terhadap sistem alam, baik dalam skala lokal maupun global. Aktivitas ini mencakup berbagai sektor seperti pertanian intensif, urbanisasi, deforestasi, industrialisasi, pembakaran bahan bakar fosil, penggunaan bahan kimia sintetis (misalnya pestisida dan pupuk), serta pembangunan infrastruktur. Dampak dari aktivitas antropogenik dapat menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap komponen atmosfer, hidrosfer, litosfer, dan biosfer.
Algoritma	Prosedur untuk menyesuaikan model berdasarkan data.
Algoritma <i>black-box</i>	istilah yang digunakan untuk menggambarkan algoritma atau model yang struktur internalnya tidak diketahui atau tidak dapat dijelaskan secara langsung, tetapi input dan output-nya diketahui. Dalam konteks ini, kita dapat mengamati bagaimana suatu model menghasilkan output dari input, tetapi tidak memahami dengan jelas bagaimana proses atau logika internalnya bekerja.
<i>Ambient temperature</i>	adalah suhu udara di sekitar objek atau area tertentu, tanpa pengaruh langsung dari sumber panas atau pendingin tertentu. Dalam konteks agrikultur dan fisiologi tanaman, <i>ambient temperature</i> merujuk pada suhu udara sekitar tanaman yang diukur pada ketinggian standar (biasanya sekitar 1,5–2 meter dari permukaan tanah), dan menjadi acuan utama dalam berbagai pengamatan iklim mikro maupun makro.
<i>Artificial Intelligent (AI)</i>	cabang dari ilmu komputer yang berfokus pada penciptaan sistem atau mesin yang mampu meniru perilaku cerdas manusia. AI memungkinkan komputer untuk melakukan tugas-tugas yang biasanya membutuhkan kecerdasan manusia.
<i>Bagging (Bootstrap Aggregating)</i>	metode yang melatih banyak model secara paralel pada subset data yang di-resample dengan pengembalian. Output akhir diperoleh dengan rata-rata (untuk regresi) atau voting mayoritas (untuk klasifikasi).
<i>Boosting</i>	metode melatih model secara berurutan, di mana model baru berfokus pada kesalahan yang dibuat oleh model sebelumnya. Setiap model memiliki bobot dalam hasil akhir, sehingga prediksi akhir adalah kombinasi berbobot.
<i>Brightness Temperature</i>	suhu radian objek permukaan bumi yang diukur berdasarkan radiasi termal yang dipancarkan, dan dinyatakan dalam satuan Kelvin (K). Dalam konteks citra satelit Landsat 8, khususnya band termal dari sensor <i>Thermal Infrared Sensor (TIRS)</i> , BT merupakan hasil konversi dari nilai <i>Digital Number (DN)</i> menjadi suhu radian menggunakan algoritma tertentu.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber ;
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Crop Water Stress Index (CWSI)

@Hak Cipta milik IPB University

Data interpretatif

indeks yang digunakan untuk mengukur tingkat stress air pada tanaman, khususnya untuk menilai ketersediaan air dalam hubungannya dengan kebutuhan fisiologis tanaman. Indeks ini dikembangkan pertama kali oleh Idso *et al.* (1981) dan banyak digunakan dalam aplikasi pertanian presisi, irigasi, dan pemantauan kekeringan menggunakan data penginderaan jauh.

data interpretatif dalam penginderaan jauh, khususnya yang diperoleh dari citra satelit Landsat 8, adalah informasi yang dihasilkan melalui proses interpretasi visual atau digital terhadap spektrum reflektansi elektromagnetik dari berbagai band spektral yang direkam oleh sensor OLI dan TIRS. Interpretasi ini dapat dilakukan oleh analis (manusia) maupun melalui sistem klasifikasi otomatis, dengan tujuan untuk memahami fenomena biofisik dan sosial-ekonomi di permukaan Bumi.

Data klimatologi

data yang mencerminkan kondisi iklim suatu wilayah dalam jangka panjang, biasanya berdasarkan pengamatan cuaca yang dikumpulkan secara sistematis selama periode 30 tahun atau lebih, sesuai definisi dari *World Meteorological Organization* (WMO). Data ini digunakan untuk memahami pola iklim, tren perubahan iklim, dan variabilitas cuaca jangka panjang.

Data meteorologi

data yang mencerminkan kondisi atmosfer di suatu tempat dan waktu tertentu, yang dikumpulkan untuk keperluan pemantauan cuaca, iklim, dan lingkungan. Data ini mencakup parameter-parameter fisik yang memengaruhi sistem cuaca dan sangat penting dalam bidang klimatologi, pertanian, hidrologi, dan penginderaan jauh.

Data meteorologi historis (*lag*)

dalam analisis *spasial-temporal* dan pemodelan prediktif berbasis deret waktu, data meteorologi historis (*lag*) memainkan peran penting dalam menggambarkan efek waktu tunda antara kondisi atmosfer dengan respon biogeofisik tanaman. Pendekatan ini mempertimbangkan bahwa pengaruh variabel iklim, seperti curah hujan, suhu, dan kelembaban udara, tidak selalu bersifat langsung, melainkan dapat berdampak pada fase pertumbuhan tanaman dalam periode waktu tertentu setelah kejadian tersebut. Oleh karena itu, integrasi data *lag* meteorologi menjadi komponen krusial dalam meningkatkan akurasi model prediksi cekaman air tanaman maupun estimasi indeks vegetasi multitemporal.

Data *time series*

data yang dikumpulkan, direkam, atau diukur secara berurutan berdasarkan waktu. Setiap observasi dalam *time series* dihubungkan dengan *timestamp* tertentu, seperti jam, hari, bulan, atau tahun. Fokus utama data ini adalah pola perubahan nilai dari waktu ke waktu.

Data-driven

pendekatan atau prinsip dalam pengambilan keputusan, analisis, atau pengembangan sistem yang berbasis pada data yang tersedia, bukan pada asumsi, intuisi, atau pengalaman semata. Dalam

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Deret harmonik

konteks ini, data menjadi dasar utama dalam membentuk strategi, memodelkan fenomena, atau membuat prediksi.

adalah jenis deret tak hingga dalam matematika yang jumlah sukunya berbentuk kebalikan dari bilangan bulat positif. Dalam konteks frekuensi, getaran atau gelombang, deret harmonik muncul sebagai suku-suku yang semakin kecil, deret harmonik tidak konvergen; artinya, jumlah totalnya bertambah tanpa batas (*divergen*). Deret harmonik dan deret Fourier terhubung melalui konsep frekuensi harmonik, di mana deret Fourier menyatakan fungsi periodik dalam bentuk kombinasi sinyal harmonik (sinusoidal) yang frekuensinya kelipatan bulat. Dalam banyak kasus, koefisien Fourier memiliki pola menurun mirip deret harmonik.

Digital number (DN)

representasi numerik awal dari intensitas radiasi elektromagnetik yang ditangkap oleh sensor satelit seperti Landsat 8, sebelum dikalibrasi menjadi nilai fisis seperti reflektansi atau radian spektral. DN merupakan nilai digital mentah yang disimpan dalam piksel citra satelit dan menjadi dasar awal dalam seluruh proses analisis penginderaan jauh.

Earth Resources Observation and Science (EROS)

sebuah pusat riset dan distribusi data penginderaan jauh yang dimiliki dan dioperasikan oleh U.S. *Geological Survey* (USGS). EROS berlokasi di Sioux Falls, South Dakota, Amerika Serikat. Fungsi dan peran EROS diantaranya sebagai menyimpan dan distribusi data satelit, mengembangkan sistem dan teknologi pengolahan data citra satelit dan berkolaborasi dengan berbagai badan nasional dan internasional, termasuk NASA, lembaga akademik, dan pemerintah negara lain dalam proyek-proyek seperti *Global Land Survey*, *Land Change Monitoring*, hingga distribusi Landsat data secara gratis ke publik untuk penelitian dan pemantauan jangka panjang.

Ekstraksi multi-spektral data satelit

proses pengambilan informasi dari citra satelit yang terdiri dari beberapa kanal (*band*) spektral yang direkam dari berbagai panjang gelombang cahaya (misalnya: merah, hijau, biru, inframerah dekat/NIR, inframerah gelombang pendek/SWIR). Gelombang pantulan (*band*) multi-spektral elektromagnetik ini digunakan untuk mengidentifikasi, mengukur, atau menganalisis karakteristik objek atau fenomena di permukaan bumi berdasarkan respons spektralnya.

Emisivitas permukaan tanah

kata lain dari *land surface emissivity* (LSE) yaitu rasio antara energi radiasi yang dipancarkan oleh permukaan nyata dengan energi yang dipancarkan oleh benda hitam ideal pada suhu yang sama. Dalam konteks pengolahan data citra satelit Landsat 8, emisivitas merupakan komponen penting dalam perhitungan suhu permukaan tanah atau *Land Surface Temperature* (LST) dari data termal (khususnya band 10 dari sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS)).



Ensemble learning

Fase *germination*
(perkecambahan)

Fase *grand growth*
(pertumbuhan cepat)

Fase *mature ripening*
(pematangan)

Fase *tillering*

Frequency Domain Reflectometry (FDR)

feature engineering data time series

Fenologi

suatu pendekatan dalam *machine learning* yang menggabungkan beberapa model prediktif (disebut *base learners* atau *weak learners*) untuk membentuk model yang lebih kuat dan akurat. Tujuannya adalah untuk meningkatkan performa prediksi dibandingkan hanya menggunakan satu model tunggal.

tahap awal dalam siklus hidup tanaman di mana benih (*seed*) yang sebelumnya dalam keadaan dorman mulai tumbuh menjadi tanaman muda. Proses ini sangat penting karena menentukan keberhasilan pertumbuhan selanjutnya.

disebut fase pertumbuhan cepat dalam siklus hidup tanaman, karena pada fase ini, tanaman semusim dan tahunan seperti tebu, padi, dan jagung mengalami peningkatan pertumbuhan biomassa secara eksponensial. Pada fase ini ditandai dengan pertambahan tinggi, luas daun, volume batang, dan pembentukan organ-organ vegetatif lainnya.

yaitu fase pematangan dan pemasakan yang merupakan fase akhir dalam siklus hidup tanaman, terutama tanaman penghasil biomassa ekonomis seperti tebu, padi, jagung, dan buah-buahan. Pada fase ini, pertumbuhan vegetatif berhenti dan tanaman mulai memusatkan aktivitas fisiologisnya pada akumulasi hasil, seperti gula, pati, atau biji yang siap panen.

Fase pertumbuhan anakan (*tiller*) merupakan tahap penting dalam pertumbuhan vegetatif tanaman monokotil, terutama pada tanaman sereal seperti padi, gandum, dan tebu. Pada fase ini, tanaman mulai menghasilkan tunas lateral (anak anakan atau *tiller*) dari pangkal batang utama yang tumbuh di permukaan tanah. Fase ini sangat krusial karena menentukan jumlah batang produktif yang akan menghasilkan malai atau tongkol.

adalah metode yang mengukur frekuensi resonansi atau perubahan kapasitansi tanah akibat variasi kadar air.

adalah proses membuat, mengubah, atau memilih fitur (variabel input) yang relevan dan informatif dari data *time-series* agar dapat meningkatkan kinerja model prediksi atau analisis. Proses ini menambahkan wawasan temporal ke dalam *dataset*, memungkinkan model statistik atau *machine learning* untuk mengenali struktur waktu, seperti keterlambatan respons, pola musiman, dan fluktuasi. Teknik ini krusial untuk meningkatkan akurasi model prediktif seperti *Random Forest*, *LSTM*, atau *XGBoost* dalam konteks *time series forecasting*.

adalah cabang ilmu ekologi yang mempelajari perubahan periodik dalam siklus hidup organisme (terutama tumbuhan dan hewan), serta kaitannya dengan faktor lingkungan, khususnya iklim. Fenologi mengamati kejadian biologis musiman seperti waktu berkecambah, bertunas, berbunga, berbuah, menggugurkan daun (pada tumbuhan), hingga migrasi atau perkawinan (pada hewan), dan bagaimana peristiwa-peristiwa ini dipengaruhi oleh faktor



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

	abiotik, terutama suhu, curah hujan, dan panjang hari (fotoperiodisme). Dalam penelitian berbasis citra satelit (<i>Remote Sensing</i>), fenologi dapat diidentifikasi melalui perubahan nilai indeks vegetasi (seperti NDVI) dari waktu ke waktu, yang mencerminkan dinamika pertumbuhan dan perkembangan tajuk tanaman secara <i>spasial-temporal</i> .
Gravimetric	dalam ilmu tanah dan agronomi, gravimetric water content (kadar air gravimetrik) adalah metode untuk mengukur kadar air tanah berdasarkan perbandingan massa air terhadap massa kering tanah.
Grid search	adalah mencoba semua kombinasi dari nilai-nilai <i>hyperparameter</i> secara sistematis.
Heat dissipation	pembuangan panas adalah proses di mana panas yang dihasilkan oleh suatu sistem, permukaan, atau objek dipindahkan ke lingkungan sekitarnya untuk mencegah penumpukan suhu yang berlebihan. Dalam konteks penginderaan jauh (<i>Remote Sensing</i>) dan khususnya analisis citra satelit seperti Landsat 8, konsep heat dissipation penting dalam memahami perilaku termal permukaan bumi, terutama dalam studi perkotaan, pertanian, dan iklim mikro.
Hyperparameter	parameter yang nilainya ditentukan sebelum proses pelatihan model <i>machine learning</i> dimulai, dan tidak dipelajari secara langsung dari data. <i>Hyperparameter</i> mengontrol perilaku proses pelatihan atau arsitektur model, seperti jumlah pohon pada <i>Random Forest</i> , <i>learning rate</i> pada <i>Gradient Boosting</i> , atau jumlah neuron pada layer tersembunyi <i>Neural Network</i> .
Hyperparameter tuning	proses mencari kombinasi nilai <i>hyperparameter</i> terbaik untuk meningkatkan performa model <i>machine learning</i> . Karena <i>hyperparameter</i> tidak dipelajari langsung dari data, kita harus menguji berbagai kombinasi nilai untuk menemukan yang paling optimal. Kondisi optimal dicapai ketika performa model meningkat (akurasi, R ² , F1-score, dll), dapat juga dengan mengurangi <i>overfitting</i> atau <i>underfitting</i> .
imputasi pada data <i>time-series</i>	adalah proses mengisi nilai yang hilang (<i>missing values</i>) dalam deret waktu (<i>time-series</i>) dengan nilai estimasi berdasarkan informasi yang tersedia dalam data tersebut. Tujuannya adalah menjaga kontinuitas dan kualitas data agar tetap dapat digunakan untuk analisis statistik, pemodelan prediktif, dan visualisasi tren temporal.
Indeks vegetasi	suatu ukuran kuantitatif yang diperoleh dari data citra satelit atau penginderaan jauh, yang digunakan untuk menilai kondisi, tutupan, atau kesehatan vegetasi (tanaman) di suatu wilayah. Indeks ini dihitung berdasarkan pantulan spektral (reflektansi) dari permukaan bumi dalam pita-pita tertentu, terutama pita merah (red) dan inframerah dekat (<i>near-infrared</i> /NIR), karena tanaman hijau secara khas menyerap cahaya merah dan memantulkan cahaya inframerah dekat.



interveinal chlorosis

gejala yang khas terlihat pada tanaman akibat kekurangan magnesium, di mana bagian antara tulang daun menjadi kuning namun tulang daun tetap hijau, menunjukkan adanya masalah dalam mobilitas magnesium yang berfungsi sebagai kofaktor dalam fotosintesis.

k-fold cross validation

teknik validasi silang yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja model *machine learning* secara lebih handal dan mengurangi risiko *overfitting* atau *underfitting*. Teknik ini membagi data pelatihan menjadi k bagian (*fold*) yang berukuran kurang lebih sama. Proses evaluasi dilakukan sebanyak k kali, dimana pada setiap iterasi: Satu *fold* digunakan sebagai data validasi (*testing*). K-1 *fold* sisanya digunakan untuk melatih model (*training*). Proses ini diulang hingga setiap *fold* telah digunakan sekali sebagai data validasi. Kemudian, hasil evaluasi dari semua iterasi dirata-rata untuk memberikan estimasi performa model yang lebih stabil dan general.

Koreksi atmosfer

adalah proses menghilangkan pengaruh atmosfer (seperti uap air, aerosol, dan partikel debu) terhadap sinyal elektromagnetik yang diterima sensor satelit. Radiasi yang dipantulkan dari permukaan bumi mengalami hamburan dan penyerapan oleh atmosfer sebelum mencapai sensor. Koreksi ini penting agar nilai pantulan (*reflectance*) mencerminkan kondisi permukaan bumi yang sesungguhnya.

Koreksi geometrik

adalah proses memperbaiki distorsi spasial dalam citra satelit agar posisi piksel pada citra sesuai dengan posisi geografis sebenarnya di permukaan bumi (koordinat peta).

Koreksi radiometrik

adalah proses mengoreksi kesalahan atau perbedaan nilai digital (DN) yang disebabkan oleh sensor atau kondisi perekaman yang tidak ideal.

Land Surface
Temperature
(LST)

adalah suhu permukaan lahan. LST merupakan suhu aktual permukaan tanah yang diukur berdasarkan radiasi termal yang dipancarkan oleh permukaan bumi, dan sering diperoleh dari data penginderaan jauh (*Remote Sensing*), terutama dari citra satelit seperti Landsat 8, MODIS, dan Sentinel-2.

Land Surface Water
Index
(LSWI)

indeks vegetasi berbasis citra satelit yang digunakan untuk mendeteksi kandungan air di permukaan lahan dan vegetasi. Indeks ini sangat berguna dalam memantau kondisi kelembaban tanah, deteksi kekeringan, serta dinamika air di dalam tanaman, termasuk perubahan fisiologis akibat stres air.

Land Use Land Cover
(LULC)

istilah dalam geospasial dan ilmu lingkungan yang merujuk pada dua konsep yang saling terkait namun berbeda. *Land Cover* (penutup lahan) merupakan apa yang secara fisik menutupi permukaan bumi, seperti: hutan, air (sungai, danau), permukiman, lahan terbuka, pertanian, salju atau es. *Land cover* dapat diidentifikasi melalui penginderaan jauh (misalnya citra satelit) dan digunakan untuk memantau perubahan penutup lahan dari



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

waktu ke waktu. Sedangkan *Land Use* (penggunaan lahan) merupakan bagaimana manusia memanfaatkan lahan tersebut, contohnya: perumahan dan permukiman, pertanian atau perkebunan, industri, transportasi, rekreasi, konservasi atau cagar alam. *Land use* mencerminkan aktivitas sosial-ekonomi dan kebijakan tata ruang di suatu wilayah.

Landsat 8

satelit penginderaan jauh yang merupakan bagian dari program Landsat, yaitu program pengamatan bumi yang dikembangkan bersama oleh NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) dan USGS (*United States Geological Survey*). Satelit ini diluncurkan pada 11 Februari 2013 dan menjadi penerus dari Landsat 7.

Leaf temperature

suhu permukaan daun tanaman yang mencerminkan keseimbangan energi antara penyerapan panas dari radiasi matahari, kehilangan panas melalui transpirasi, dan pertukaran panas dengan udara sekitarnya. Secara fisiologis, suhu daun merupakan indikator penting dalam menilai status air tanaman, efisiensi fotosintesis, serta respons tanaman terhadap stres lingkungan seperti kekeringan, panas, atau kelembaban rendah.

Long Short-Term Memory (LSTM)

jenis arsitektur dari *Recurrent Neural Network* (RNN) yang dirancang khusus untuk memproses dan mempelajari sekuens data atau *time series* jangka panjang dengan lebih efektif. LSTM dikembangkan oleh Hochreiter dan Schmidhuber pada tahun 1997 sebagai solusi terhadap kelemahan RNN standar, yaitu masalah *vanishing gradient* dan *short-term memory*.

Machine Learning (ML)

adalah cabang dari kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) yang berfokus pada pengembangan algoritma dan model yang memungkinkan komputer belajar dari data dan membuat prediksi atau keputusan tanpa diprogram secara eksplisit.

Mikroklimat

adalah kondisi iklim yang berlaku di area yang sangat kecil atau spesifik, yang bisa berbeda secara signifikan dari iklim di sekitarnya. Hal ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti topografi, vegetasi, tata guna lahan, serta aktivitas manusia.

Model

adalah struktur matematis/statistik yang mempelajari pola dari perilaku data.

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

sensor penginderaan jauh spektral yang dipasang pada dua satelit milik NASA, yaitu Terra (diluncurkan tahun 1999) dan Aqua (diluncurkan tahun 2002). MODIS dirancang untuk mengamati dan memantau berbagai aspek lingkungan global, termasuk atmosfer, daratan, dan lautan, dengan cakupan spasial yang luas dan resolusi temporal yang tinggi.

MODTRAN

singkatan dari *MODerate resolution atmospheric TRANsmission* adalah model numerik transfer radiasi atmosferik yang digunakan untuk mensimulasikan transmisi, pantulan, dan emisi radiasi elektromagnetik dalam atmosfer bumi, dari spektrum *ultraviolet*



Normalized Difference Drought Index (NDDI)

(UV) hingga inframerah jauh (*longwave infrared*), dengan resolusi spektral menengah.

@Hak cipta milik IPB University

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

indeks berbasis penginderaan jauh yang dikembangkan untuk mendeteksi dan memantau kekeringan dengan menggabungkan dua indeks spektral penting: NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) dan NDWI (*Normalized Difference Water Index*). NDDI bertujuan memberikan gambaran kondisi vegetasi dan ketersediaan air secara simultan.

Normalized Difference Water Index (NDWI)

indeks vegetasi yang banyak digunakan dalam penginderaan jauh untuk mengukur kesehatan dan kepadatan vegetasi berdasarkan pantulan cahaya dari permukaan bumi, khususnya dari citra satelit.

Operational Land Imager (OLI)

indeks vegetasi berbasis citra satelit yang digunakan untuk mendeteksi dan memantau kandungan air pada vegetasi dan permukaan tanah, terutama untuk mengidentifikasi keberadaan air bebas (seperti danau, sungai, atau genangan).

Optimized Soil Adjusted Vegetation Index (OSAVI)

sensor utama yang terdapat pada satelit Landsat 8 dan berfungsi untuk merekam data penginderaan jauh permukaan Bumi dalam berbagai spektrum panjang gelombang cahaya. OLI menggantikan dan meningkatkan kemampuan sensor sebelumnya (ETM+ pada Landsat 7), dengan kualitas citra yang lebih tinggi dan jangkauan spektral yang diperluas.

Overfitting

indeks vegetasi yang dikembangkan untuk memperbaiki kelemahan NDVI terutama pada kondisi vegetasi jarang atau area dengan pengaruh tanah terbuka yang kuat. OSAVI dirancang untuk mengurangi efek latar belakang tanah (*soil background effects*) dalam pengukuran indeks vegetasi.

pengaruh tertunda (*lagged effect*) pada data *time-series*

kondisi terlalu sesuai / terlalu cocok yang terjadi ketika model belajar terlalu detail terhadap data latih, termasuk *noise* atau *outlier* di dalamnya, sehingga kehilangan kemampuan untuk menggeneralisasi ke data baru yang belum pernah dilihat.

Pertumbuhan *internodus*

Pengaruh tertunda (*lagged effect*) pada data *time-series* merujuk pada kondisi ketika suatu variabel tidak langsung memengaruhi variabel lain atau dirinya sendiri pada waktu yang sama, melainkan pada waktu berikutnya (*lag*). Pengaruh *lag* mencerminkan hubungan sebab-akibat yang tidak instan dalam data *time-series*. Pemahaman dan penerapannya penting untuk meningkatkan akurasi dalam pemodelan prediktif, terutama untuk fenomena yang sifatnya dinamis dan akumulatif.

proses pemanjangan bagian batang tumbuhan yang terletak di antara dua ruas atau buku (*nodus*) tempat daun atau cabang melekat. Internodus berperan penting dalam menentukan tinggi, bentuk, dan struktur tajuk tanaman.



Prediksi	model yang telah dilatih digunakan untuk memperkirakan nilai atau kategori baru.
prosedur <i>curve-fitting</i>	proses dalam analisis data kuantitatif yang digunakan untuk menemukan fungsi matematis (kurva) yang paling cocok menggambarkan pola hubungan antara variabel-variabel dalam sekumpulan data. Tujuan utamanya adalah memodelkan hubungan antara variabel independen (x) dan variabel dependen (y) sedemikian rupa sehingga fungsi yang diperoleh dapat digunakan untuk menjelaskan, memprediksi, atau menyimpulkan karakteristik dari data tersebut.
PTPN	Perusahaan Terbatas Perkebunan Nusantara yaitu perusahaan-perusahaan atau Badan Usaha Milik Negara (BUMN) di Indonesia yang bergerak di sektor agribisnis dan agroindustri, terutama dalam bidang perkebunan seperti kelapa sawit, tebu, teh, karet, kopi, dan tembakau.
<i>Quantized and calibrated standard product pixel value (DN)</i>	nilai digital yang disimpan dalam citra setelah proses kalibrasi sistem dilakukan oleh USGS, dan yang digunakan sebagai input utama untuk analisis lanjutan seperti perhitungan <i>reflectance</i> , <i>radiance</i> , dan suhu radian (<i>brightness temperature</i>).
<i>Radiance Add Band</i>	parameter kalibrasi dalam citra Landsat 8 yang berfungsi sebagai nilai penambah (<i>offset</i>) dalam proses konversi <i>Digital Number (DN)</i> menjadi radiansi <i>Top-of-Atmosphere (TOA radiance)</i> .
<i>Radiance Multiplicative Band</i>	salah satu parameter kalibrasi yang digunakan untuk mengubah nilai digital mentah (<i>Digital Number</i> atau DN) pada citra satelit menjadi nilai radiansi <i>top-of-atmosphere (TOA radiance)</i> . Nilai ini disediakan dalam metadata citra Landsat 8 (file MTL.txt) dan spesifik untuk setiap <i>band</i> .
<i>Random Forest Regressor</i>	algoritma <i>ensemble learning</i> untuk tugas regresi yang bekerja dengan membangun banyak pohon keputusan (<i>decision trees</i>) dan menggabungkan prediksi mereka untuk meningkatkan akurasi dan mengurangi <i>overfitting</i> .
<i>Random search</i>	Memilih kombinasi nilai secara acak dari ruang pencarian.
<i>Ratoon stunting disease (RSD)</i>	penyakit kerdil <i>ratoon</i> adalah penyakit sistemik penting pada tanaman tebu yang disebabkan oleh bakteri <i>Leifsonia xyli subsp. xyli</i> . Penyakit ini merupakan salah satu penyakit tersembunyi (<i>hidden disease</i>) yang paling merugikan karena sulit dideteksi secara visual, tetapi dapat menurunkan hasil hingga 30% atau lebih, terutama pada tanaman hasil pertunasan (<i>ratoon crop</i>).
<i>Remote Sensing</i>	disebut juga penginderaan jauh adalah teknik untuk memperoleh informasi tentang suatu objek atau wilayah di permukaan bumi tanpa melakukan kontak langsung secara fisik, melainkan melalui perekaman data menggunakan sensor yang dipasang pada wahana seperti satelit, pesawat terbang, <i>drone</i> , atau balon udara. Pada satelit di luar angkasa sensor tersebut menangkap energi



Rolling mean

elektromagnetik yang dipantulkan atau dipancarkan oleh objek di permukaan bumi, lalu dikonversi menjadi data digital berupa citra (*image*) yang dapat dianalisis untuk berbagai tujuan, seperti: pemantauan lingkungan, pertanian, kehutanan, geologi, kelautan dan, kebencanaan.

adalah proses menghitung rata-rata nilai data dalam sebuah jendela (*window*) yang bergerak secara bertahap sepanjang sumbu waktu. Pada setiap langkah, *window* berpindah ke depan satu titik waktu dan menghitung rata-rata dari nilai-nilai dalam *window* tersebut.

Rolling windows

adalah teknik penting dalam pengolahan data deret waktu untuk mengekstrak informasi statistik lokal yang dinamis dari data historis. Teknik ini sangat berguna dalam pemodelan prediktif, deteksi anomali, dan peringkasan tren jangka pendek. Teknik ini menghitung nilai statistik (seperti rata-rata, standar deviasi, minimum, maksimum) berdasarkan subset data yang bergerak, yakni hanya menggunakan sejumlah titik data sebelumnya dalam satu jendela waktu tetap (*window size*).

Sentinel 2

misi penginderaan jauh berbasis satelit yang diluncurkan oleh *European Space Agency* (ESA) sebagai bagian dari program Copernicus untuk observasi bumi terbesar di dunia. Misi ini terdiri dari dua satelit kembar, yaitu Sentinel-2A (diluncurkan pada tahun 2015) dan Sentinel-2B (diluncurkan pada tahun 2017). Keduanya beroperasi di orbit polar sinkron matahari dengan tujuan utama untuk memantau kondisi permukaan bumi secara optik dan multispektral.

SHapley Additive exPlanations (SHAP)

metode *interpretabilitas* model *machine learning* berbasis teori permainan (*game theory*) yang digunakan untuk menjelaskan kontribusi setiap fitur input terhadap prediksi model. Konsep nilai *Shapley* (*Shapley value*) dalam teori permainan kooperatif. Nilai *Shapley* digunakan untuk menghitung kontribusi adil setiap pemain terhadap total hasil permainan.

Spasial

istilah yang merujuk pada segala sesuatu yang berkaitan dengan ruang atau lokasi di permukaan bumi. Dalam konteks ilmu pengetahuan dan teknologi, terutama dalam geografi, penginderaan jauh, sistem informasi geografis (SIG/GIS), dan perencanaan wilayah, "spasial" berarti memiliki dimensi lokasi atau posisi geografis.

Spasial-temporal

istilah yang digunakan untuk menggambarkan fenomena atau data yang memiliki dimensi ruang (*spasial*) dan waktu (*temporal*) secara bersamaan. Dalam konteks penelitian atau analisis ilmiah, *spasial-temporal* merujuk pada bagaimana suatu kejadian, variabel, atau objek berubah di berbagai lokasi (*spasial*) dan selama rentang waktu tertentu (*temporal*).

Spektrum elektromagnetik

Spektrum elektromagnetik dalam konteks citra satelit Landsat 8 merujuk pada rentang panjang gelombang radiasi

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

	elektromagnetik yang ditangkap oleh sensor satelit untuk menghasilkan informasi permukaan bumi. Setiap objek di permukaan bumi memantulkan atau memancarkan radiasi elektromagnetik secara berbeda tergantung pada sifat fisiknya, dan perbedaan inilah yang ditangkap oleh sensor. Pemanfaatan <i>band-band</i> ini memungkinkan berbagai aplikasi seperti pemetaan vegetasi, deteksi perubahan lahan, pemantauan suhu, dan identifikasi sumber daya alam.
<i>Synthetic Aperture Radar (SAR)</i>	sistem sensor aktif penginderaan jauh yang menggunakan gelombang radar untuk menghasilkan citra permukaan Bumi dengan resolusi tinggi, baik siang maupun malam dan dalam kondisi berawan. SAR sangat penting dalam pemantauan perubahan permukaan lahan, dinamika vegetasi, bencana alam, serta deformasi tanah dan infrastruktur.
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i> adalah metode yang mengukur kadar air tanah berdasarkan waktu yang dibutuhkan gelombang elektromagnetik untuk merambat melalui tanah.
Tebu (<i>Saccharum officinarum</i>)	tanaman lokal dari Papua Nugini yang dimanfaatkan oleh masyarakat lokal sebagai bahan pembuat gula dari batangnya yang manis. Tebu menjadi komoditas global yang strategis dalam perekonomian dunia. Perkembangannya tidak hanya berkaitan dengan aspek pertanian, tetapi juga berdampak pada sistem sosial, kolonialisme, dan ekonomi global selama berabad-abad.
<i>Thermal Infrared Sensor (TIRS)</i>	sensor termal pasif pada satelit Landsat 8, dengan fungsi utama untuk mengukur radiasi inframerah termal yang dipancarkan oleh permukaan bumi. Sensor ini penting dalam studi suhu permukaan dan keseimbangan energi, terutama dalam bidang hidrologi, pertanian, dan pengelolaan sumber daya alam.
<i>uji stasioner Augmented Dickey-Fuller (ADF)</i>	salah satu metode statistik yang digunakan untuk menguji apakah suatu data deret waktu (<i>time series</i>) bersifat stasioner, yaitu apakah karakteristik statistiknya seperti mean, varians, dan kovarians tidak berubah terhadap waktu.
<i>Underfitting</i>	kondisi model yang kurang belajar / tidak sesuai sehingga tidak mampu menangkap pola dari data latih dengan baik.
<i>Unmanned Aerial Vehicle (UAV)</i>	adalah kendaraan udara tak berawak berupa pesawat terbang yang beroperasi tanpa awak atau pilot di dalamnya. UAV dikendalikan dari jarak jauh oleh operator manusia melalui sistem kendali jarak jauh, atau dapat juga terbang secara mandiri menggunakan sistem otonom seperti autopilot, sensor navigasi, dan kecerdasan buatan. UAV merupakan bagian dari sistem yang lebih luas yang disebut <i>Unmanned Aerial System (UAS)</i> , yaitu mencakup UAV itu sendiri, sistem kendali, sensor, dan perangkat lunak pengolahan data.
<i>US Geological Survey (USGS)</i>	sebuah lembaga ilmiah milik pemerintah federal Amerika Serikat yang berada di bawah Departemen Dalam Negeri (<i>Department of</i>



Vigor vegetasi

Water stress

the Interior). Didirikan pada tahun 1879, USGS bertugas melakukan penelitian, pemetaan, dan pengumpulan data tentang kondisi alam dan sumber daya alam di wilayah Amerika Serikat dan wilayah-wilayah terkait. USGS juga menyediakan informasi ilmiah untuk kepentingan publik, pengambilan kebijakan, dan mitigasi bencana.

istilah yang merujuk pada tingkat kesehatan, kekuatan, dan pertumbuhan aktif tanaman atau tutupan vegetasi pada suatu area. *Vigor* vegetasi menggambarkan seberapa baik tanaman mampu melakukan fotosintesis, menyerap nutrisi, dan mempertahankan pertumbuhannya dalam kondisi lingkungan tertentu.

disebut juga cekaman air adalah kondisi di mana tanaman tidak memperoleh jumlah air yang cukup untuk memenuhi kebutuhan fisiologisnya secara optimal. Hal ini terjadi ketika ketersediaan air di tanah lebih rendah daripada kebutuhan air tanaman, baik karena kekurangan curah hujan, irigasi yang tidak mencukupi, penguapan yang tinggi, atau kombinasi dari faktor-faktor tersebut.