

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	6
1.3. Pertanyaan Penelitian.....	8
1.4. Tujuan Penelitian	9
1.5. Manfaat Penelitian	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1. Pantulan Spektral Objek Vegetasi	11
2.2. Penginderaan Jauh Hiperspektral untuk Vegetasi.....	12
2.3. Karakteristik Citra PRISMA.....	14
2.4. Biomassa Vegetasi Tegakan	16
2.5. Stok Karbon Vegetasi Tegakan	17
2.6. Persamaan Alometrik.....	18
2.7. <i>Machine Learning</i>	21
2.8. <i>Random Forest</i>	22
2.9. Pemilihan Variabel.....	26
2.9.1. <i>Stepwise Regression</i>	26
2.9.2. Algoritma Boruta	27
2.10. Telaah Penelitian Sebelumnya.....	29
2.11. Kerangka Pemikiran.....	38
2.12. Batasan Operasional.....	41
BAB III METODE PENELITIAN.....	43
3.1. Deskripsi Wilayah Kajian	43
3.1.1. Letak Geografis dan Batas Area Kajian.....	43

3.1.2.	Karakteristik Wilayah Kajian.....	43
3.2.	Alat dan Bahan Penelitian.....	46
3.2.1.	Alat Penelitian.....	46
3.2.2.	Bahan Penelitian.....	46
3.3.	Pra-Pemrosesan Citra.....	47
3.3.1.	Penyesuaian Format Data.....	47
3.3.2.	Koreksi Geometrik.....	47
3.3.3.	<i>Masking</i> Awan.....	48
3.3.4.	Koreksi Topografi.....	48
3.3.5.	<i>Spectral Smoothing</i>	50
3.3.6.	Pemilihan Saluran (<i>Band Removal</i>).....	50
3.4.	Ekstraksi Penutup Lahan.....	50
3.5.	Penentuan Sampel.....	51
3.5.1.	Transformasi Indeks Vegetasi dengan <i>Narrowband</i> -NDVI.....	51
3.5.2.	Teknik Sampling.....	52
3.5.3.	Ukuran Plot Sampel.....	53
3.6.	Pengumpulan Data Biomassa Vegetasi Tegakan Atas Permukaan.....	54
3.6.1.	Pengukuran <i>Diameter at Breast Height</i> (DBH).....	54
3.6.2.	Perhitungan Nilai Biomassa.....	54
3.6.3.	Konversi Nilai Biomassa ke Nilai Stok Karbon.....	55
3.7.	Pemilihan Variabel Optimal Citra PRISMA.....	55
3.7.1.	<i>Stepwise Regression</i>	55
3.7.2.	Algoritma Boruta.....	56
3.8.	Estimasi Nilai Stok Karbon dengan <i>Random Forest</i>	57
3.9.	Analisis Perbandingan Model Estimasi Stok Karbon.....	58
3.10.	Diagram Alir.....	62
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	63
4.1.	Pra-Pemrosesan Citra.....	63
4.1.1.	Koreksi Geometrik.....	63
4.1.2.	<i>Masking</i> Awan.....	67
4.1.3.	Koreksi Topografi.....	68
4.1.4.	<i>Spectral Smoothing</i>	71
4.1.5.	Pemilihan Saluran (<i>Band Removal</i>).....	72
4.2.	Penutup Lahan.....	75

4.2.1.	Klasifikasi Penutup Lahan Tentatif.....	75
4.2.2.	Reinterpretasi Penutup Lahan	77
4.3.	Penentuan dan Pengambilan Sampel Lapangan	86
4.3.1.	Transformasi Indeks Vegetasi (<i>Narrowband</i> NDVI).....	86
4.3.2.	Sampel Lapangan	89
4.3.3.	Hasil Survei Lapangan	90
4.4.	Hasil Perhitungan Stok Karbon Lapangan.....	92
4.5.	Pemilihan Variabel Optimal Citra PRISMA.....	96
4.5.1.	<i>Stepwise Regression</i>	96
4.5.2.	Algoritma Boruta	107
4.5.3.	<i>Selected Variable</i>	111
4.6.	Model Estimasi Stok Karbon Vegetasi Tegakan dengan <i>Random Forest</i>	124
4.6.1.	<i>Regression Random Forest</i>	124
4.6.2.	Hasil Estimasi Stok Karbon Vegetasi Tegakan	129
4.7.	Analisis Perbandingan Akurasi Model Estimasi Stok Karbon Vegetasi Tegakan.....	137
4.7.1.	<i>R-Square</i> dan <i>Adjusted R-Square</i>	137
4.7.2.	Tingkat Kesalahan Prediksi Model (Nilai Error) dan Akurasi Model	139
4.7.3.	Bias dan Plot 1:1 Sampel Uji	140
4.7.4.	Analisis Perbandingan Model	144
4.8.	Sebaran Spasial Stok Karbon Vegetasi Tegakan di Sebagian Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Hasil Estimasi Model Terbaik.....	146
4.9.	Diskusi	157
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		161
5.1.	Kesimpulan	161
5.2.	Saran	162
DAFTAR PUSTAKA		164
LAMPIRAN		175

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Karakteristik Citra Hiperspektral PRISMA	15
Tabel 2.2. Sumber Karbon (<i>Carbon Pool</i>)	18
Tabel 2.3. Persamaan Alometrik Ekosistem (<i>Mixed Allometric</i>) Menurut Beberapa Ahli.....	20
Tabel 2.4. Perbandingan Telaah Penelitian Sebelumnya	33
Tabel 3.1. Skema Klasifikasi Tutupan Lahan	51
Tabel 4.1. Perubahan Nilai Spektral Citra PRISMA Sebelum dan Sesudah Koreksi Topografi	71
Tabel 4.2. Perbandingan Kenampakan Tutupan Lahan di Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu	78
Tabel 4.3. Nilai NDVI Sampel Lapangan	90
Tabel 4.4. Tabel Perhitungan Stok Karbon Lapangan	92
Tabel 4.5. Nilai <i>p-value</i> Variabel Prediktor Terpilih dari <i>Bidirection Stepwise Regression</i> – AIC	97
Tabel 4.6. Keterangan Grafik Contoh <i>Bidirection Step Regression</i> – AIC.....	98
Tabel 4.7. Rangkuman Pemilihan Variabel dengan <i>Stepwise Regression</i> Beserta Hasilnya Menggunakan Beberapa Kombinasi Parameter.....	100
Tabel 4.8. Band/Saluran Hiperspektral PRISMA Terpilih Berdasarkan <i>Stepwise Regression</i> (Kombinasi Parameter 1 – 8) serta Algoritma Boruta ($\alpha = 0,01$ dan $\alpha=0,05$)	112
Tabel 4.9. Korelasi Saluran Spektral Terpilih dan Stok Karbon Lapangan	116
Tabel 4.10. Rangkuman Variabel serta Parameter yang digunakan dalam Pemodelan	125
Tabel 4.11. Akurasi <i>Cross-Validation</i>	127
Tabel 4.12. Akurasi Model pada Data <i>Training</i>	127
Tabel 4.13. Statistik Nilai Stok Karbon Vegetasi Tegakan pada Keenam Model	130
Tabel 4.14. Perbandingan Nilai Stok Karbon Lapangan dan Hasil Estimasi Model pada Sampel Validasi	137
Tabel 4.15. Perbandingan Tingkat Kesalahan Prediksi Model dan Akurasi Model	139
Tabel 4.16. Nilai Stok Karbon di Berbagai Tipe Hutan	150

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Struktur Daun Hijau dan Interaksinya dengan Gelombang Elektromagnetik	12
Gambar 2.2. Kurva Pantulan Spektral Objek Vegetasi	12
Gambar 2.3. Struktur Model <i>Decision Tree</i>	23
Gambar 2.4. <i>Random Decision Tree</i>	25
Gambar 2.5. Cara Kerja (a) <i>Forward Stepwise</i> dan (b) <i>Backward Stepwise</i>	27
Gambar 2.6. Skema Kerangka Pemikiran Penelitian	40
Gambar 3.1. Peta Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Berdasarkan Zonasi Wilayah	45
Gambar 3.2. <i>Clustered Sampling</i>	52
Gambar 3.3. Plot Sampel Lapangan	53
Gambar 3.4. Ilustrasi Sampel Lapangan.....	53
Gambar 3.5. Pengukuran <i>Diameter at Breast Height</i> (DBH) pada Berbagai Geometri Pohon	54
Gambar 3.6. Diagram Alir.....	62
Gambar 4.1. Sebaran Titik GCP pada (a) Citra Landsat 8 OLI dan (b) Citra Hiperspektral PRISMA Komposit <i>False Color</i>	63
Gambar 4. 2. Detail Sebaran GCP di Ujung Igir atau Bukit pada (a) Citra Landsat 8 OLI dan (b) Citra PRISMA.....	64
Gambar 4.3. Detail Sebaran GCP di Pesimpangan Jalan dan Bangunan pada (a) Citra Landsat 8 OLI dan (b) Citra PRISMA	65
Gambar 4.4. RMS <i>Error</i> Koreksi Geometrik Citra PRISMA	65
Gambar 4.5. Citra PRISMA (a) Sebelum Koreksi Geometrik dan (b) Sesudah Koreksi Geometrik.....	66
Gambar 4.6. Identifikasi Awan dan Bayangan Awan Melalui Interpretasi Visual	67
Gambar 4.7. Hasil Masking Awan pada Citra PRISMA.....	68
Gambar 4.8. (a) Peta Kemiringan Lereng (Slope) dan (b) Peta Arah Hadap Lereng (Aspect) Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu	68
Gambar 4.9. Peta Iluminasi Matahari Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu	69
Gambar 4.10. Citra PRISMA Komposit Warna Semu (Band 121-53-31/SWIR-NIR-Red) (a) Sebelum Koreksi Topografi dan (b) Setelah Koreksi Topografi....	70
Gambar 4.11. Kurva Pantulan Spektral Citra PRISMA (a) Sebelum dilakukan <i>Spectral Smoothing</i> dan (b) Sesudah <i>Spectral Smoothing</i>	72
Gambar 4.12. <i>Atmospheric Water Absorption Bands</i> pada Kurva Pantulan Spektral Objek Vegetasi Sebelum <i>Spectral Smoothing</i>	73
Gambar 4.13. Band 44 SWIR, Band 94 SWIR, dan Band 170 SWIR	74
Gambar 4.14. Band 108 SWIR, Band 109 SWIR, dan Band 110 SWIR	75
Gambar 4.15. Identifikasi <i>Training Sample</i> Kelas Penutup Lahan pada Citra PRISMA Komposit <i>False Color Standar</i>	76
Gambar 4.16. Peta Penutup Lahan Tentatif Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu	77
Gambar 4.17. Tebing Sebelah Barat Daya Pos 2 Jalur Pendakian Wekas	80

Gambar 4.18. (a) Tembelekan (<i>Lantana camara</i> Linn.) dan (b) Arbei Gunung (<i>Rubus</i> sp.)	81
Gambar 4.19. Cantigi atau Manis Rejo (<i>Vaccinium varingiaefolium</i>)	82
Gambar 4.20. Urang-urang (<i>Debregeasia longifolia</i>)	82
Gambar 4.21. Eidelweiss (<i>Anaphalis javanica</i>)	82
Gambar 4.22. (a) Pinus (<i>Pinus merkusii</i>) dan (b) Cemara Gunung (<i>Casuarina junghuniana</i>)	83
Gambar 4.23. (a) Puspa (<i>Schima wallichii</i>) dan (b) Pampung (<i>Macropanax dispermus</i>)	84
Gambar 4.24. Akasia dekuren (<i>Acacia decurrens</i>)	84
Gambar 4.25. Peta Penutup Lahan Hasil Reinterpretasi Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Tahun 2022	85
Gambar 4.26. Peta Indeks Narrowband-NDVI Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Tahun 2022	87
Gambar 4.27. Peta Sebaran Sampel Lapangan pada Tutupan Vegetasi Tegakan di Sebagian Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Tahun 2022	88
Gambar 4.28. Pengukuran Keliling Pohon di Lapangan	91
Gambar 4.29. Kondisi Lapangan Subsampel Kode 28A1	94
Gambar 4.30. Kondisi Lapangan Subsampel Kode 2T1	95
Gambar 4.31. Kondisi Lapangan Subsampel Kode 9A1	95
Gambar 4.32. Grafik Contoh Proses Seleksi Variabel dengan <i>Bidirection Stepwise Regression</i> – AIC	98
Gambar 4.33. Histogram Data Terdistribusi Normal	101
Gambar 4.34. Histogram Data Tidak Terdistribusi Normal	102
Gambar 4.35. Uji Asumsi Model Regresi <i>Stepwise Regression</i> I	104
Gambar 4.36. Uji Asumsi Model Regresi <i>Stepwise Regression</i> II	105
Gambar 4.37. Uji Asumsi Model Regresi <i>Stepwise Regression</i> III	106
Gambar 4.38. Uji Asumsi Model Regresi <i>Stepwise Regression</i> IV	107
Gambar 4.39. (a) 5 Variabel Terpilih dengan 4 Variabel Tentatif dan (b) 7 Variabel Terpilih Tanpa Variabel Tentatif, dari Algoritma Boruta ($\alpha = 0,01$) dengan Total 185 Band	109
Gambar 4.40. (a) 7 Variabel Terpilih dengan 3 Variabel Tentatif dan (b) 10 Variabel Terpilih Tanpa Variabel Tentatif, dari Algoritma Boruta ($\alpha = 0,05$) dengan Total 185 Band	110
Gambar 4.41. Kurva Pantulan Spektral Vegetasi Tegakan di Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu pada Citra Hipersepktral PRISMA	113
Gambar 4.42. Variabel Prediktor Terpilih Berdasarkan <i>Stepwise Regression</i> Kombinasi Parameter ke-1 (Model <i>Stepwise Regression</i> I)	118
Gambar 4.43. Variabel Prediktor Terpilih Berdasarkan <i>Stepwise Regression</i> Kombinasi Parameter ke-2 (Model <i>Stepwise Regression</i> II)	120
Gambar 4.44. Variabel Prediktor Terpilih Berdasarkan <i>Stepwise Regression</i> Kombinasi Parameter ke-3,4,5,6 (Model <i>Stepwise Regression</i> III)	120
Gambar 4.45. Variabel Prediktor Terpilih Berdasarkan <i>Stepwise Regression</i> Kombinasi Parameter ke-7 dan 8 (Model <i>Stepwise Regression</i> IV)	121
Gambar 4.46. Variabel Prediktor Terpilih Berdasarkan Boruta $\alpha = 0,01$ (Model Boruta I)	122
Gambar 4.47. Variabel Prediktor Terpilih Berdasarkan Boruta $\alpha = 0,05$ (Model Boruta II)	124

Gambar 4.48. Nilai Importance Variabel Prediktor pada <i>Regression Random Forest</i>	129
Gambar 4.49. Perbandingan Total Stok Karbon Vegetasi Tegakan.....	130
Gambar 4.50. Perbandingan Model Estimasi Stok Karbon Vegetasi Tegakan ..	131
Gambar 4.51. Kondisi Lapangan Subsampel (a) 17B1, (b) 17B2, dan (c) 17B3	133
Gambar 4.52. Kondisi Lapangan Subsampel (a) 9A1, (b) 19A, dan (c) 9A2 ...	134
Gambar 4.53. Kondisi Lapangan Subsampel 1A2	134
Gambar 4.54. Grafik Plot 1:1 Perbandingan Nilai Stok Karbon Vegetasi Tegakan Model dan Lapangan pada Sampel Model.....	136
Gambar 4.55. Perbandingan Nilai <i>R-Square</i> dan <i>Adjusted R-Square</i>	138
Gambar 4.56. Perbandingan Nilai Bias Model.....	141
Gambar 4.57. Kondisi Subsampel (a) 10A1, (b) 25A1, dan (c) 11B1	142
Gambar 4.58. Grafik Plot 1:1 Perbandingan Nilai Stok Karbon Vegetasi Tegakan Model dan Lapangan pada Sampel Validasi	143
Gambar 4.59. Akurasi Model Stok Karbon Vegetasi Tegakan pada (a) Sampel Model dan (b) Sampel Validasi.....	145
Gambar 4.60. Peta Stok Karbon Vegetasi Tegakan Model Random Forest Boruta (I) di Sebagian Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Tahun 2022	147
Gambar 4.61. Peta Stok Karbon Vegetasi Tegakan Model Random Forest Boruta (I) di Sebagian Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Tahun 2022 (10 Kelas)	148
Gambar 4.62. Scatter Plot Stok Karbon dan Elevasi pada Tutupan Lahan Vegetasi.....	151
Gambar 4.63. Peta Penampang Melintang Kawasan TNGMb pada (a) Model Estimasi Stok Karbon dan (b) Zonasi TNGMb.....	153
Gambar 4.64. Nilai Cadangan Karbon dan Karakteristik Topografi pada (a) Profil Melintang 1; (b) Profil Melintang 2; (c) Profil Melintang 3; (d) Profil Melintang 4	154
Gambar 4.65. Vegetasi Tegakan Akasia Dekuren dan Berbagai Jenis Semak/Perdu Lainnya di Pos 2 Jalur Pendakian Wekas	155

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Sampel Model dan Validasi	175
Lampiran 2. Hasil Pemilihan Variabel dengan Algoritma <i>Stepwise Regression</i>	176
Lampiran 3. Grafik Boxplot Hasil Pemilihan Variabel dengan Algoritma Boruta ($\alpha = 0,01$) dengan Variabel Tentatif.....	184
Lampiran 4. Grafik Boxplot Hasil Pemilihan Variabel dengan Algoritma Boruta ($\alpha = 0,01$) Tanpa Variabel Tentatif	185
Lampiran 5. Grafik Boxplot Hasil Pemilihan Variabel dengan Algoritma Boruta ($\alpha = 0,05$) dengan Variabel Tentatif.....	186
Lampiran 6. Grafik Boxplot Hasil Pemilihan Variabel dengan Algoritma Boruta ($\alpha = 0,05$) Tanpa Variabel Tentatif	187
Lampiran 7. Perbandingan Hasil Estimasi Stok Karbon dan Stok Karbon Lapangan pada Sampel Model	188
Lampiran 8. Peta Stok Karbon Vegetasi Tegakan Model <i>Random Forest</i> - Boruta (II) di Sebagian Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Tahun 2022	189
Lampiran 9. Peta Stok Karbon Vegetasi Tegakan Model <i>Random Forest</i> - <i>Stepwise Regression</i> (I) di Sebagian Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Tahun 2022	190
Lampiran 10. Peta Stok Karbon Vegetasi Tegakan Model <i>Random Forest</i> - <i>Stepwise Regression</i> (II) di Sebagian Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Tahun 2022	191
Lampiran 11. Peta Stok Karbon Vegetasi Tegakan Model <i>Random Forest</i> - <i>Stepwise Regression</i> (III) di Sebagian Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Tahun 2022	192
Lampiran 12. Peta Stok Karbon Vegetasi Tegakan Model <i>Random Forest</i> - <i>Stepwise Regression</i> (IV) di Sebagian Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu Tahun 2022	193
Lampiran 13. Peta Sebaran Titik Pusat Kluster Sampel Rencana di Sebagian Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu	194
Lampiran 14. Tabel Sampel Lapangan.....	195
Lampiran 15. Script R: Convert PRISMA	209
Lampiran 16. Script R: Koreksi Topografi (C-Correction).....	210
Lampiran 17. Script R: Mengganti NoData Citra	211
Lampiran 18. Script R: Klasifikasi Penutup Lahan.....	212
Lampiran 19. Script R: Pemilihan Variabel Menggunakan Algoritma Boruta dan Estimasi Stok Karbon dengan Algoritma Random Forest	216
Lampiran 20. Script R: Pemilihan Variabel Menggunakan Stepwise Regression dan Estimasi Stok Karbon dengan Algoritma Random Forest	219
Lampiran 21. Hasil Uji Normalitas Terhadap Seluruh Data	222
Lampiran 22. Histogram Seluruh Data	227