

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------------|
| HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING | iii |
| HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI..... | iv |
| SURAT PERNYATAAN | v |
| KARYA ASLI TUGAS AKHIR..... | v |
| PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI..... | vi |
| ABSTRAK..... | vii |
| ABSTRACT..... | viii |
| KATA PENGANTAR | ix |
| DAFTAR TABEL..... | xiv |
| DAFTAR GAMBAR..... | xv |
| DAFTAR MODUL PROGRAM..... | xvii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Batasan Masalah | 3 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 4 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 4 |
| 1.6 Tahapan Penelitian..... | 4 |
| 1.7 Sistematika Penulisan | 5 |
| BAB II TINJAUAN LITERATUR..... | 6 |
| 2.1 Dinamika Wilayah Pesisir dan Perubahan Garis Pantai | 6 |
| 2.2 Karakteristik dan Dinamika Pesisir Kabupaten Bantul | 8 |
| 2.3 Citra Sentinel-2 untuk Analisis Pesisir | 9 |
| 2.4 Indeks Air untuk Ekstraksi Air-Darat | 11 |
| 2.4.1 <i>Normalized Difference Water Index (NDWI)</i> | 12 |
| 2.4.2 <i>Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)</i> | 12 |
| 2.4.3 <i>Automated Water Extraction Index (AWEI)</i> | 13 |
| 2.4.4 Rata-Rata Indeks Air per Segmen | 13 |
| 2.5 <i>Threshold-based water masking</i> | 14 |
| 2.6 <i>Google Earth Engine</i> | 16 |
| 2.7 <i>Random Forest</i> | 16 |
| 2.8 Indikator Luas Air dan Perubahan Garis Pantai | 19 |
| 2.8.1 Luas Air (<i>water_area_ha</i>) | 19 |
| 2.8.2 Perubahan Luas Air (<i>water_area_change_ha</i>) | 20 |
| 2.8.3 Penentuan Kelas Perubahan Garis Pantai | 21 |
| 2.9 <i>Machine learning</i> dalam Klasifikasi Perubahan Garis Pantai | 21 |
| 2.10 Evaluasi Model Klasifikasi..... | 22 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.11 | Penelitian Terkait | 24 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... | | 31 |
| 3.1 | Metodologi Penelitian | 31 |
| 3.2 | Studi Literatur..... | 32 |
| 3.3 | Akuisisi Data Area Studi | 32 |
| 3.4 | <i>Preprocessing</i> Data di <i>Google Earth Engine</i> | 35 |
| 3.5 | <i>Preprocessing Dataset Training</i> | 38 |
| 3.6 | <i>Threshold-based water masking</i> | 40 |
| 3.6.1 | Klasifikasi Air-Daratan Menggunakan NDWI | 41 |
| 3.6.2 | Perhitungan Luas Area Air (<i>water_area_ha</i>) | 42 |
| 3.6.3 | Perhitungan Perubahan Luas Area Air (<i>water_area_change_ha</i>)..... | 42 |
| 3.6.4 | Ringkasan Parameter <i>Threshold-based water masking</i> | 43 |
| 3.7 | <i>Random Forest</i> sebagai <i>Main Classifier</i> dalam Pendekatan <i>Hybrid</i> | 43 |
| 3.7.1 | Pembentukan Label Perubahan Garis Pantai..... | 45 |
| 3.7.2 | Penanganan Ketidakseimbangan Kelas dengan SMOTE..... | 46 |
| 3.7.3 | Konfigurasi dan <i>Training Model Random Forest</i> | 47 |
| 3.7.4 | Ilustrasi Perhitungan <i>Gini Impurity</i> | 48 |
| 3.7.5 | Mekanisme Voting <i>Random Forest</i> dan Integrasi Hasil <i>Threshold-based</i> 49 | |
| 3.7.6 | Ilustrasi Mekanisme Prediksi dan <i>Majority Voting</i> | 49 |
| 3.7.7 | Kontribusi Fitur (<i>Feature Importance</i>)..... | 55 |
| 3.7.8 | Integrasi <i>Threshold-based</i> dan <i>Random Forest</i> dalam <i>Hybrid Approach</i> 55 | |
| 3.7.9 | Prosedur Evaluasi Model..... | 56 |
| 3.8 | Analisis Kebutuhan Sistem..... | 57 |
| 3.8.1 | Analisis Kebutuhan Fungsional..... | 57 |
| 3.8.2 | Analisis Kebutuhan Non-Fungsional | 58 |
| 3.9 | Perancangan Sistem..... | 58 |
| 3.9.1 | Perancangan Arsitektur Sistem..... | 59 |
| 3.9.2 | Perancangan Proses | 59 |
| 3.9.3 | Perancangan Antar Muka..... | 60 |
| 3.10 | Rancangan Evaluasi Model | 63 |
| BAB IV HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN..... | | 65 |
| 4.1 | Implementasi | 65 |
| 4.1.1 | Implementasi Akuisisi Data Area Studi..... | 65 |
| 4.1.2 | Implementasi <i>Preprocessing</i> Data di <i>Google Earth Engine</i> | 65 |
| 4.1.3 | Implementasi <i>Preprocessing Dataset training</i> | 67 |
| 4.1.4 | Implementasi <i>Threshold-based water masking</i> | 68 |

| | | |
|-----------------------------|---|------------|
| 4.1.5 | Implementasi <i>Random Forest</i> sebagai <i>Main Classifier</i> dalam Pendekatan <i>Hybrid</i> | 69 |
| 4.1.6 | Implementasi Penanganan Ketidakseimbangan Data dengan SMOTE... | 72 |
| 4.1.7 | Implementasi <i>Hyperparameter</i> Tuning dan Training Model <i>Random Forest</i> | 72 |
| 4.1.8 | Implementasi Prediksi dengan <i>Threshold</i> Probabilitas..... | 73 |
| 4.1.9 | Implementasi Evaluasi Model | 74 |
| 4.1.10 | Implementasi Pengujian Sistem..... | 75 |
| 4.2 | Hasil..... | 75 |
| 4.2.1 | Hasil Akuisisi Data Area Studi | 75 |
| 4.2.2 | Hasil <i>Preprocessing</i> Data di <i>Google Earth Engine</i> | 76 |
| 4.2.3 | Hasil Pembentukan <i>Dataset training</i> | 77 |
| 4.2.4 | Hasil Klasifikasi Berbasis <i>Threshold</i> | 79 |
| 4.2.5 | Hasil Pemodelan <i>Random Forest</i> | 80 |
| 4.2.6 | Visualisasi Spasial Prediksi Perubahan Garis Pantai..... | 83 |
| 4.2.7 | Hasil Evaluasi Model | 84 |
| 4.2.8 | Hasil Pengujian Sistem..... | 94 |
| 4.3 | Pembahasan | 97 |
| 4.3.1 | Evaluasi Hasil Model <i>Random Forest</i> | 97 |
| 4.3.2 | Analisis Kinerja Model dan Pengaruh Ketidakseimbangan Data | 98 |
| 4.3.3 | Implikasi Hasil terhadap Analisis Perubahan Garis Pantai | 99 |
| BAB V PENUTUP | | 101 |
| 5.1 | Kesimpulan..... | 101 |
| 5.2 | Saran | 101 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 102 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2. 1 Contoh <i>Confussion Matrix</i> | 22 |
| Tabel 2. 2 <i>State of The Art</i> | 24 |
| Tabel 2. 3 Lanjutan <i>State of The Art</i> | 25 |
| Tabel 2. 4 Lanjutan <i>State of The Art</i> | 26 |
| Tabel 2. 5 Lanjutan <i>State of The Art</i> | 27 |
| Tabel 2. 6 Lanjutan <i>State of The Art</i> | 28 |
| Tabel 2. 7 Lanjutan <i>State of The Art</i> | 29 |
| Tabel 3. 1 Contoh Data Akusisi Citra Sentinel-2 pada Area Studi | 33 |
| Tabel 3. 2 Lanjutan Contoh Data Akusisi Citra Sentinel-2 pada Area Studi | 34 |
| Tabel 3. 3 Lanjutan Contoh Data Akusisi Citra Sentinel-2 pada Area Studi | 35 |
| Tabel 3. 4 Data Indeks Spektral pada Segmen 405993932 (Tahun 2023) | 36 |
| Tabel 3. 5 Perhitungan Indeks Spektral pada Segmen 405993932 (Tahun 2023) | 37 |
| Tabel 3. 6 Rata-Rata Indeks Air pada Segmen 405993932 (Tahun 2023)..... | 38 |
| Tabel 3. 7 Ringkasan Fitur <i>Training Model Random Forest</i> | 39 |
| Tabel 3. 8 Lanjutan Ringkasan Fitur <i>Training Model Random Forest</i> | 40 |
| Tabel 3. 9 Hasil <i>Threshold-based water masking</i> Segmen 405993932 (Tahun 2023)..... | 43 |
| Tabel 3. 10 Distribusi Kelas Perubahan Garis Pantai | 46 |
| Tabel 3. 11 Distribusi Kelas Data training Sebelum dan Setelah Penerapan SMOTE | 47 |
| Tabel 3. 12 Spesifikasi Kebutuhan Perangkat Keras | 58 |
| Tabel 3. 13 Spesifikasi Kebutuhan Perangkat Lunak | 58 |
| Tabel 4. 1 Ringkasan Pemodelan <i>Random Forest</i> | 82 |
| Tabel 4. 2 <i>Confusion Matrix</i> Perubahan Garis Pantai (Data Uji 2024-2025) | 84 |
| Tabel 4. 3 Ringkasan <i>Precision, Recall, dan F1-Score</i> | 87 |
| Tabel 4. 4 Rincian Kesalahan Prediksi pada Data Uji | 88 |
| Tabel 4. 5 Data Salah Prediksi pada Kelas Aktual Abrasi | 88 |
| Tabel 4. 6 Data Salah Prediksi pada Kelas Aktual Akresi | 89 |
| Tabel 4. 7 Data Salah Prediksi pada Kelas Aktual Stabil..... | 90 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 1 Distribusi kanal multispektral Sentinel-2 MSI beserta fungsi utama tiap band. Sumber: eoPortal Directory, ESA (2015), dikutip dalam (Haas, 2016). | 10 |
| Gambar 2. 2 Proses <i>Random Forest</i> (Mulyawan, 2023)..... | 17 |
| Gambar 3. 1 Metodologi Penelitian | 31 |
| Gambar 3. 2 Area Studi Penelitian Pesisir Kabupaten Bantul | 33 |
| Gambar 3. 3 <i>Flowchart Threshold-based</i> water masking Berbasis NDWI | 41 |
| Gambar 3. 4 <i>Flowchart</i> Klasifikasi Perubahan Garis Pantai Menggunakan <i>Random Forest</i> | 45 |
| Gambar 3. 5 Ilustrasi Proses <i>Bootstrap Sampling</i> pada Pembentukan <i>Random Forest</i> | 50 |
| Gambar 3. 6 Ilustrasi Penentuan <i>Root Node</i> pada Salah Satu <i>Decision Tree</i> | 51 |
| Gambar 3. 7 Ilustrasi Pembentukan <i>Node</i> secara Rekursif pada <i>Decision Tree</i> | 52 |
| Gambar 3. 8 Ilustrasi Penetapan <i>Leaf Node</i> Berdasarkan Kelas Mayoritas..... | 53 |
| Gambar 3. 9 Ilustrasi Penelusuran Pohon pada Tahap Prediksi untuk Satu Segmen Input | 54 |
| Gambar 3. 10 Ilustrasi <i>Majority voting</i> Berbasis Probabilitas dengan <i>Threshold</i> 0,25 pada <i>Random Forest</i> | 55 |
| Gambar 3. 11 Rancangan Arsitektur Sistem | 59 |
| Gambar 3. 12 <i>Flowchart</i> Sistem..... | 60 |
| Gambar 3. 13 Halaman Tampilan Garis Pantai Multi-Temporal | 61 |
| Gambar 3. 14 Halaman Tampilan Segmen <i>Land/Water (Rule-Based NDWI)</i> | 61 |
| Gambar 3. 15 Halaman Tampilan Perubahan Garis Pantai (Per Kelas)..... | 62 |
| Gambar 3. 16 Halaman Trend dan Perubahan | 62 |
| Gambar 3. 17 Halaman Statistik Detail & Ekspor Data | 63 |
| Gambar 4. 1 Area Studi Wilayah Pesisir Kabupaten Bantul (<i>Region of Interest</i>)..... | 76 |
| Gambar 4. 2 Citra Sentinel-2 <i>Hasil Preprocessing (Cloud masking)</i> pada Area Studi Pesisir Kabupaten Bantul | 77 |
| Gambar 4. 3 Visualisasi Hasil Perhitungan Indeks NDWI pada Wilayah Pesisir Kabupaten Bantul Periode 2020-2025 | 78 |
| Gambar 4. 4 Visualisasi Hasil Perhitungan Indeks MNDWI pada Wilayah Pesisir Kabupaten Bantul Periode 2020-2025..... | 78 |
| Gambar 4. 5 Visualisasi Hasil Perhitungan Indeks AWEIsh pada Wilayah Pesisir Kabupaten Bantul Periode 2020-2025 | 78 |
| Gambar 4. 6 Visualisasi Hasil Klasifikasi Air-Daratan Berbasis <i>Threshold</i> NDWI..... | 79 |
| Gambar 4. 7 Visualisasi Hasil Ekstraksi Garis Pantai dari Klasifikasi Air-Daratan Berbasis <i>Threshold</i> | 79 |
| Gambar 4. 8 Distribusi Kelas <i>Data training</i> Sebelum Penerapan SMOTE..... | 81 |
| Gambar 4. 9 Distribusi Kelas <i>Data training</i> Setelah Penerapan SMOTE | 81 |
| Gambar 4. 10 Visualisasi Spasial Hasil Klasifikasi Perubahan Garis Pantai Menggunakan <i>Random Forest</i> | 84 |
| Gambar 4. 11 Visualisasi <i>Heatmap Confusion Matrix</i> Perubahan Garis Pantai (Data Uji 2024-2025) | 85 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4. 12 Akurasi Model <i>Random Forest</i> pada Lima <i>Fold GroupKFold Cross Validation</i> | 91 |
| Gambar 4. 13 Sepuluh Fitur dengan Nilai <i>Importance</i> Tertinggi pada Model <i>Random Forest</i> | 91 |
| Gambar 4. 14 Distribusi Fitur Utama: Prediksi Benar vs Salah (Data Uji 2024-2025)..... | 92 |
| Gambar 4. 15 Sebaran Sampel di Ruang Fitur dNDWI vs NDWI_mean (X = Salah Diprediksi)..... | 93 |
| Gambar 4. 16 Halaman Visualisasi Garis Pantai Multitemporal Wilayah Pesisir Kabupaten Bantul. | 94 |
| Gambar 4. 17 Halaman Visualisasi Segmentasi Darat-Air Berbasis Klasifikasi NDWI ... | 95 |
| Gambar 4. 18 Halaman Visualisasi Hasil Klasifikasi Perubahan Garis Pantai per Kelas.. | 95 |
| Gambar 4. 19 Halaman Visualisasi Tren dan Perubahan Garis Pantai Wilayah Pesisir Kabupaten Bantul. | 96 |
| Gambar 4. 20 Halaman Statistik Detail Hasil Klasifikasi Perubahan Garis Pantai dan Fitur Ekspor Data | 96 |

DAFTAR MODUL PROGRAM

| | |
|--|----|
| Modul Program 4. 1 Penentuan Area Studi..... | 65 |
| Modul Program 4. 2 <i>Cloud masking</i> dan Seleksi Band | 66 |
| Modul Program 4. 3 Pembuatan Komposit Tahunan | 66 |
| Modul Program 4. 4 Preprocessing <i>Dataset training</i> | 67 |
| Modul Program 4. 5 Klasifikasi Air-Daratan Menggunakan NDWI | 68 |
| Modul Program 4. 6 Perhitungan Luas Area Air | 69 |
| Modul Program 4. 7 Pemuatan <i>Dataset</i> dan <i>Library</i> | 69 |
| Modul Program 4. 8 <i>Feature Engineering</i> | 70 |
| Modul Program 4. 9 Pembentukan Label dengan Label <i>Cleaning</i> | 71 |
| Modul Program 4. 10 Pembagian Data | 71 |
| Modul Program 4. 11 Penerapan SMOTE pada <i>Data training</i> | 72 |
| Modul Program 4. 12 <i>Hyperparameter Tuning</i> dan <i>Training Model Random Forest</i> | 73 |
| Modul Program 4. 13 Prediksi dengan <i>Threshold</i> Probabilitas | 74 |
| Modul Program 4. 14 Evaluasi Model | 74 |
| Modul Program 4. 15 Pengujian Sistem | 75 |