

ANALISIS FAKTOR DOMINAN DAN PREDIKSI EMISI KARBON DI INDONESIA MENGGUNAKAN PENDEKATAN HYBRID: RECURSIVE FEATURE ELIMINATION DAN EXTREME GRADIENT BOOSTING (XGBOOST)

TESIS



**PROGRAM STUDI ILMU KOMPUTER (S2)
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS PENDIDIKAN GANESHA**



- UU ITE No. 11 Tahun 2008 Pasal 5 Ayat 1 "Informasi Elektronik dan/atau hasil cetaknya merupakan alat bukti hukum yang sah"
- Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan BSrE - BSSN, validitas dokumen elektronik ini bisa dicek menggunakan aplikasi mobile VeryDS oleh BSrE
- Cetakn dokumen ini merupakan salinan dari file dokumen bertandatangan elektronik yang keabsahannya dapat diakses melalui scan QRCode yang terdapat pada sertifikat ini.



- UU ITE No. 11 Tahun 2008 Pasal 5 Ayat 1 "Informasi Elektronik dan/atau hasil cetaknya merupakan alat bukti hukum yang sah"
- Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan BSrE - BSSN, validitas dokumen elektronik ini bisa dicek menggunakan aplikasi mobile VeryDS oleh BSrE
- Cetak dokumen ini merupakan salinan dari file dokumen bertandatangan elektronik yang keabsahannya dapat diakses melalui scan QRCode yang terdapat pada sertifikat ini.



Balai
Sertifikasi
Elektronik

TESIS

DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI TUGAS DAN MEMENUHI SYARAT-SYARAT UNTUK MENCAPAI GELAR MAGISTER KOMPUTER



Pembimbing I	Prof. Dr. Ir. Dewa Gede Hendra Divayana, S.Kom., M.Kom., MCE., IPU., ASEAN.Eng., APEC.Eng. NIP.198407242015041002
Pembimbing II	Dr. Ir. I Made Gede Sunarya, S.Kom., M.Cs. NIP.198307252008011008



- UU ITE No. 11 Tahun 2008 Pasal 5 Ayat 1 "Informasi Elektronik dan/atau hasil cetaknya merupakan alat bukti hukum yang sah"
- Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan BSrE - BSSN, validitas dokumen elektronik ini bisa dicek menggunakan aplikasi mobile VeryDS oleh BSrE
- Cetakan dokumen ini merupakan salinan dari file dokumen bertandatangan elektronik yang keabsahannya dapat diakses melalui scan QRCode yang terdapat pada sertifikat ini.

Tesis oleh I Putu Santrisna telah dipertahankan di depan tim penguji dan dinyatakan diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Komputer di Ilmu Komputer (S2), Program Pascasarjana, Universitas Pendidikan Ganesha
Pada tanggal 05 Agustus 2026

Dewan Penguji

Ketua	Dr. Ir. I Made Gede Sunarya, S.Kom., M.Cs. NIP.198307252008011008
Anggota	Prof. Dr. Ir. Dewa Gede Hendra Divayana, S.Kom., M.Kom., MCE., IPU., ASEAN.Eng., APEC.Eng. NIP.198407242015041002
Anggota	Dr. Putu Hendra Suputra, S.Kom., M.Cs. NIP.198212222006041001
Anggota	I Made Putrama, S.T., M.Tech., Ph.D. NIP.198005242014041003

Mengetahui Direktur Program Pascasarjana
Universitas Pendidikan Ganesha,



Prof. Dr. I Nyoman Jampel, M.Pd.

NIP.195910101986031003



- UU ITE No. 11 Tahun 2008 Pasal 5 Ayat 1 "Informasi Elektronik dan/atau hasil cetaknya merupakan alat bukti hukum yang sah"
- Dokumen ini telah ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan BSrE - BSSN, validitas dokumen elektronik ini bisa dicek menggunakan aplikasi mobile VeryDS oleh BSrE
- Cetakan dokumen ini merupakan salinan dari file dokumen bertandatangan elektronik yang keabsahannya dapat diakses melalui scan QRCode yang terdapat pada sertifikat ini.

LEMBAR PERNYATAAN

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis yang saya susun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Pendidikan dari Pascasarjana Universitas Pendidikan Ganesha seluruhnya merupakan hasil karya saya sendiri. Bagian-bagian tertentu dalam penulisan tesis yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas dan sesuai dengan norma, kaidah, serta etika akademis.

Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian tesis ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiat dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya sandang dan sanksi-sanksi lainnya sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku di wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia.

Singaraja, 6, Agustus 2026
Yang memberi pernyataan,



I Putu Santrisna

PRAKATA

Puji dan syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas anugrah-Nya, sehingga tesis yang berjudul: “Analisis Faktor Dominan dan Prediksi Emisi Karbon di Indonesia Menggunakan Pendekatan Hybrid: Recursive Feature Elimination dan Extreme Gradient Boosting (XGBoost)”, dapat diselesaikan sesuai dengan yang direncanakan.

Tesis ini ditulis untuk memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Pendidikan Pascasarjana Universitas Pendidikan Ganesha pada Program Studi Ilmu Komputer. terselesaikannya tesis ini telah banyak memperoleh uluran tangan dari berbagai pihak. Untuk itu, izinkan penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan kepada pihak-pihak berikut:

1. Prof. Dr. Ir. Dewa Gede Hendra Divayana, S.Kom., M.Kom., IPU., ASEAN.Eng., APEC.Eng., sebagai pembimbing I yang telah dengan sabar membimbing, mengarahkan, dan memberikan motivasi yang demikian bermakna, sehingga penulis mampu melewati berbagai hambatan dalam perjalanan studi dan penyelesaian tesis ini;
2. Dr. Ir. I Made Gede Sunarya, S.Kom., M.Cs., sebagai pembimbing II, yang dengan gaya dan pola komunikasi yang khas, telah melecut semangat, motivasi, dan harapan penulis selama penelitian dan penulisan naskah laporan tesis ini, sehingga tesis ini dapat terwujud dengan baik sesuai harapan;
3. Dr. Putu Hendra Suputra, S.Kom., M.Cs. dan I Made Putrama, S.T., M.Tech., Ph.D. sebagai penguji yang telah banyak memberikan masukan-masukan yang bermanfaat untuk penyempurnaan tesis ini;

4. Koordinator Program Studi Ilmu Komputer dan staf dosen pengajar yang telah banyak membantu dan memotivasi penulis selama penyusunan tesis ini;
5. Direktur Pascasarjana Undiksha dan staf, yang telah banyak membantu selama penulis menyelesaikan tesis ini;
6. Rektor Universitas Pendidikan Ganesha, yang telah memberikan bantuan secara moral dan memfasilitasi berbagai kepentingan penulis dalam menyelesaikan tesis ini;
7. Orang tua, istri, anak, sahabat, rekan-rekan seangkatan, serta segenap pihak yang telah banyak membantu secara material dan moral selama penyelesaian tesis ini.

Semoga semua bantuan yang telah mereka berikan dalam menyelesaikan studi ini, mereka diberkati imbalan yang sepadan oleh Tuhan Yang Maha Esa, kesehatan, dan keharmonian dalam menjalani kehidupan.

Penulis menyadari bahwa tesis ini belum sempurna. Namun, kehadirannya dalam konstelasi masyarakat akademis akan menambah perbendaharaan ilmu dalam perkembangan ilmu pengetahuan. Semoga tesis ini bermanfaat bagi masyarakat akademis, terutama mereka yang menyatakan diri bernaung di bawah kebesaran panji-panji pendidikan.

Singaraja, 6 Agustus 2026

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	III
DAFTAR ISI.....	VII
DAFTAR TABEL.....	X
DAFTAR GAMBAR.....	XI
DAFTAR LAMPIRAN.....	XII
ABSTRAK.....	XIII
ABSTRACT.....	XV
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	3
1.3 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian.....	4
1.4 Rumusan Masalah.....	5
1.5 Tujuan Penelitian.....	5
1.6 Manfaat Penelitian.....	5
1.7 Kebaruan Penelitian (Novelty).....	6
BAB II KAJIAN PUSTAKA.....	8
2.1 Landasan Teori.....	8
2.1.1 Emisi karbon dan variabel prediktor.....	8
2.1.2 Seleksi fitur dalam machine learning.....	11
2.1.3 Recursive feature elimination (RFE).....	12
2.1.4 Extreme gradient boosting (XGBoost).....	13
2.1.5 Justifikasi pendekatan machine learning.....	13
2.1.6 Evaluasi kinerja model.....	15

2.1.7 Model pembandingan: regresi teregularisasi dan Support Vector Regression.....	15
2.1.8 Teknik pendukung analisis tambahan.....	16
2.2 Kajian Penelitian yang Relevan.....	18
2.3 Kerangka Berpikir	20
2.4 Asumsi Penelitian	20
BAB III METODE PENELITIAN.....	21
3.1 Jenis Penelitian	21
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	21
3.3 Data Penelitian dan Variabel Penelitian.....	21
3.3.1 Sumber data	21
3.3.2 Variabel penelitian	22
3.4 Alur Penelitian dan Prosedur Komputasi.....	23
3.4.1 Pengumpulan dan pra-pemrosesan data.....	24
3.4.2 Pembagian data.....	25
3.4.3 Seleksi fitur menggunakan RFE dengan estimator Random Forest ..	25
3.4.4 Pemodelan prediksi.....	26
3.4.5 Evaluasi kinerja model	27
3.4.6 Analisis kontribusi prediktif fitur	28
3.5 Jadwal Penelitian	28
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Hasil Penelitian.....	29
4.1.1 Deskripsi Data Penelitian	29
4.1.2 Pembagian Data	29

4.1.3 Analisis Multikolinearitas	30
4.1.4 Hasil Seleksi Fitur RFE	31
4.1.5 Kinerja Model pada Tahap Pengembangan	32
4.1.6 Kinerja Model pada Data Uji.....	32
4.1.7 Analisis Kontribusi Prediktif Fitur.....	34
4.1.8 Analisis Tambahan	35
4.2 Pembahasan.....	42
4.2.1 Faktor Dominan Emisi Karbon Indonesia	42
4.2.2 Keterbatasan Ekstrapolasi Model Berbasis Pohon	42
4.2.3 Kontribusi Seleksi Fitur RFE	44
4.2.4 Kontribusi Variabel Prediktor Eksogen	45
4.2.5 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu.....	45
4.2.6 Implikasi dan Keterbatasan.....	46
4.2.7 Kontribusi pada bidang ilmu komputer	47
BAB V PENUTUP.....	49
5.1 Simpulan.....	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA.....	53
LAMPIRAN.....	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Ringkasan Penelitian Terdahulu Terkait Prediksi Emisi Karbon Berbasis Machine Learning	18
Tabel 3.1 Sampel Dataset Penelitian (1990–1994 dan 2019–2023)	22
Tabel 3.2 Kamus Variabel Penelitian.....	23
Tabel 3.3 Pembagian Data Latih, Validasi, dan Data Uji	25
Tabel 3.4 Jadwal Penelitian.....	28
Tabel 4.1 Rentang Nilai CO ₂ per Kapita pada Tiap Bagian Data	30
Tabel 4.2 Nilai VIF Variabel Prediktor pada Data Latih.....	30
Tabel 4.3 Peringkat Fitur Hasil RFE dengan Estimator Random Forest	31
Tabel 4.4 Kinerja Model pada Data Validasi.....	32
Tabel 4.5 Kinerja Model pada Data Uji	33
Tabel 4.6 Perbandingan Nilai Aktual dan Prediksi Model Utama pada Data Uji .	33
Tabel 4.7 Perbandingan Kontribusi Fitur Menurut XGBoost dan RFE	34
Tabel 4.8 Kinerja Model dengan Rekayasa Fitur pada Data Uji (RMSE / R ²)	35
Tabel 4.9 Kinerja Model Univariat (lag-1) pada Data Uji	36
Tabel 4.10 Perbandingan Prediksi dan Kinerja Skema Walk-Forward pada Data Uji.....	37
Tabel 4.11 Kinerja Model Pendukung pada Data Uji	39
Tabel 4.12 Kinerja XGBoost Sebelum dan Sesudah Penyetelan Hyperparameter pada Berbagai Skema Validasi	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Alur Penelitian RFE dan XGBoost	24
--	----



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	56
Keterangan Variabel dan Satuan.....	56
Tabel Data Lengkap (1990–2023)	56
Lampiran 2	57
Blok 0 — Setup & Verifikasi Data	57
Blok 1 — Pembagian Data Tiga-Lapis	58
Blok 2 — Multikolinearitas (VIF, data latih n=22)	59
Blok 3 — XGBoost Baseline (5 fitur, hold-out).....	60
Blok 4 — XGBoost + RFE (RFECV, estimator Random Forest)	61
Blok 5 — MLR Baseline (Regresi Linear Berganda, 5 fitur).....	62
Blok 6 — Rekayasa Fitur: Polynomial & PCA	63
Blok 7 — Model Pendukung: Ridge, SVR-linear, SVR-RBF.....	64
Blok 8 — Walk-Forward (MLR & XGBoost).....	65
Blok 9 — Univariat Lag-1 (Regresi Linear, Naive, XGBoost)	67
Blok 10 — Perbandingan Faktor Dominan: XGBoost importances vs RFE-RF ranking.....	68
Blok 11 — Rekap Metrik Seluruh Model.....	69
Blok 12 — Hyperparameter tuning (Tanpa penyetelan, <i>hold-out</i> , <i>5-fold CV</i> , <i>TimeSeriesSplit</i>)	71