

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
INTISARI	xvii
ABSTRACT.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	8
1.3 Batasan Masalah	9
1.4 Tujuan Penelitian	9
1.5 Manfaat Penelitian	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1 <i>Microgreens</i> Brokoli (<i>Brassica oleracea</i>)	11
2.2 Pengukuran Protein	12
2.3 <i>Plant Factory</i>	14
2.4 Teknologi Pencitraan Hiperspektral (<i>Hyperspectral Imaging</i> /HSI) ..	15
2.4.1 Prinsip Dasar <i>Hyperspectral Imaging</i> (HSI).....	15
2.4.2 Hubungan Spektrum dengan Kandungan Protein Tanaman....	18
2.4.3 Indeks Vegetasi untuk Analisis Spektral	20
2.4.4 Kamera Hiperspektral Specim IQ.....	21
2.5 <i>Machine learning</i> untuk Prediksi Kandungan Protein.....	23
2.5.1 Regresi Linear dengan Regularisasi (Ridge, Lasso, ElasticNet) 23	
2.5.2 <i>Leave-One-Out Cross-Validation</i> (LOOCV).....	25

2.6 Prapemrosesan Spektral.....	27
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Kerangka Pikir	28
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	30
3.2.1 Alat.....	30
3.2.2 Bahan.....	46
3.3 Waktu dan Tempat Penelitian	51
3.3.1 Waktu	51
3.3.2 Tempat Penelitian.....	51
3.4 Prosedur Penelitian.....	51
3.4.1 Persiapan dan Budidaya <i>Microgreens</i>	53
3.4.2 Akuisisi Data Hiperspektral dan Fisiologis.....	54
3.4.3 Analisis Laboratorium Metode Kjeldahl	56
3.4.4 Praproses Data dan Ekstraksi Fitur	57
3.4.5 Pembangunan Model <i>Machine learning</i>	61
3.4.6 Validasi Model	63
3.5 Analisis Data	64
3.5.1 Praproses Citra Hiperspektral.....	65
3.5.2 Perhitungan Indeks Vegetasi.....	66
3.5.3 Rekayasa Fitur.....	68
3.5.4 Seleksi Pita Spektral dengan Skor VIP	70
3.5.5 Pemodelan Regresi Berpenalti	71
3.5.6 Metriks Evaluasi Model	72
3.5.7 Validasi Silang <i>Leave-One-Out Cross-Validation</i> (LOOCV)	74
3.5.8 Validasi <i>Bootstrap</i> 500 iterasi	74
3.5.9 Uji Y-Randomisasi 200 Permutasi.....	75
3.5.10 Diagnostik Residual dan Stabilitas Koefisien	75
3.5.11 Interpretasi Model dengan Analisis SHAP	77
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	78

4.1 Karakteristik Data	78
4.1.1 Rancangan Perlakuan dan Data Sampel.....	78
4.1.2 Statistik Deskriptif Kandungan Protein.....	81
4.1.3 Karakteristik Parameter Fisiologis	84
4.1.4 Profil Spektral Reflektansi dan Segmentasi Citra	85
4.1.5 Peta Spasial Indeks Vegetasi	90
4.1.6 Korelasi Spektral dan Fisiologis terhadap Kandungan Protein	93
4.2 Hasil Pengembangan Model Prediksi Kandungan Protein.....	96
4.2.1 Praproses dan Transformasi Target	97
4.2.2 Model Index Based: Benchmarking Varian Dataset	99
4.2.3 Seleksi Fitur Optimal dan Penetapan Model Final <i>Index Based</i>	102
4.2.4 Model <i>Fullband: Benchmarking</i> 112 Kombinasi.....	108
4.2.5 Eksperimen Reduksi Dimensi Terfokus.....	113
4.2.6 Perbandingan Komprehensif <i>Index-Based</i> Vs Spektrum Penuh	114
4.3 Hasil Validasi Model Prediksi.....	117
4.3.1 <i>Leave-One-Out Cross-Validation</i>: Prediksi Per Sampel	118
4.3.2 Bootstrap 500 Iterasi dan Y-Randomization 200 Iterasi	122
4.3.3 Diagnostik Residual.....	124
4.3.4 Kategorisasi Mutu Protein dan Matriks Konfusi.....	125
4.3.5 Analisis Kecukupan Data: <i>Learning Curve</i>.....	127
4.4 Implikasi dan Penerapan.....	130
4.4.1 Analisis SHAP: Mekanisme Prediksi dalam Perlakuan	130
Mikroalga	130
4.4.2 Interpretasi Spektral Model <i>Fullband</i>: Dominasi NIR.....	133
4.4.3 Implikasi Rekayasa untuk Optimasi pada Sistem <i>Plant factory</i>	135

4.4.4 Skenario Penerapan Model pada Siklus Produksi <i>Plant Factory</i>	137
4.4.5 Keterbatasan Penelitian.....	142
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	143
5.1 Kesimpulan	143
5.2 Saran.....	145
DAFTAR PUSTAKA	147
LAMPIRAN.....	158
Lampiran 1. Hasil Pengujian Total Protein (%) di Laboratorium Pusat Studi Pangan dan Gizi UGM	158
Lampiran 2. Data Mentah Parameter Fisiologis per Sampel	159
Lampiran 3. Hasil Prediksi LOOCV Pada Seluruh Sampel.....	160
Lampiran 4. Kode Program Pengembangan Sistem Prediksi Kandungan Protein	161
Lampiran 5. Dokumentasi Kegiatan Penelitian	177