

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN TIM PEMBIMBING.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN TIM PENGUJI	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	iv
PRAKATA.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xiii
ABSTRAK	xv
ABSTRACT.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Penelitian	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Keaslian dan Kontribusi Penelitian.....	5
1.6 Manfaat Penelitian	9
1.6.1 Manfaat bagi Dunia Akademik	9
1.6.2 Manfaat bagi Masyarakat dan Industri.....	9
1.7 Sistematika Penulisan	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	11
2.1 Tinjauan Pustaka.....	11
2.1.1 Konsep Dasar Stabilitas Frekuensi.....	11
2.1.2 Pendekatan Berbasis <i>Machine Learning</i> untuk Deteksi Kestabilan Frekuensi.....	14
2.1.3 Penerapan <i>Support Vector Machine</i> dalam Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga	14
2.1.4 Penerapan <i>Random Forest</i> dalam Deteksi Kestabilan Sistem Tenaga	15
2.1.5 Penerapan XGBoost dalam Deteksi dan Prediksi Kestabilan Frekuensi	16
2.1.6 Validasi Model <i>Machine Learning</i> Menggunakan Sistem IEEE 39-Bus	16
2.2 Landasan Teori	17
2.2.1 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	17
2.2.2 Konsep <i>Frequency Stability</i>	19
2.2.2.1 Frekuensi Nadir	21
2.2.2.2 Frekuensi <i>rebound</i>	21

2.2.2.3	Fenomena <i>Frequency Excursion</i>	22
2.2.3	<i>Machine Learning</i>	23
2.2.3.1	<i>Supervised Learning</i>	24
2.2.4	<i>Support Vector Machine</i>	25
2.2.5	<i>Random Forest</i>	29
2.2.6	<i>Extreme Gradient Boosting</i>	32
2.2.7	Evaluasi Model <i>Machine Learning</i>	36
2.2.8	<i>Modified IEEE 39-Bus Test System</i>	38
2.2.9	Parameter Operasional Sistem Tenaga Listrik	39
2.2.9.1	<i>Load Scales</i>	39
2.2.9.2	<i>On Status</i>	39
2.2.9.3	<i>Dispatch</i>	39
2.2.10	Simulasi Perangkat Lunak	40
2.2.10.1	Visual Studio Code	40
2.2.10.2	DigSILENT PowerFactory	41
2.3	Pertanyaan Penelitian	41
2.4	Hipotesis	41
BAB III	Metode Penelitian	43
3.1	Alat dan bahan Penelitian	43
3.2	Alur Penelitian	45
3.3	Pembangkitan Dataset dan Desain Skenario Simulasi	46
3.3.1	Kerangka Kerja Pembangkitan Skenario	46
3.3.2	Komponen Skenario dan Logika Kombinasi	47
3.4	Pengumpulan Data	49
3.4.1	Membangun <i>Test System Model</i>	50
3.4.2	Pengaturan <i>Operasional Condition</i>	52
3.4.3	<i>Output</i> Simulasi dan Proses Pelabelan Data	54
3.4.3.1	Variasi Pembebanan Sistem Tenaga	54
3.4.3.2	Variasi Pembebanan Generator dan Pengaturan <i>Dispatch</i>	55
3.4.3.3	Simulasi RMS – Elemen dan Konfigurasi Sistem	56
3.4.3.4	Evaluasi Frekuensi Nadir dan Frekuensi <i>rebound</i>	58
3.4.3.5	Proses Pelabelan Kestabilan	59
3.5	Pemilihan dan Perancangan Model	60
3.5.1	<i>Pre-processing</i> Data	60
3.5.2	Implementasi Metode	61
3.5.2.1	Konfigurasi Nilai <i>Hyperparameter</i> Algoritma Model	62
3.5.2.2	Evaluasi Algoritma Model	64
BAB IV	HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	67
4.1	Deskripsi Dataset dan Hasil Simulasi Sistem IEEE 39-Bus	67
4.1.1	Konfigurasi Sistem dan Skenario Simulasi	67
4.1.2	Format Data dan Skema Pelabelan Kestabilan Frekuensi	68
4.1.3	Visualisasi Statistik Dataset	74

4.2	Pengaturan dan Optimasi Model.....	77
4.2.1	Metode <i>Tuning hyperparameter</i>	77
4.2.2	<i>hyperparameter</i> Penting Tiap Model.....	78
4.2.3	Proses <i>Tuning</i> dan Validasi	80
4.2.4	Hasil <i>Tuning hyperparameter</i> Terbaik	81
4.3	Evaluasi Kinerja Model Secara Kuantitatif	83
4.3.1	Hasil <i>Cross-Validation Accuracy</i>	83
4.3.2	<i>Accuracy</i> pada Data <i>Training</i> , <i>Validation</i> , dan <i>Test</i>	85
4.3.3	Analisis Perbedaan Akurasi dan Implikasinya.....	85
4.4	Analisis Hasil Klasifikasi	86
4.4.1	Skenario Sistem Stabil	86
4.4.2	Skenario Sistem Tidak Stabil.....	87
4.4.3	Penyajian <i>Classification Report</i>	88
4.4.4	Performa Tiap Model dalam Mendeteksi Kelas Stabil dan Tidak Stabil	89
4.4.5	Pentingnya Perbedaan Metrik dalam Deteksi Kestabilan Frekuensi.	92
4.4.5.1	<i>Recall</i> Tinggi pada Kelas Tidak Stabil: Kritis untuk <i>Early Warning</i>	92
4.5	Analisis <i>Confusion Matrix</i>	93
4.6	Diskusi Perbandingan Model	97
4.7	Implikasi Praktis dan Keterbatasan Penelitian.....	100
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	102
5.1	Kesimpulan	102
5.2	Saran.....	102
	DAFTAR PUSTAKA	105
	LAMPIRAN	L-1
	Lampiran 1: Dataset dan Source Code	L-1

Tabel 1.1	Perbandingan Penelitian Terdahulu yang Relevan terhadap klasifikasi kestabilan frekuensi menggunakan <i>machine learning</i> pada sistem tenaga listrik.....	8
Tabel 2.1	Definisi Kurva UFLS untuk <i>Overfrequency</i> berdasarkan NERC PRC-006-2	22
Tabel 2.2	Definisi Kurva UFLS untuk <i>Underfrequency</i> berdasarkan NERC PRC-006-2	22
Tabel 3.1	Nilai <i>Dispatch</i> Daya Aktif dan Daya Reaktif pada Generator	51
Tabel 3.2	Ringkasan Pengaturan Kondisi Operasional dalam Simulasi.	52
Tabel 3.3	<i>Hyperparameter space</i> untuk XGBoost	62
Tabel 3.4	<i>Hyperparameter space</i> untuk RF	63
Tabel 3.5	<i>Hyperparameter space</i> untuk SVM-RBF	63
Tabel 4.1	<i>Accuracy</i> pada Data <i>Training</i> , <i>Validation</i> , dan <i>Test</i>	85
Tabel 4.2	<i>Classification Report</i> RF	89
Tabel 4.3	<i>Classification Report</i> XGBoost	90
Tabel 4.4	<i>Classification Report</i> SVM-RBF	90
Tabel 4.5	Perbandingan Kinerja dan Karakteristik Model	98

Gambar 2.1	Klasifikasi stabilitas sistem tenaga (<i>power system stability</i>) berdasarkan P.Kundur [38].	18
Gambar 2.2	Ilustrasi respons frekuensi sistem tenaga listrik setelah terjadinya gangguan besar. [39]	20
Gambar 2.3	Kurva performa <i>Underfrequency</i> dan <i>Overfrequency</i> berdasarkan standar NERC PRC-006-2 [28].....	22
Gambar 2.4	Prinsip <i>maximum margin classifier</i> pada SVM untuk Kasus <i>Linearly Separable</i>	26
Gambar 2.5	Himpunan Data yang Tidak Dapat Dipisahkan Secara Linier (<i>Non Linearly Separable</i>).	27
Gambar 2.6	Himpunan Data yang Tidak Dapat Dipisahkan Secara Linier (<i>Non Linearly Separable</i>).	28
Gambar 2.7	Arsitektur klasifikasi RF	30
Gambar 2.8	Arsitektur <i>decision tree</i> didalam RF	30
Gambar 2.9	Ilustrasi Konseptual Proses <i>Boosting</i>	33
Gambar 2.10	Visualisasi Sebuah Pohon Keputusan <i>weak learner</i> Tunggal dalam <i>Ensemble XGBoost</i>	34
Gambar 2.11	<i>Struktur dan Metrik Evaluasi Berdasarkan Confusion Matrix</i>	37
Gambar 3.1	Alur Penelitian	45
Gambar 3.2	Alur Pengumpulan Data Deteksi Stabilitas Frekuensi	49
Gambar 3.3	<i>Single Line Diagram of Modified IEEE 39 Bus</i>	50
Gambar 3.4	Berbagai kondisi kestabilan frekuensi sistem setelah gangguan	60
Gambar 3.5	Ilustrasi Proses Validasi Silang dengan Skema <i>K-Fold Cross Validation</i> [58]	64
Gambar 3.6	Struktur dan Metrik Evaluasi Berdasarkan <i>Confusion Matrix</i>	65
Gambar 4.1	Data Mentah Profil Respons Frekuensi Sistem untuk Skenario Kontingensi N-1 Terpilih.....	69
Gambar 4.2	Label Distribusi Kestabilan Sistem Tenaga	71
Gambar 4.3	Profil beban (Load) pada bus sistem dari berbagai skenario (1).	72
Gambar 4.4	Profil beban (Load) pada bus sistem dari berbagai skenario (2).	72
Gambar 4.5	Parameter daya aktif (P, MW) setiap unit generator dari berbagai skenario operasional.	72
Gambar 4.6	Parameter daya reaktif (Q, MVar) setiap unit generator dari berbagai skenario operasional.....	73
Gambar 4.7	Parameter data frekuensi nadir, <i>rebound</i> , dan hasil pelabelan kestabilan sistem.	73
Gambar 4.8	Boxplot Frekuensi Nadir dan <i>Rebound</i> berdasarkan Kelas Kestabilan	75
Gambar 4.9	Hubungan Q Generator terhadap Frekuensi Nadir dan <i>Rebound</i> ...	76
Gambar 4.10	Hubungan P Generator terhadap Frekuensi Nadir dan <i>Rebound</i>	76

Gambar 4.11	Hubungan Load Scales terhadap Frekuensi Nadir dan <i>Rebound</i>	77
Gambar 4.12	Hasil pencarian akurasi validasi silang pada berbagai kombinasi <i>hyperparameter</i> model XGBoost.	82
Gambar 4.13	Plot akurasi validasi silang pada kombinasi <i>hyperparameter</i> RF. ..	83
Gambar 4.14	Akurasi validasi silang hasil tuning <i>hyperparameter</i> pada model SVM-RBF.	84
Gambar 4.15	Distribusi Akurasi <i>Cross-Validation</i> dari Model Terbaik	84
Gambar 4.16	Parameter <i>input</i> permintaan beban pada kasus stabil.	86
Gambar 4.17	Parameter <i>input</i> daya aktif dan reaktif pada kasus stabil.	87
Gambar 4.18	Parameter <i>input</i> permintaan beban pada kasus tidak stabil.	88
Gambar 4.19	Parameter <i>input</i> daya aktif dan reaktif pada kasus tidak stabil.....	89
Gambar 4.20	Confusion Matrices untuk Data <i>Training</i> , <i>Validation</i> , dan <i>Test</i> pada Model XGBoost.....	94
Gambar 4.21	<i>Confusion Matrices</i> untuk Data <i>Training</i> , <i>Validation</i> , dan <i>Test</i> pada Model RF.....	95
Gambar 4.22	<i>Confusion Matrices</i> untuk Data <i>Training</i> , <i>Validation</i> , dan <i>Test</i> pada Model SVM.....	96