

**PERBANDINGAN BERBAGAI ALGORITMA *MACHINE LEARNING*
UNTUK IDENTIFIKASI TUTUPAN LAHAN TERBUKA HIJAU DI
KOTAMADYA BANDAR LAMPUNG**

(Skripsi)

Oleh

Muhammad Rofi
2114151057



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PERBANDINGAN BERBAGAI ALGORITMA *MACHINE LEARNING* UNTUK IDENTIFIKASI TUTUPAN LAHAN TERBUKA HIJAU DI KOTAMADYA BANDAR LAMPUNG

Oleh

MUHAMMAD ROFI

Pertumbuhan penduduk yang pesat di Kotamadya Bandar Lampung memicu alih fungsi lahan, terutama berkurangnya Ruang Terbuka Hijau (RTH), sehingga diperlukan pemantauan dan analisis tutupan lahan yang akurat. Penelitian ini membandingkan kinerja tiga algoritma *machine learning* *Gaussian Mixture Model* (GMM), *Random Forest* (RF), dan *K-Nearest Neighbor* (KNN) dalam mengklasifikasikan tutupan lahan terbuka hijau menggunakan citra Sentinel-2A tahun 2025. Data primer diperoleh melalui survei lapangan untuk validasi (*ground truth*), sedangkan data sekunder berupa citra satelit dan peta administrasi diolah menggunakan QGIS dengan plugin Dzetsaka dan AcATaMa. Klasifikasi dilakukan secara supervised dengan 588 RoI yang mewakili kelas-kelas tutupan lahan. Hasil penelitian menunjukkan GMM memberikan performa terbaik dengan *Producer's Accuracy* (PA) RTH 94,53%, *Overall Accuracy* (OA) 93,19%, *Kappa Coefficient* (KC) 92,06%, dan waktu pemrosesan tercepat 6,28 detik. RF dan KNN memiliki akurasi lebih rendah, masing-masing dengan OA 89,96% dan 89,45%. RTH Kotamadya Bandar Lampung mencapai 43,9–44,1%, melebihi batas minimal 30% sesuai UU No. 26/2007, menandakan kondisi lingkungan yang baik. Peta menunjukkan perbedaan distribusi spasial antar metode, namun kelas RTH konsisten akurat di semua algoritma. GMM terbukti paling akurat dan efisien untuk pemetaan RTH perkotaan, sehingga layak dijadikan acuan perencanaan tata ruang dan pengelolaan lingkungan berkelanjutan di kota ini.

Kata kunci: ruang terbuka hijau, klasifikasi tutupan lahan, *supervised*, Algoritma, *machine learning*

ABSTRACT

COMPARISON OF VARIOUS MACHINE LEARNING ALGORITHMS FOR IDENTIFICATION OF GREEN OPEN LAND COVER IN BANDAR LAMPUNG CITY

By

MUHAMMAD ROFI

Rapid population growth in Bandar Lampung City triggers land conversion, especially the reduction of Green Open Space (GOS), so that accurate land cover monitoring and analysis are needed. This study compares the performance of three machine learning algorithms Gaussian Mixture Model (GMM), Random Forest (RF), and K-Nearest Neighbor (KNN) in classifying green open land cover using Sentinel-2A imagery in 2025. Primary data were obtained through field surveys for validation (ground truth), while secondary data in the form of satellite imagery and administrative maps were processed using QGIS with the Dzetsaka and AcATaMa plugins. Classification was carried out supervised with 588 RoIs representing land cover classes. The results showed that GMM provided the best performance with a Producer's Accuracy (PA) of GOS of 94.53%, an Overall Accuracy (OA) of 93.19%, a Kappa Coefficient (KC) of 92.06%, and the fastest processing time of 6.28 seconds. RF and KNN had lower accuracy, with OA of 89.96% and 89.45%, respectively. Bandar Lampung City's green space coverage reached 43.9–44.1%, exceeding the minimum limit of 30% as stipulated in Law No. 26/2007, indicating good environmental conditions. The maps show differences in spatial distribution between methods, but the green space classification was consistently accurate across all algorithms. GMM proved to be the most accurate and efficient for urban green space mapping, making it suitable as a reference for spatial planning and sustainable environmental management in the city.

Keywords: green open land, land use land cover, supervised, algorithm, machine learning

**PERBANDINGAN BERBAGAI ALGORITMA *MACHINE LEARNING*
UNTUK IDENTIFIKASI TUTUPAN LAHAN TERBUKA HIJAU DI
KOTAMADYA BANDAR LAMPUNG**

Oleh

MUHAMMAD ROFI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA KEHUTANAN**

Pada

**Jurusan Kehutanan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

**Judul Penelitian : PERBANDINGAN BERBAGAI
ALGORITMA MACHINE LEARNING
UNTUK IDENTIFIKASI TUTUPAN
LAHAN TERBUKA HIJAU DI
KOTAMADYA BANDAR LAMPUNG**

Nama : Muhammad Rofi

Nomor Pokok Mahasiswa : 2114151057

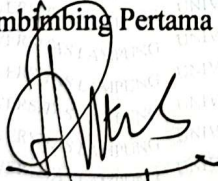
Jurusan : Kehutanan

Fakultas : Pertanian

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing Pertama



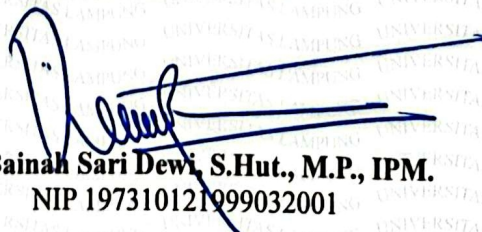
Trio Santoso, S.Hut., M.Sc.
NIP. 198503102014041002

Pembimbing Kedua



Dr. Rudi Hilmanto, S.Hut., M.Si.
NIP. 197807242005011003

2. Ketua Jurusan Kehutanan



Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM.
NIP 197310121999032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Trio Santoso, S.Hut., M.Sc.

Sekretaris : Dr. Rudi Hilmanto, S.Hut., M.Si.

Anggota : Dr. Ir. Gunardi Djoko Winarno, M.Si.

2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.
NIP. 196411181989021002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 24 Juni 2025

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Rofi

NPM : 2114151057

Jurusan : Kehutanan

Alamat Rumah : Mekarsari Timur No. 9 RT.006 RW.002, Tambun Selatan,
Bekasi, Jawa Barat.

Menyatakan dengan sebenar-benarnya dan sungguh-sungguh, bahwa skripsi saya yang berjudul:

**“PERBANDINGAN BERBAGAI ALGORITMA *MACHINE LEARNING*
UNTUK IDENTIFIKASI TUTUPAN LAHAN TERBUKA HIJAU DI
KOTAMADYA BANDAR LAMPUNG”**

Adalah benar karya saya sendiri yang saya susun dengan mengikuti norma dan etika akademik yang berlaku. Selanjutnya, saya juga tidak keberatan apabila sebagian atau seluruh data pada skripsi ini digunakan oleh dosen dan/atau program studi untuk kepentingan publikasi. Jika di kemudian hari terbukti pernyataan saya tidak benar, saya menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar sarjana maupun tuntutan hukum.

Bandar Lampung, 24 Juni 2025

Yang membuat pernyataan



Muhammad Rofi
NPM. 2114151057

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Muhammad Rofi, yang lahir di Bekasi, 1 Maret 2003, merupakan anak ke 3 dari 3 bersaudara, putra dari Bapak Maman Jamaludin dan Ibu Sri Rahmawati. Riwayat pendidikan penulis yaitu Taman Kanak-kanak (TK) Kupu-kupu Mungil pada tahun 2009-2010, Sekolah Dasar (SD) Putradarma Islamic School pada tahun 2010-2015, Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 1 Tambun Selatan pada tahun 2015-2018, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 2 Tambun Selatan pada tahun 2018-2021. Pada tahun 2021, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Sarjana Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa di Universitas Lampung, penulis aktif mengikuti organisasi, kepanitiaan, kegiatan sosial (*volunteer*), program MBKM penelitian dan MBKM magang. Penulis aktif mengikuti organisasi tingkat Universitas, yaitu Mahasiswa Pecinta Alam (MAPALA) sebagai Anggota Divisi Petualangan Alam Bebas pada tahun 2024 dan menjabat sebagai Koordinator Badan Pendidikan dan Latihan pada tahun 2025. Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Bhakti Negara, Kecamatan Baradatu, Kabupaten Way Kanan selama 40 hari pada bulan Januari-Februari 2024. Pada tahun 2023, penulis mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) Penelitian di Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Way Seputih Way Sekampung (BPDAS WSS). Dalam kegiatan tersebut, penulis mempelajari teknik survei dan pemetaan di bidang kehutanan, melakukan analisis vegetasi komponen agroforestri di HKm GAPOKTANHUT Pujo Makmur, melaksanakan penyuluhan pembuatan kompos blok dan ecoprint, membuat peta

potensi ekowisata, serta berkontribusi pada penerbitan buku *Agroforestri di Lampung* dan publikasi jurnal tentang pemanfaatan daun tanaman MPTS sebagai produk ecoprint. Pada tahun 2024, penulis melaksanakan program MBKM Magang Mandiri di PT. Arara Abadi, Riau. Selama magang, penulis mempelajari penataan dan pengorganisasian kawasan, melakukan inventarisasi hutan tanaman dan sosial ekonomi masyarakat, menerapkan teknik silvikultur intensif, serta melakukan inventarisasi hama dan penyakit tanaman.

Penulis juga melaksanakan Praktik Umum Pengelolaan Hutan Lestari (PU-PHL) di Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Getas di Blora, Jawa Tengah dan Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus (KHDTK) Wanagama I di Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta, yang dikelola oleh Fakultas Kehutanan, Universitas Gadjah Mada pada tahun 2024. penulis aktif dalam kegiatan organisasi dan kegiatan sosial. Pada tahun 2022, penulis mengikuti Sekolah Kader Konservasi Masigit Kareumbi WANADRI dan memperoleh predikat Kader Konservasi Alam Tingkat Pemula. Penulis juga menjadi presenter dalam *The 4th Universitas Lampung International Conference on Sciences, Technology, and Environment (ULICoSTE)* tahun 2023, serta menjadi enumerator penelitian ekowisata Teluk Lampung di tahun yang sama. Penulis aktif dalam kegiatan sosial sebagai ketua pelaksana kegiatan diskusi publik dan aksi bersih dalam Pusat Koordinasi Daerah (PKD) Mapala se-Lampung. Selain itu, penulis mempublikasikan hasil penelitiannya dalam Jurnal JOFE dengan judul “Identifikasi Tutupan Lahan Terbuka Hijau di Kotamadya Bandar Lampung Menggunakan Algoritma *Machine Learning Model Gaussian Mixture Model* (GMM)”.

**Dengan penuh rasa syukur dan bangga, karya ini kupersembahkan kepada
orang tuaku yang terhebat dan paling kusayangi,
Mama Sri Rahmawati dan Bapak Maman Jamaludin**

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan segala nikmat dan karunia-Nya selama proses penulis menyusun skripsi ini, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Perbandingan Berbagai Algoritma *Machine Learning* untuk Identifikasi Tutupan Lahan Terbuka Hijau di Kotamadya Bandar Lampung”. Skripsi ini merupakan syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana di Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Selama masa pendidikan, penulis mendapatkan banyak bimbingan dan bantuan, petunjuk, serta dukungan baik moral maupun materi yang diberikan oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan kerendahan hati penulis mengucapkan rasa hormat dan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
3. Ibu Dr. Bainah Sari Dewi, S.Hut., M.P., IPM., selaku Ketua Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Rudi Hilmanto, S.Hut., M.Si., selaku Pembimbing Akademik yang telah mengarahkan kegiatan kuliah dari awal sampai akhir.
5. Bapak Trio Santoso, S.Hut., M.Sc., selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan banyak arahan, bimbingan, pengalaman, nasihat, motivasi, dan segala bantuannya kepada penulis selama penulis menjalani proses skripsi.
6. Bapak Dr. Rudi Hilmanto, S.Hut., M.Si., selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan dan motivasi kepada penulis dalam penyusunan skripsi.
7. Bapak Dr. Ir. Gunardi Djoko Winarno, M.Si., selaku dosen penguji yang telah

memberikan banyak arahan, motivasi, dan nasihat kepada penulis selama proses penyusunan skripsi.

8. Kepada seluruh bapak dan ibu dosen Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung yang telah memberikan wawasan dan ilmu pengetahuan kepada penulis selama masa perkuliahan, serta staff administrasi Jurusan Kehutanan yang membantu penulis.
9. Kepada pengembang plugin Dzetsaka, yaitu Nicolas Karasiak, yang telah menyediakan perangkat lunak open-source untuk klasifikasi citra pada QGIS sehingga sangat membantu dalam proses analisis tutupan lahan dalam penelitian ini.
10. Kepada pengembang plugin Acatama, yang telah menghadirkan fitur analisis spasial berbasis pengolahan citra dengan pendekatan machine learning. Kontribusi kedua pengembang dalam menyediakan perangkat lunak yang mudah diakses, fleksibel, dan aplikatif, sangat bermanfaat dalam mendukung penelitian ini, khususnya pada tahap pengolahan data penginderaan jauh.
11. Orang tua tercinta, Mama Sri Rahmawati dan Bapak Maman Jamaludin, berkat cinta dan kasih sayang yang tiada hentinya telah menjadi sumber kekuatan dan inspirasi dalam setiap langkah penulis. Doa, nasihat, dan dukungan yang selalu diberikan telah memandu penulis untuk menjalani dan menyelesaikan perkuliahan ini dengan baik, serta tak pernah lelah mendidik dan membimbing penulis, mengajarkan arti tanggung jawab dan pentingnya menjadi pribadi yang berguna, baik untuk diri sendiri maupun bagi orang lain.
12. Kepada Aa dan Teteh, yang selalu memberikan perhatian, doa, serta dukungan penuh dengan cara masing-masing. Kehadiran dan semangat yang diberikan menjadi penguat dan penyemangat yang sangat berarti bagi penulis dalam menyelesaikan perjalanan akademik ini.
13. Teman dekat, Saa yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis, serta menjadi tempat berkeluh kesah dan memberikan banyak afirmasi positif sehingga penulis dapat lebih bersemangat.
14. Terima kasih kepada Rintik Tanggamus, saudara angkatan dalam organisasi MAPALA, yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, serta kebersamaan selama menjalani masa perkuliahan hingga proses penyusunan

skripsi ini. Kebersamaan dalam kegiatan organisasi maupun di luar kegiatan akademik telah menjadi sumber inspirasi sekaligus penguat bagi penulis dalam menghadapi berbagai tantangan.

15. Mahasiswa Pencinta Alam (MAPALA), yang memberikan pembelajaran kepada penulis selama menjalani organisasi di perkuliahan.
16. Saudara seperjuangan Angkatan 2021 (LABORIOSA) yang selalu memberikan dukungan, kepada penulis dari awal perkuliahan, saat ini dan seterusnya.
17. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu oleh penulis, yang telah banyak membantu selama perkuliahan dan proses skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan ketidaksempurnaan. Namun, penulis berharap karya ini dapat memberikan manfaat dan inspirasi bagi para pembaca, serta menjadi landasan untuk pengembangan penelitian yang lebih berkualitas di masa mendatang.

Bandar Lampung, 24 Juni 2025
Penulis

Muhammad Rofi

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR GAMBAR.....	iii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR LAMPIRAN	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Manfaat Penelitian.....	3
1.4 Kerangka Pemikiran	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian	6
2.2 Definisi Tutupan Lahan.....	6
2.2.1 Hutan dan Hutan Kota	7
2.2.2 Agroforestri dan Taman Kota	8
2.2.3 Pertanian Lahan Kering	8
2.2.4 Sawah.....	9
2.2.5 Lahan Terbangun	9
2.2.6 Badan Air	10
2.2.7 Lahan Tidak Terbangun.....	10
2.3 Ruang Terbuka Hijau (RTH).....	10
2.4 Citra Sentinel-2A.....	11
2.5 Klasifikasi <i>Machine Learning</i>	12
2.5.1 <i>Random Forest</i> (RF)	13
2.5.2 <i>K-Nearest Neighbor</i> (kNN)	14
2.5.3 <i>Gaussian Mixture Model</i> (GMM).....	15
2.6 Plugin Dzetsaka	16
2.7 Plugin AcATaMa	17
III. METODE PENELITIAN	18
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	18
3.2 Alat dan Objek Penelitian.....	18
3.3 Jenis Data	19

3.3.1 Data Primer	19
3.3.2 Data Sekunder	19
3.4 Metode Pengumpulan Data Latih	20
3.5 Analisis Data	21
3.5.1 Pra-pengolahan	21
3.5.2 Pemotongan Citra	21
3.5.3 Klasifikasi <i>Supervised Machine Learning</i>	22
3.5.4 Uji Validasi	25
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	28
4.1 Hasil Klasifikasi Supervised Machine Learning	28
4.2 Uji Validasi Tutupan Lahan	33
4.3 Perbandingan Akurasi Berbagai Metode.....	37
V. KESIMPULAN DAN SARAN	40
5.1 Kesimpulan.....	40
5.2 Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA.....	42
LAMPIRAN.....	49

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Kerangka Pemikiran	5
Gambar 2. Permodelan Random Forest (RF).....	13
Gambar 3. Permodelan Gaussian Mixture Model (GMM)	16
Gambar 4. Peta Lokasi Penelitian	18
Gambar 5. Diagram Alir Klasifikasi Supervised Machine Learning	22
Gambar 6. Diagram Alir Uji Validasi	26
Gambar 7. Visualiasasi Perbandingan Kelas Tutupan Lahan	29
Gambar 8. Visualiasi Perbandingan Tutuan Lahan Terbuka Hijau	30
Gambar 9. Grafik Kelas Tutupan Lahan Berbagai Model	32
Gambar 10. Grafik Jenis Tutupan Lahan Berbagai Model	33

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Spesifikasi Citra Sentinel-2A.....	12
Tabel 2. Meta Data Citra Penelitian.....	20
Tabel 3. Klasifikasi Tutupan Lahan	20
Tabel 4. Contoh tallysheet sampel data latih tutupan lahan sebenarnya.....	21
Tabel 5. Kategori akurasi nilai kappa	27
Tabel 6. Contoh Tabel Hasil Uji Validasi.....	27
Tabel 7. Kelas Tutupan Lahan Berbagai Model	31
Tabel 8. Jenis Tutupan Lahan Berbagai Model	32
Tabel 9. Ground Check Hasil Klasifikasi	33
Tabel 10. Matrix Confusion Metode GMM.....	35
Tabel 11. Matrix Confusion Metode RF.....	35
Tabel 12. Matrix Confusion Metode KNN	35
Tabel 13. Produce's Accuracy Lahan Terbuka Hijau.....	37
Tabel 14. Produce's Accuracy Lahan Bukan Terbuka Hijau	37
Tabel 15. Perbandingan PA RTH, OA, KC, dan Waktu Berbagai Metode	38

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Pra Pengolahan Citra	50
Lampiran 2. Proses Masking Citra dengan Administrasi Bandar Lampung	50
Lampiran 3. Export Citra GeoTIFF	50
Lampiran 4. Aktivasi Plugin Dzetsaka.....	51
Lampiran 5. Training Sample Kelas Hutan.....	51
Lampiran 6. Training Sample Kelas Sawah.....	51
Lampiran 7. Training Sample Kelas Lahan Terbangun	52
Lampiran 8. Training Sample Kelas Badan Air.....	52
Lampiran 9. Training Sample Kelas Lahan Tidak Terbangun.....	52
Lampiran 10. Hasil Training Sample	53
Lampiran 11. Hasil Model GMM Performing Classification Model GMM	53
Lampiran 12. Hasil Model GMM	53
Lampiran 13. Pengaturan Warna Kelas	54
Lampiran 14. Performing Classification Model RF.....	54
Lampiran 15. Hasil Klasifikasi Model RF	54
Lampiran 16. Performing Classification Model k-NN	55
Lampiran 17. Hasil Pengklasifikasian Model k-NN	55
Lampiran 18. Desain Sampling untuk Uji Validasi	55
Lampiran 19. Groundtruth Sawah.....	56
Lampiran 20. Groundtruth Lahan Terbangun	56

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kotamadya Bandar Lampung merupakan kota yang ditetapkan sebagai Ibu Kota Provinsi Lampung. Sebagai pusat kegiatan pemerintahan, sosial, politik, pendidikan, dan kebudayaan serta pusat kegiatan perekonomian daerah Lampung, menyebabkan dampak yang signifikan terhadap laju pertumbuhan penduduk. Berdasarkan sensus penduduk dalam rentang waktu 2021-2023, kota Bandar Lampung memiliki total penduduk 1.176.000 pada tahun 2021, lalu mengalami peningkatan sebanyak 26.000 penduduk selama rentang tahun 2022 hingga 2023 (BPS, 2024).

Pertumbuhan yang pesat ini telah menyebabkan perubahan nyata dalam penggunaan lahan dan tata ruang di kota tersebut. Salah satu perubahan nyata dari dampak urbanisasi yaitu, berkurangnya Ruang Terbuka Hijau (RTH) di Kota Bandar Lampung akibat pengalihan fungsi lahan secara massif yang berdampak pada penurunan daya dukung kawasan kota dalam menjaga kualitas lingkungan di perkotaan seperti meningkatnya potensi bencana alam (Sinatra *et al.*, 2022).

Dinamika yang cepat dalam pemanfaatan tata ruang di perkotaan dapat dideteksi dengan bantuan teknologi saat ini. Penginderaan jauh (*remote sensing*) merupakan teknologi yang dapat melakukan pemantauan pada tutupan lahan salah satunya di daerah perkotaan. Teknologi ini dapat memudahkan instansi terkait dalam hal merencanakan tata ruang hingga pemantauan lingkungan daerah perkotaan dengan efisien. Akan tetapi, teknologi ini memerlukan peran penuh subektif manusia dalam pemanfaatannya. Untuk meminimalisir peran subjektif tersebut dapat dilakukan dengan pendekatan analisis digital sehingga pemanfaatannya dapat lebih berkembang dengan berbagai teknik untuk meningkatkan hasil akurasi (Arif dan Wahyuni, 2016).

Analisis secara digital dikembangkan untuk memudahkan serta meminimalisir *human eror* dalam pengimplementasiannya. Secara umum terdapat dua metode pengklasifikasian tutupan lahan yaitu, metode klasifikasi berbasis parameter (*Parametric Classification*) dan klasifikasi berbasis non parameter (*Non-parametric Classification*) (Putri dan Handayani, 2024). Pada metode berbasis parameter terdapat kelemahan yaitu membutuhkan dataset yang tidak terdistribusi secara normal sehingga klasifikasi pada tutupan lahan yang padat dan kompleks seperti daerah perkotaan akan lebih sulit dilakukan. Sehingga metode berbasis non parameter dapat digunakan karena bersifat independent terhadap pendistribusian data yang kompleks dan padat. Metode klasifikasi non parameter yang biasa digunakan antara lain metode *Gaussian Mixture Model* (GMM), *Random Forest* (RF), dan *K-Nearest Neighbor* (kNN).

K-Nearest Neighbor (kNN) unggul dalam pengenalan pola yang kompleks dan pemodelan hubungan nonlinier (Wahyunigrum, 2020). *K-Nearest Neighbor* (kNN) mampu menyesuaikan diri dengan data yang tidak beraturan, (Aulia *et al.*, 2021). *Random Forest* (RF) terkenal efisien dalam menangani dataset besar, memberikan hasil klasifikasi yang stabil, dan relatif tahan terhadap *overfitting* (Wulandari, 2024). Meskipun demikian, RF dapat menjadi kurang interpretatif karena sifatnya sebagai ensemble dari banyak pohon keputusan. Selain itu, *Gaussian Mixture Model* (GMM) merupakan metode berbasis distribusi probabilitas yang fleksibel, dapat memodelkan data dengan variasi kompleks, dan mampu menangani data numerik maupun kategorikal. Kelebihan GMM adalah kemampuannya dalam mengelompokkan data dengan pendekatan berbasis probabilitas, sehingga setiap data dapat memiliki kemungkinan masuk ke lebih dari satu kluster. GMM cenderung rentan terhadap *overfitting*, terutama jika jumlah komponen Gaussian terlalu banyak tanpa proses regularisasi yang memadai (Putra *et al.*, 2024).

Penelitian ini diarahkan untuk melakukan perbandingan kinerja beberapa algoritma dalam mengidentifikasi tutupan lahan terbuka hijau di wilayah Kotamadya Bandar Lampung. Pemilihan metode-metode ini didasarkan pada kapabilitas mereka yang telah banyak digunakan dalam berbagai studi penginderaan jauh dan analisis citra satelit. Fokus utama penelitian ini adalah untuk

mengidentifikasi metode klasifikasi yang paling efektif dan efisien dalam mendeteksi tutupan lahan terbuka hijau, dengan mempertimbangkan kondisi karakteristik urban yang kompleks di Bandar Lampung.

Berdasarkan dari uraian latar belakang yang telah dipaparkan diatas dapat dirumuskan masalah penelitian adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana penerapan berbagai algoritma *machine learning* dalam melakukan klasifikasi tutupan lahan terbuka hijau di Kotamadya Bandar Lampung.
2. Algoritma *machine learning* mana yang paling akurat dan efektif dalam mengidentifikasi tutupan lahan terbuka hijau di Kotamadya Bandar Lampung.
3. Bagaimana hasil visualisasi tutupan lahan terbuka hijau di Kotamadya Bandar Lampung tahun 2025 berdasarkan klasifikasi algoritma *machine learning*.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

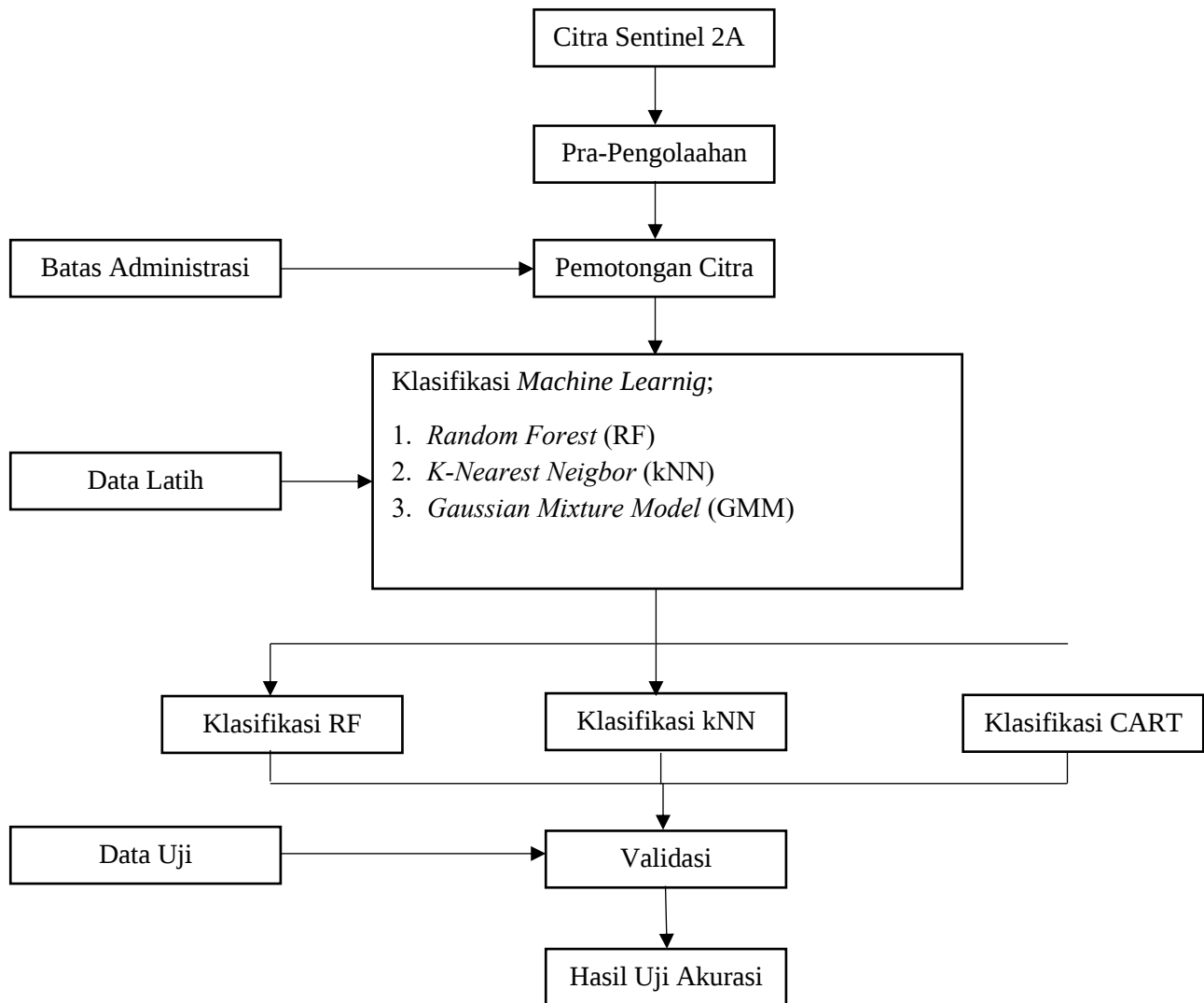
1. Menerapkan berbagai algoritma *machine learning* dalam melakukan klasifikasi tutupan lahan terbuka hijau di Kotamadya Bandar Lampung.
2. Menentukan algoritma *machine learning* yang paling akurat dalam mengidentifikasi tutupan lahan terbuka hijau di Kotamadya Bandar Lampung.
3. Menampilkan tutupan lahan terbuka hijau di Kotamadya Bandar Lampung tahun 2025 berdasarkan hasil klasifikasi algoritma *machine learning*.

1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan referensi bagi para pemangku kepentingan, perencanaan kota, dan peneliti lainnya dalam menentukan pendekatan klasifikasi yang sesuai untuk tujuan monitoring dan pengelolaan ruang terbuka hijau di kawasan urban. Dengan adanya perbandingan antara keempat metode ini, penelitian ini berupaya menjawab kebutuhan akan teknik pemetaan tutupan lahan yang akurat, cepat, dan dapat diandalkan, sekaligus mendorong penggunaan teknologi penginderaan jauh dan *machine learning* dalam perencanaan pembangunan perkotaan berkelanjutan di Indonesia.

1.4 Kerangka Pemikiran

Kotamadya Bandar Lampung mengalami pertumbuhan penduduk yang pesat, menyebabkan perubahan signifikan dalam penggunaan lahan dan tata ruang, termasuk berkurangnya Ruang Terbuka Hijau (RTH) akibat urbanisasi. Teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) telah digunakan untuk pemantauan lahan, tetapi masih memerlukan analisis digital guna meningkatkan akurasi dan meminimalisir subjektivitas manusia. Berbagai algoritma *machine learning*, seperti *Random Forest* (RF), *K-Nearest Neighbor* (kNN), dan *Gaussian Mixture Model* (GMM), memiliki keunggulan dan kelemahan dalam klasifikasi tutupan lahan. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada perbandingan kinerja algoritma-algoritma tersebut untuk menentukan metode yang paling akurat dan efektif dalam mengidentifikasi tutupan lahan terbuka hijau di Kotamadya Bandar Lampung tahun 2025 serta menghasilkan visualisasi peta yang dapat mendukung perencanaan tata ruang dan kebijakan lingkungan kota. Gambar 1 menunjukkan diagram kerangka pemikiran pada penelitian ini.



Gambar 1. Kerangka Pemikiran

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Kotamadya Bandar Lampung merupakan Ibu Kota Provinsi Lampung, yang terletak 5°20'sampai dengan 5°30'lintang selatan dan 105°28' sampai dengan 105°37' bujur timur yang berada di Teluk Lampung. Kota ini memiliki luas wilayah 197,22 km² yang terdiri dari 20 kecamatan dan 126 kelurahan. Secara administratif kota ini dibatasi dengan kecamatan Natar, Kabupaten Lampung Selatan disebelah utara, berbatasan dengan Teluk Lampung pada sebelah selatan, berbatasan dengan kabupaten pesawaran, dan sebelah timur dengan Kecamatan Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

Jumlah penduduk yang tinggal di Kotamadya Bandar Lampung mencapai sekitar 1.202.070 jiwa. Tingginya angka kependudukan tersebut terjadi karena Bandar Lampung berperan sebagai Ibu Kota Provinsi Lampung sekaligus pusat pemerintahan dan perekonomian daerah. Kondisi ini menyebabkan penggunaan lahan di wilayah kota lebih banyak didominasi oleh lahan terbangun, seperti permukiman dan sektor industri. Laju pertumbuhan penduduk yang pesat dari tahun ke tahun juga mengakibatkan terjadinya alih fungsi lahan terbuka hijau menjadi kawasan permukiman dan industri guna memenuhi kebutuhan pokok masyarakat yang bermukim di Kotamadya Bandar Lampung.

2.2 Definisi Tutupan Lahan

Tutupan lahan pada dasarnya menggambarkan kondisi fisik nyata yang menutupi permukaan bumi, baik yang bersifat alami maupun hasil aktivitas manusia (Murti dan Maya, 2021). Istilah ini mengacu pada kenampakan biofisik yang dapat diamati secara langsung, seperti keberadaan vegetasi, air, gurun, es,

serta elemen lainnya yang membentuk permukaan bumi (Razak, 2020). Tidak hanya yang tampak di permukaan, tutupan lahan juga mencakup unsur-unsur yang berada tepat di bawah permukaan tanah seperti biota tanah, jenis tanah itu sendiri, medan, serta keberadaan air tanah yang dekat dengan permukaan. Tutupan lahan mencerminkan karakteristik alami dari suatu wilayah sekaligus menunjukkan intervensi manusia dalam bentuk konstruksi atau bangunan buatan, seperti kawasan permukiman, fasilitas perkotaan, hingga wilayah pertambangan (Putra, 2023). Dengan kata lain, tutupan lahan memberikan gambaran nyata mengenai apa yang secara fisik menutupi dan menyusun wajah bumi, sehingga menjadi indikator penting dalam memahami kondisi ekologis dan geospasial suatu kawasan.

2.2.1 Hutan dan Hutan Kota

Hutan merupakan suatu ekosistem berupa hamparan lahan yang didominasi oleh pepohonan serta tumbuhan lainnya, yang satu sama lain saling terkait dalam kesatuan ekosistem, dan keberadaannya tidak dapat dipisahkan dari unsur lingkungan sekitarnya. Hutan memiliki fungsi penting dalam mendukung keseimbangan lingkungan, menjaga keanekaragaman hayati, serta berperan sebagai penyedia berbagai jasa ekosistem (Kusmana, 2015). Sementara itu, hutan kota adalah kawasan hutan yang berada di wilayah perkotaan, ditetapkan secara khusus untuk fungsi konservasi, perlindungan, estetika, serta peningkatan kualitas lingkungan hidup perkotaan (Kusyanto, 2012). Hutan kota berfungsi sebagai ruang terbuka hijau yang memberikan manfaat ekologis dan sosial bagi masyarakat perkotaan, termasuk dalam mengendalikan polusi udara, menjaga tata air, dan menyediakan ruang rekreasi (Harahap, 2021).

Dengan mempertimbangkan karakteristik dan fungsi ekologisnya, hutan kota secara substansi merupakan bagian dari sistem kehutanan dan memiliki tutupan lahan yang didominasi oleh vegetasi pepohonan sebagaimana layaknya hutan pada umumnya. Oleh karena itu, dalam klasifikasi tutupan lahan nasional, hutan kota secara logis termasuk dalam kategori tutupan lahan hutan, karena memenuhi kriteria sebagai kawasan dengan penutup lahan berupa vegetasi pohon yang membentuk ekosistem hutan, meskipun lokasinya berada di dalam wilayah perkotaan (Mashur dan Rusli, 2018).

2.2.2 Agroforestri dan Taman Kota

Agroforestri adalah suatu sistem penggunaan lahan yang menggabungkan penanaman pohon atau tanaman berkayu dengan tanaman pertanian dan/atau kegiatan peternakan dalam satu hamparan lahan, baik secara bersamaan maupun bergiliran. Sistem ini dirancang untuk menciptakan manfaat ganda, baik dari segi ekologi maupun ekonomi, dengan tujuan meningkatkan produktivitas lahan, menjaga kesuburan tanah, mengurangi erosi, serta mendukung upaya konservasi sumber daya alam (Efendi, 2016). Dalam praktiknya, agroforestri memungkinkan terjadinya interaksi yang saling menguntungkan antara komponen pohon, tanaman semusim, dan hewan ternak sehingga dapat mendukung keberlanjutan lingkungan sekaligus kesejahteraan masyarakat (Triwanto, 2024).

Taman kota merupakan ruang terbuka hijau di kawasan perkotaan yang berfungsi sebagai sarana estetika, rekreasi, sekaligus penyegar lingkungan. Taman ini biasanya dipenuhi beragam vegetasi seperti pohon peneduh, semak, perdu, dan rerumputan (Syamdermawan, 2013)., yang bersama-sama berperan dalam memperbaiki kualitas udara, menurunkan suhu, menekan polusi, serta memberikan manfaat ekologis lainnya. Mengingat karakteristik vegetasi yang beragam dan pola pengelolaan taman kota yang memadukan berbagai unsur tanaman untuk mendukung fungsi ekologis dan sosial, hutan kota yang terdapat di kawasan perkotaan dapat dipandang sebagai bagian dari tutupan lahan agroforestri dalam klasifikasi tutupan lahan, karena memiliki kesamaan prinsip dalam mengintegrasikan pohon dan vegetasi lain untuk tujuan konservasi dan keberlanjutan (Khambali, 2017).

2.2.3 Pertanian Lahan Kering

Pertanian lahan kering adalah sistem usaha tani yang dilakukan pada lahan yang tidak bergantung pada sistem irigasi teknis atau pengairan teratur, melainkan sepenuhnya mengandalkan curah hujan sebagai sumber utama air bagi tanaman. Pertanian ini umumnya dilakukan pada lahan dengan kondisi tanah yang memiliki kemampuan menahan air terbatas dan berada di wilayah dengan musim hujan yang relatif pendek atau tidak menentu. Jenis tanaman yang dibudidayakan pada pertanian lahan kering biasanya terdiri dari tanaman pangan, palawija, atau tanaman tahunan yang toleran terhadap kekeringan, serta sering dipadukan dengan praktik

konservasi tanah dan air untuk menjaga produktivitas lahan secara berkelanjutan (Kurnia, 2004).

2.2.4 Sawah

Sawah adalah bentuk lahan pertanian basah yang secara khusus dikelola dan dilengkapi dengan sistem pengairan (irigasi) atau memanfaatkan air hujan secara alami, yang digunakan untuk membudidayakan tanaman, terutama padi. Lahan sawah memiliki ciri khas berupa petakan-petakan lahan yang dibuat sedemikian rupa agar mampu menahan air dalam waktu tertentu guna mendukung pertumbuhan tanaman (Nursyamsi *et al.*, 2014). Sistem pengelolaan sawah biasanya mencakup pengaturan tinggi permukaan air, pematang, saluran irigasi, serta drainase untuk memastikan ketersediaan air secara optimal selama musim tanam. Sawah berperan penting dalam mendukung ketahanan pangan, terutama sebagai sumber utama produksi beras di berbagai wilayah (Agus *et al.*, 2024).

2.2.5 Lahan Terbangun

Lahan terbangun dapat diartikan sebagai lahan yang telah mengalami perubahan akibat campur tangan manusia, di mana tutupan lahan alami atau semi alami diubah menjadi tutupan lahan buatan yang umumnya bersifat kedap air (Rohmah, 2022). Lahan ini mencakup bidang tanah yang telah mengalami proses pengembangan atau perkerasan pada area yang sebelumnya belum dimanfaatkan secara intensif. Selain itu, lahan terbangun juga dapat dipahami sebagai segala bentuk fisik yang menutupi permukaan bumi dan dapat dikenali dari kenampakan fisik hasil pembangunan (Gai *et al.*, 2020). Dalam klasifikasi tutupan lahan, lahan terbangun masuk dalam kategori umum pada tingkat pertama. Pada tingkat berikutnya, lahan terbangun dibedakan lebih rinci ke dalam beberapa kelas, seperti kawasan permukiman, kawasan industri, kawasan campuran jasa dan industri, sarana transportasi, serta sarana komunikasi. Pembagian ini memberikan gambaran lebih jelas mengenai ragam fungsi lahan terbangun dalam struktur ruang wilayah (Azzam dan Musiyam, 2015).

2.2.6 Badan Air

Badan air adalah bagian dari permukaan bumi yang secara permanen atau sementara tergenang atau dialiri oleh air, baik yang berasal dari sumber alami maupun buatan. Badan air meliputi berbagai bentuk kenampakan air seperti sungai, danau, rawa, waduk, kolam, bendungan, dan saluran irigasi besar. Area ini berfungsi sebagai penyimpan, penyalur, atau pengendali aliran air serta menjadi bagian penting dalam siklus hidrologi. Badan air juga berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem, mendukung keanekaragaman hayati, serta menyediakan berbagai jasa lingkungan dan sumber daya air untuk kebutuhan manusia dan makhluk hidup lainnya (Lestari *et al.*, 2012).

2.2.7 Lahan Tidak Terbangun

Lahan tidak terbangun adalah lahan yang permukaannya masih didominasi oleh unsur-unsur alami atau semi alami, yang belum mengalami proses pembangunan fisik, perkerasan, atau pengembangan untuk keperluan pemukiman, industri, maupun sarana infrastruktur lainnya (Fandeli, 2021). Lahan ini belum digunakan untuk mendirikan bangunan, fasilitas industri, jalan, atau bentuk konstruksi permanen lainnya. Ciri utama lahan tidak terbangun adalah ketiadaan elemen buatan manusia yang menutupi permukaan lahannya, sehingga area ini tetap berada dalam kondisi terbuka atau alami tanpa campur tangan pembangunan berskala besar. Dalam konteks tata ruang, lahan tidak terbangun sering kali diidentifikasi sebagai wilayah yang berpotensi untuk dikembangkan di masa mendatang, baik untuk kawasan permukiman, kawasan industri, maupun infrastruktur pendukung lainnya sesuai dengan kebutuhan perkembangan wilayah (Sastrawan, 2025). Keberadaan lahan tidak terbangun juga mencerminkan area yang hingga saat ini belum dimanfaatkan secara langsung untuk kepentingan pembangunan, meskipun letaknya dapat berada di dalam atau di sekitar kawasan perkotaan atau kawasan industri.

2.3 Ruang Terbuka Hijau (RTH)

Ruang Terbuka Hijau (RTH) merupakan areal penting dalam tata ruang kota karena memiliki fungsi dan manfaat yang berperan dalam penyedia jasa lingkungan

yang dapat meningkatkan kualitas lingkungan diperkotaan, secara ekonomi RTH dapat berperan penyedia areal tanaman berekonomi tinggi dan sebagai tempat usaha bagi warga kota, secara social dapat sebagai areal rekreasi serta sarana berolahraga bagi warga kota. Berdasarkan aksesibilitasnya, RTH terbagi menjadi dua yaitu RTH Publik dan RTH Privat. Dimana RTH Publik yaitu, RTH yang dapat diakses oleh masyarakat umum, seperti taman kota, alun-alun, dan hutan kota. Sedangkan RTH Privat hanya diakses secara eksklusif oleh masyarakat tertentu seperti, taman rumah, taman kantor, maupun taman di kawasan perumahan (Hesty *et al.*, 2022).

Proporsi RTH pada wilayah perkotaan adalah sebesar minimal 30% yang terdiri dari 20% RTH publik dan 10% RTH privat, proporsi tersebut merupakan kebijakan yang diambil berdasarkan UU Penataan Ruang No. 26 Tahun 2007, dalam perencanaan tata ruang kawasan perkotaan dengan tegas telah mengarahkan rencana penyedia dan pemanfaatan ruang terbuka hijau baik RTH publik maupun RTH privat. Diadakanya RTH diharapkan sebagai penyeimbang antara area terbangun dengan area tidak terbangun di wilayah perkotaan (Arianti, 2013).

2.4 Citra Sentinel-2A

Sentinel-2 merupakan satelit penginderaan jauh yang dilengkapi dengan sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI), yang mampu menghasilkan citra multispektral dengan resolusi spasial tinggi. Teori dasar terkait citra Sentinel-2 mencakup prinsip pemrosesan citra, pengolahan data multispektral, serta karakteristik citra satelit. Pemrosesan citra Sentinel-2 melibatkan koreksi radiometrik dan koreksi geometrik. Koreksi radiometrik bertujuan mengurangi pengaruh atmosfer terhadap kualitas citra, sedangkan koreksi geometrik memperbaiki distorsi bentuk yang terjadi pada citra. Kedua tahapan ini penting untuk menghasilkan citra yang akurat dan siap digunakan dalam analisis lebih lanjut (Mujiono, 2019).

Dalam pengolahan citra multispektral Sentinel-2, dilakukan proses klasifikasi dan ekstraksi informasi. Klasifikasi citra bertujuan mengelompokkan piksel ke dalam berbagai kategori, seperti vegetasi, badan air, dan permukaan tanah. Sementara itu, ekstraksi informasi berfokus pada pengambilan data spesifik, seperti pembuatan indeks vegetasi untuk memantau perkembangan tanaman. Dalam

tahapan ini, pemahaman mengenai spektrum elektromagnetik dan proses pembentukan citra multispektral menjadi sangat penting. Keunggulan Sentinel-2 terletak pada resolusi spasialnya yang tinggi, yaitu 10 meter untuk kanal biru, hijau, dan merah, serta 20 meter untuk kanal NIR dan SWIR, dengan kemampuan pencitraan ulang setiap lima hari, sehingga sangat ideal untuk memantau perubahan lingkungan dan pertanian (Eramudadi dan Rokhmana, 2024).

Karakteristik citra Sentinel-2 meliputi resolusi spasial, resolusi spektral, serta akurasi radiometrik. Resolusi spasial citra ini bervariasi antara 10 hingga 60 meter, tergantung pada kanal yang digunakan. Selain itu, akurasi radiometrik yang tinggi menjadi kunci untuk memastikan data yang dihasilkan dapat diandalkan dalam berbagai analisis. Citra Sentinel-2 produk level-2A sudah melalui tahapan koreksi atmosferik dan geometrik sebelumnya, sehingga menghasilkan citra yang siap pakai untuk berbagai kebutuhan pemetaan dan monitoring lingkungan. Spesifikasi citra Sentinel-2 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Citra Sentinel-2A

No.	Band	Panjang Gelombang	Resolusi
1	Band 1 – Coastal	0,443-0,453	60
2	Band 2 – Blue	0,458-0,523	10
3	Band 3 – Green	0,543-0,578	10
4	Band 4 – Red	0,650- 0,680	10
5	Band 5 – Vegetation Red Edge	0,698- 0,713	20
6	Band 6 – Vegetation Red Edge	0,733-0,748	20
7	Band 7 – Vegetation Red Edge	0,765- 0,785	20
8	Band 8 – Near Infrared (NIR)	0,785- 0,900	10
9	Band 8A – Near Infrared (NIR) Vegetation Red Edge	0,855- 0,875	20
10	Band 9 – Water Vapour	0,930- 0,950	60
11	Band 10 – Shortwave infrared SWIR - Cirrus	1,365- 1,385	60
12	Band 11 – SWIR 1	1,565- 1,655	20
13	Band 12 – SWIR 2	2,100- 2,280	20

(sumber: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>)

2.5 Klasifikasi *Machine Learning*

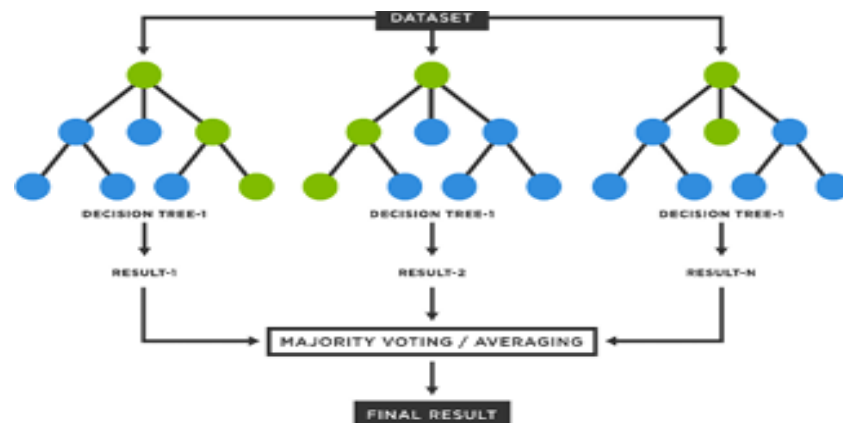
Machine learning adalah cabang dari kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) yang berfokus pada pengembangan algoritma yang memungkinkan komputer belajar dari data dan membuat prediksi atau keputusan tanpa diprogram secara eksplisit (Breiman, 2001). Dalam konteks pengolahan citra, *machine*

learning digunakan untuk menganalisis dan mengklasifikasikan piksel berdasarkan pola spektral, tekstur, atau karakteristik lainnya.

Klasifikasi citra dengan *machine learning* melibatkan proses pengelompokan piksel citra satelit atau citra multispektral ke dalam kategori-kategori tertentu, seperti vegetasi, badan air, kawasan terbangun, dan tanah kosong. Proses ini terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu: ekstraksi fitur dari citra, pembentukan dataset pelatihan, pelatihan model, validasi model, dan penerapan model pada seluruh citra. Beberapa algoritma *Machine Learning* yang sering diterapkan dalam klafisifikasi citra antara lain (Nurhikmat, 2018).

2.5.1 *Random Forest* (RF)

Random Forest (RF) adalah algoritma pembelajaran berbasis ansambel yang membangun banyak pohon keputusan, di mana setiap pohon dibuat dari sampel data pelatihan yang diambil secara acak dengan penggantian (metode *bootstrap*), sehingga menghasilkan kumpulan pohon yang bervariasi untuk meningkatkan akurasi prediksi (Zhang *et al.*, 2021). Algoritme *Random Forest* telah banyak diterapkan dalam berbagai aplikasi data mining, namun pemanfaatannya untuk menganalisis citra penginderaan jauh masih belum sepenuhnya dimaksimalkan (Marlina, 2022). Permodelan *Random Forest* (RF) dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Permodelan *Random Forest* (RF)

Klasifikator *Random Forest* (RF) adalah metode klasifikasi yang memanfaatkan algoritma CART dengan tambahan pemilihan sampel acak di setiap simpul yang terbentuk (Breiman, 2001). Dalam klasifikasi RF, banyak pohon keputusan dihasilkan dari subset variabel pelatihan yang dipilih secara acak (Belgiu

dan Drăgu, 2016). Secara umum, RF mirip dengan CART, namun dilengkapi dengan proses tambahan sehingga pengambilan keputusan berlangsung melalui mekanisme yang lebih kompleks (Basheer *et al.*, 2022).

Proses klasifikasi Random Forest dimulai dengan pembuatan training point untuk setiap jenis tutupan lahan. *Training point* merupakan titik sampel yang merepresentasikan jenis tutupan lahan tertentu, dan dibuat menggunakan platform *Google Earth Engine*. Titik-titik ini kemudian digunakan untuk mengenali karakteristik statistik nilai piksel dari gambar multi-spektral yang tersedia, yang selanjutnya menjadi dasar dalam membangun model klasifikasi seluruh gambar ke dalam kategori tutupan lahan. Digitasi training point cukup dilakukan untuk setiap kategori, karena algoritma *Random Forest* akan mengklasifikasikan seluruh area berdasarkan training area yang telah ditentukan. Semakin banyak training area yang dibuat, semakin tinggi tingkat akurasi klasifikasinya (Pradhesta *et al.*, 2019).

2.5.2 K-Nearest Neighbor (kNN)

Algoritma *K-Nearest Neighbor* (K-NN) merupakan salah satu metode dalam bidang data mining dan pembelajaran mesin yang digunakan untuk melakukan proses klasifikasi terhadap suatu data atau dokumen. Metode ini bekerja berdasarkan prinsip bahwa data yang memiliki kemiripan atau kedekatan fitur akan cenderung berada dalam kelas yang sama. Dalam penerapannya, K-NN akan membandingkan data baru yang ingin diklasifikasikan dengan sejumlah data yang telah terklasifikasi sebelumnya, kemudian menentukan kelas dari data baru tersebut berdasarkan kategori mayoritas dari sejumlah tetangga terdekatnya. Jarak antar data biasanya dihitung menggunakan rumus tertentu seperti *Euclidean Distance*, *Manhattan Distance*, atau metode pengukuran lainnya, tergantung pada karakteristik data yang digunakan (wahyuni *et al.*, 2023).

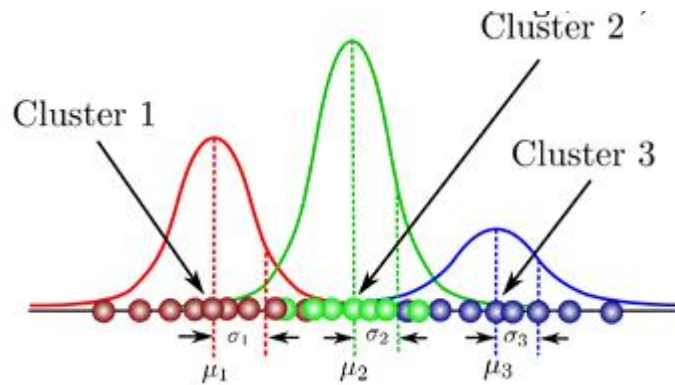
K-NN termasuk dalam kategori algoritma *supervised learning*, artinya proses pembelajaran dilakukan berdasarkan data latih (training data) yang telah diketahui label atau kelasnya. Ketika suatu data baru dimasukkan ke dalam sistem, K-NN akan mencari sejumlah "k" data terdekat dari himpunan data latih, lalu melihat mayoritas kelas dari tetangga-tetangga tersebut untuk memutuskan ke dalam kelas mana data baru tersebut seharusnya diklasifikasikan. Semakin kecil nilai "k", maka hasil klasifikasi akan semakin dipengaruhi oleh tetangga terdekat, namun bisa lebih

rentan terhadap noise. Sebaliknya, jika nilai "k" terlalu besar, maka hasil klasifikasi bisa menjadi kurang sensitif terhadap pola lokal. Oleh karena itu, pemilihan nilai "k" yang tepat sangat penting dalam meningkatkan akurasi dan performa algoritma ini (Veriana *et al.*, 2018).

2.5.3 *Gaussian Mixture Model (GMM)*

Gaussian Mixture Model (GMM) merupakan model probabilistik yang menerapkan pendekatan *soft clustering* untuk mengelompokkan titik-titik data ke dalam beberapa cluster. Model ini terdiri dari beberapa distribusi *Gaussian*, yang juga dikenal sebagai distribusi normal. Distribusi Gaussian ditandai dengan bentuk kurva lonceng, di mana data tersebar secara simetris di sekitar nilai rata-ratanya (Koman *et al.*, 2021).

GMM adalah metode dalam *machine learning* yang digunakan untuk *clustering* atau pemodelan distribusi data dengan pendekatan probabilistik. Model ini mengasumsikan bahwa data berasal dari kombinasi beberapa distribusi Gaussian, di mana setiap distribusi memiliki parameter seperti *mean* (μ), *covariance* (Σ), dan *weight* (π). Untuk mengestimasi parameter ini, algoritma *Expectation-Maximization (EM)* sering digunakan, memungkinkan pembaruan parameter secara iteratif hingga mencapai nilai optimal. GMM lebih fleksibel dibandingkan metode clustering lainnya seperti *K-Means*, karena memungkinkan data memiliki probabilitas keanggotaan dalam lebih dari satu klaster, menjadikannya ideal untuk menangani data dengan distribusi kompleks (Trihandaru, 2024). Permodelan *Gaussian Mixture Model (GMM)* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Permodelan *Gaussian Mixture Model* (GMM)

GMM memiliki berbagai aplikasi, seperti segmentasi citra, pengelompokan data, dan pengenalan pola dalam sistem kecerdasan buatan. Keunggulan utama GMM adalah kemampuannya memodelkan distribusi data yang lebih kompleks dan fleksibel dibandingkan metode *hard clustering*. Namun, ada beberapa kelemahan, seperti kebutuhan untuk menentukan jumlah kluster terlebih dahulu dan komputasi yang lebih berat. Selain itu, jika jumlah komponen Gaussian terlalu banyak, model dapat mengalami overfitting, mengurangi efektivitasnya dalam generalisasi data baru. Dengan keunggulannya, GMM tetap menjadi metode yang populer dalam berbagai bidang analisis data dan kecerdasan buatan (Andriyani, 2024).

2.6 Plugin Dzetsaka

Dzetsaka merupakan salah satu plugin pada perangkat lunak QGIS yang digunakan untuk klasifikasi citra secara semi-otomatis. Plugin ini dikembangkan oleh Nicolas Karasiak dan dirilis dengan lisensi GPL-3.0, sehingga bersifat open source dan dapat dimodifikasi maupun dikembangkan lebih lanjut oleh komunitas. Nama “Dzetsaka” sendiri diambil dari bahasa Teko, sebuah bahasa masyarakat adat di Guyana Prancis, yang berarti “alat untuk melihat dunia”. Dzetsaka mendukung berbagai algoritma *supervised machine learning*, seperti *Gaussian Mixture Model* (GMM), *Random Forest* (RF), *Support Vector Machine* (SVM), dan *K-Nearest Neighbor* (KNN). Plugin ini memanfaatkan pustaka *scikit-learn* untuk proses komputasinya, sehingga pengguna perlu memasang dependensi ini sebelum menjalankan klasifikasi. Dzetsaka banyak digunakan dalam penelitian pemetaan tutupan lahan, habitat, dan konservasi, karena kemudahannya dalam mengintegrasikan proses klasifikasi langsung pada antarmuka QGIS tanpa

memerlukan perangkat lunak eksternal. Selain itu, Dzetsaka menyediakan fitur tambahan seperti peta keyakinan (*confidence map*), median filter, dan smoothing filter yang membantu meningkatkan kualitas hasil klasifikasi (Karasiak, 2016).

2.7 Plugin AcATaMa

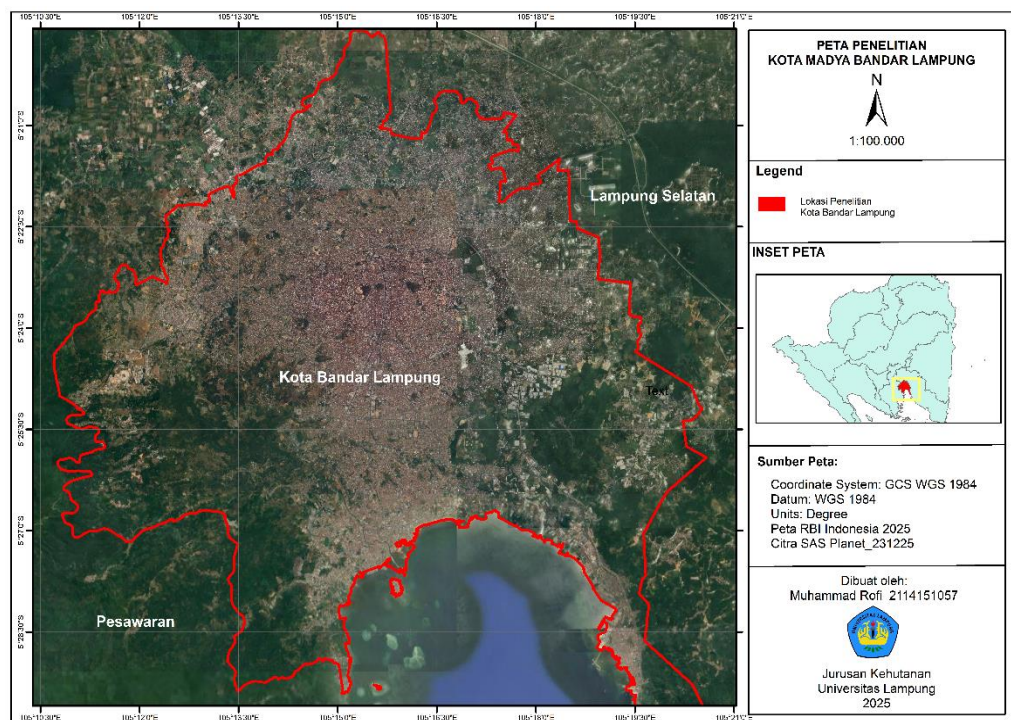
AcATaMa adalah sebuah plugin open-source yang dikembangkan untuk perangkat lunak QGIS guna memfasilitasi proses klasifikasi citra satelit, terutama dalam konteks pemetaan dan analisis tutupan lahan. Plugin ini dirancang agar dapat membantu pengguna dalam melakukan klasifikasi berbasis pixel maupun object-based, dengan dukungan berbagai algoritma machine learning seperti Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), dan k-Nearest Neighbor (k-NN). Selain itu, Acatama juga mendukung integrasi dengan model data raster multi-band, sehingga cocok digunakan untuk pengolahan citra satelit resolusi menengah dan tinggi seperti Sentinel-2 dan Landsat (Ulfi, 2023).

Fitur utama yang ditawarkan Atacama meliputi penyusunan *training samples*, manajemen data atribut, pengaturan parameter algoritma klasifikasi, serta evaluasi hasil klasifikasi melalui *confusion matrix* dan nilai akurasi seperti *overall accuracy* dan kappa *index*. Kelebihan Acatama terletak pada antarmuka yang intuitif dan kemampuannya menangani dataset besar secara efisien dibanding beberapa plugin sejenis (*e.g. Dzetsaka* atau *Semi-Automatic Classification Plugin*). Dalam implementasinya, Acatama banyak digunakan dalam penelitian pemetaan tutupan lahan, analisis perubahan penggunaan lahan, serta dalam studi monitoring vegetasi dan sumber daya alam. Penggunaan plugin ini dinilai dapat meningkatkan akurasi klasifikasi karena adanya fleksibilitas dalam pemilihan algoritma dan parameter yang disesuaikan dengan karakteristik data citra (Pratama, 2022).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan pada Bulan Mei-Juli 2025, di Laboratorium Fasilitas Tematik, Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, Bandar Lampung dan Kotamadya Bandar Lampung. . Lokasi penelitian disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta Lokasi Penelitian

3.2 Alat dan Objek Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *Laptop* dengan spesifikasi *Intel® Core i5-10300H; RAM 16 gb; SSD 512; GPU Intel UHD Graphic &*

NVIDIA GeForce GTX 1650 TI, Smartphone, Global Positioning System (GPS), tallysheet, aplikasi SNAP, aplikasi QGIS dengan plugin dzetsaka & AcATaMa, Aplikasi Microsoft word 2010, dan Microsoft Excel 2010. Obyek pada penelitian kali ini adalah Citra Sentinel-2A dan SHP Peta Kota Bandar Lampung.

3.3 Jenis Data

Data yang akan digunakan pada penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari survey lapangan berupa validisasi terkait tipe penggunaan lahan yang sebenarnya. Sedangkan data sekunder yang digunakan pada penelitian ini yaitu studi literatur, peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), dan Citra Sentinel-2A.

3.3.1 Data Primer

Sumber data primer adalah sumber yang langsung memberikan data kepada peneliti. Data primer didapatkan melalui survey lapangan untuk memvalidasi tipe penggunaan lahan, Dengan cara melakukan *groundtruth* pada koordinat piksel hasil pencitraan *Machine Learning* (Wahyuni *et al.*, 2014).

3.3.2 Data Sekunder

Data sekunder pada penelitian ini yang didapatkan secara tidak langsung atau berasal dari pihak lain. Menurut Mudjiyanto (2018), data sekunder sendiri diperoleh dari studi literatur seperti buku, artikel, internet, jurnal, dan lain sebagainya yang dianggap relevan dengan topik dari sebuah penelitian. Adapun data sekunder antara lain citra Sentinel-2A yang diambil dari situs <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> yang di *crop* dengan daerah Bandar Lampung tahun 2025 yang diakses dari situs <https://tanahair.indonesia.go.id/>. Kemudian citra penelitian dilakukan proses pra-pengolahan melalui aplikasi SNAP. Data divalidasi menggunakan *software QGIS* dengan *plugin* tambahan *dzetsaka* dan *AcATaMa*. Metadata citra yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Metadata Citra Penelitian

Nama Citra	Tanggal Akuisisi	Processing Baseline	Relative Orbit Num.	Tile Id
Sentinel-2A Level-2A	28 April 2025; 03:11:51 UTC	N0511	R075	T48MWV
Sentinel-2A Level-2A	13 Maret 2025; 03:11:51 UTC	N0511	R075	T48MWV

3.4 Metode Pengumpulan Data Latih

Teknik sampling merupakan teknik pengambilan sampel untuk menentukan sampel yang akan digunakan dalam penelitian (Sugiyono, 2013). Teknik sampel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *stratified random sampling* menggunakan metode *fishnet*. Penentuan jumlah sampel yang digunakan pada penelitian ini menggunakan prinsip penginderaan jauh berdasarkan titik yang merepresentasikan setiap piksel kelas tutupan lahan, berkisar antara 10 N sampai dengan 100 N, dimana N merupakan jumlah tipe penggunaan lahan (Dogru *et al.*, 2020 dalam Santoso *et al.*, 2024).

Data latih yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 588 *Region of Interest* (RoI), dimana masing-masing kelas mendapat 84 RoI. Sebelum menentukan sampel, dilakukan terlebih dahulu studi literatur terhadap penentuan kelas tutupan lahan pada penelitian ini. Klasifikasi tutupan lahan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada pedoman dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK, 2021) yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi Tutupan Lahan (KLHK,2021).

Kelas Tutupan Lahan	
RTH	1. Hutan Kota/Taman Kota 2. Agroforestri 3. Pertanian lahan Kering
Non-RTH	1. Lahan Terbangun 2. Badan Air 3. Lahan Terbuka 4. Sawah

Adapun sampel data latih dilakukan verifikasi lapangan untuk meningkatkan kesesuaian data latih penelitian dengan kelas tutupan lahan sebenarnya. Adapun pengecekan dilapangan (*ground truth*) bertujuan untuk menguji kebenaran dari hasil interpretasi yang diperoleh dengan cara pengecekan dilapangan yang dipilih dari setiap kelas tutupan lahan yang diinterpretasikan (Maullana dan Darmawan, 2014).

Contoh format tallysheet yang digunakan untuk mencatat sampel data latih tutupan lahan hasil verifikasi lapangan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Contoh *tallysheet* sampel data latih tutupan lahan (kelas n) sebenarnya

No.	Titik Koordinat		Kelas Tutupan Lahan Sebenarnya	Dokumentasi
	x	y		
1	...	...	...	
2	...	...	...	
3	...	...	...	
...	...	...	...	

3.5 Analisis Data

3.5.1 Pra-pengolahan

Proses koreksi radiometrik dilakukan sampai pada tahap koreksi atmosfer atas atau TOA (*Top of Atmosphere*). Koreksi radiometrik TOA dilakukan melalui dua tahap, tahap pertama adalah konversi nilai DN (*digital number*) menjadi nilai spektral radian, dan tahap kedua adalah konversi nilai spektral radian menjadi nilai spektral reflektan (Kalianda, 2018).

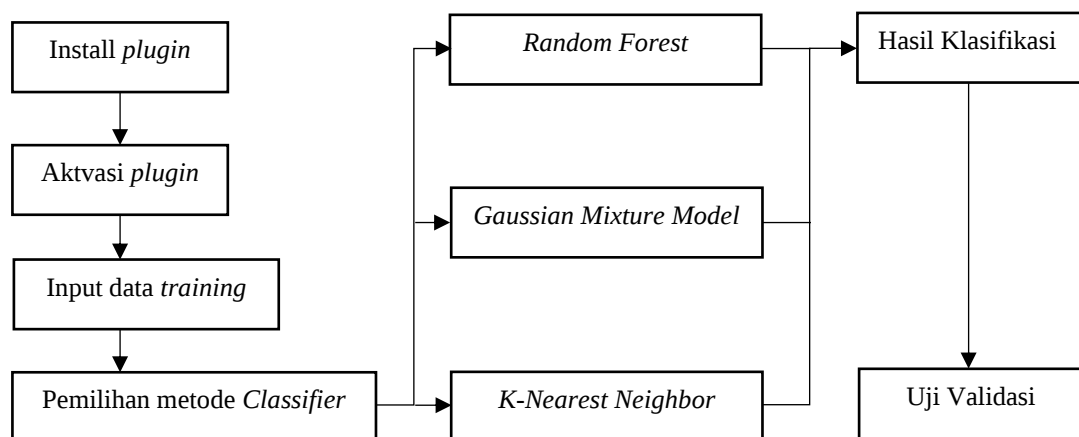
Koreksi atmosferik adalah proses yang digunakan dalam pengolahan citra Sentinel untuk menghilangkan efek atmosfer yang dapat mempengaruhi akurasi data reflektansi. Efek atmosfer seperti hamburan dan absorpsi dapat menyebabkan distorsi pada citra, sehingga koreksi atmosferik diperlukan untuk mendapatkan informasi yang lebih akurat.

3.5.2 Pemotongan Citra

Pemotongan citra atau *cropping* dilakukan untuk mendapatkan *Area of Interest* (AoI) dari areal penelitian. Hal tersebut dilakukan agar data yang diluar lokasi penelitian tidak perlu dilakukan proses analisis selanjutnya sehingga dapat meringankan kerja proses *hardware* dan *software*. Adapun pemotongan citra dilakukan untuk menyesuaikan pengolahan data berbasis *software* sesuai dengan shp lokasi Kotamadya Bandar Lampung.

3.5.3 Klasifikasi *Supervised Machine Learning*

Supervised Machine Learning adalah metode pembelajaran mesin yang menggunakan data berlabel (*labeled data*) untuk melatih algoritma agar mampu mengenali pola tertentu dan mengklasifikasikan data baru ke dalam kelas yang sesuai. Dalam *supervised learning*, setiap data latih sudah memiliki pasangan *input* (fitur) dan *output* (kelas/label), sehingga algoritma dapat belajar hubungan di antara keduanya. Pada tahap pelatihan, model mempelajari pola dari data yang sudah diketahui kelasnya, kemudian pada tahap prediksi, model tersebut digunakan untuk menentukan kelas dari data yang belum diketahui. Metode ini banyak digunakan dalam penginderaan jauh, misalnya untuk klasifikasi tutupan lahan, deteksi perubahan, serta pemetaan tematik, karena mampu memberikan hasil yang lebih akurat ketika data latih yang digunakan representatif. Tahapan proses klasifikasi dengan metode *Supervised Machine Learning* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Alir Klasifikasi *Supervised Machine Learning*

3.5.3.1 *Random Forest* (RF)

Algoritma *Random Forest* bekerja dengan membangun sejumlah pohon keputusan (*decision trees*) yang kemudian digabungkan untuk menghasilkan output berdasarkan prinsip *majority vote*. Dalam hal ini, *majority vote* digunakan untuk menentukan label kelas pada hasil akhir. Salah satu keunggulan utama dari algoritma ini adalah kemampuannya yang tinggi dalam mengatasi masalah *overfitting*. Hal ini disebabkan karena setiap pohon atau klasifikasi dalam *Random*

Forest dibentuk secara acak, sehingga meminimalkan pengaruh *overfitting* terhadap model secara keseluruhan (Cintari 2024).

Random Forest bekerja dengan membuat beberapa *subset* dari data masukan untuk setiap iterasi yang dilakukan. Setiap *subset* data tersebut digunakan untuk membangun sebuah pohon keputusan tersendiri—*subset* pertama membentuk pohon pertama, *subset* kedua membentuk pohon kedua, dan seterusnya sesuai jumlah iterasi yang ditentukan. Setiap pohon akan menghasilkan prediksi kelas masing-masing (misalnya *class A*, *class B*), dan hasil prediksi dari seluruh pohon kemudian digabungkan menggunakan metode *majority vote* untuk menentukan kelas akhir atau *final class* (Fitrah, 2023).

3.5.3.2 Artificial Neural Network (ANN)

Algoritma *K-Nearest Neighbor* (K-NN) merupakan salah satu teknik dalam *supervised learning* yang digunakan untuk mengklasifikasikan suatu data baru berdasarkan kedekatannya dengan sejumlah data lain yang telah memiliki label klasifikasi. Proses klasifikasi dilakukan dengan cara menghitung jarak antara data baru dengan seluruh data dalam dataset, lalu memilih sejumlah data terdekat (tetangga) sebanyak "*k*" dan menentukan kelas dari data baru tersebut berdasarkan mayoritas kelas dari tetangga-tetangga terdekat itu. K-NN termasuk dalam pendekatan *Case-Based Learning*, yang berarti bahwa proses pembelajaran dan pengambilan keputusan dilakukan dengan mengandalkan pengalaman atau contoh kasus yang telah terjadi sebelumnya, sehingga cocok untuk mengidentifikasi pola atau kelompok dari data yang memiliki kemiripan (Ali, 2023).

Dalam praktiknya, algoritma K-NN telah digunakan secara luas dalam berbagai bidang, khususnya pada aplikasi-aplikasi yang berkaitan dengan pengenalan pola dan klasifikasi. Contohnya, K-NN sering dimanfaatkan dalam pengenalan tulisan tangan, pengolahan citra satelit, serta analisis sinyal seperti pola gelombang *Electrocardiogram* (ECG). Dalam pengolahan citra, algoritma ini dapat membantu dalam segmentasi atau klasifikasi objek berdasarkan warna atau tekstur. Dalam konteks medis, K-NN dapat digunakan untuk mendeteksi kelainan dari pola sinyal jantung atau menganalisis data pasien berdasarkan riwayat kondisi serupa. Fleksibilitas dan kesederhanaan K-NN menjadikannya salah satu algoritma favorit

dalam *data mining* dan *pattern recognition*, meskipun performanya sangat bergantung pada kualitas dan ukuran data latih yang digunakan (Veriana *et al.*, 2018).

3.5.3.3 Gaussian Mixture Model (GMM)

Gaussian Mixture Model (GMM) merupakan algoritma yang digunakan untuk memodelkan sekumpulan data ke dalam distribusi Gaussian dengan parameter rata-rata (μ) dan varians (σ^2) tertentu. Data yang dimaksud dalam hal ini berupa nilai-nilai piksel dari citra Sentinel-2. Proses pemodelan GMM dilakukan dengan membentuk suatu fungsi probabilistik (Putra *et al.*, 2017), sebagaimana dijelaskan berikut ini.

$$p(x|\theta) = \sum_z (x, z|\theta)$$

Menurut Patel dan Khushawa (2020), Gaussian Mixture Model (GMM) direpresentasikan sebagai kombinasi linier dari beberapa distribusi probabilitas Gaussian. Model ini dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut.

$$p(X) = \sum_{k=1}^K \pi_k N(X|\mu_k, \Sigma_k)$$

Pendekatan ini didasarkan pada algoritma *Maximum Likelihood* dan *Expectation Maximization (EM)* dengan memanfaatkan fungsi *log maximum likelihood*. Untuk menghindari terjadinya *numerical underflow* yang dapat terjadi akibat perkalian banyak nilai peluang yang sangat kecil, fungsi tersebut kemudian diubah ke dalam bentuk logaritmik, seperti ditunjukkan berikut ini.

$$\ln p(X|\pi, \mu, \Sigma) = \sum_{n=1}^N \ln \left[\sum_{k=1}^K \pi_k N(X_n|\mu, \Sigma) \right]$$

Setiap iterasi dalam algoritma Expectation Maximization (EM) terdiri dari dua tahapan utama, yaitu *E-step* dan *M-step*. Pada *E-step*, data tersembunyi (*hidden data*) diperkirakan berdasarkan data yang teramati dan parameter model yang telah diestimasi sebelumnya. Sementara itu, pada *M-step*, fungsi *likelihood* (batas bawah)

dimaksimalkan dengan asumsi bahwa data tersembunyi sudah diketahui, yaitu menggunakan hasil estimasi dari *E-step*. Model GMM yang telah terbentuk kemudian digunakan untuk menghasilkan model klasifikasi (*classification map*) yang menyajikan visualisasi dari hasil klasifikasi berdasarkan GMM (Ardiansyah *et al.*, 2024).

3.5.4 Uji Validasi

Perhitungan akurasi dilakukan dengan membandingkan jumlah titik sampel yang cocok antara hasil interpretasi citra dan kondisi nyata yang diamati di lapangan. *Confusion matrix* mengintegrasikan perhitungan dari beberapa rumus, yaitu akurasi pengguna (*User's Accuracy*), akurasi pembuat (*Producer's Accuracy*), dan akurasi keseluruhan (*Overall Accuracy*). Akurasi pengguna menunjukkan hasil klasifikasi untuk setiap kategori yang digunakan oleh pengguna. Kelas-kelas penggunaan lahan yang diwakili dalam proses klasifikasi tercermin dalam metode pengukuran akurasi tersebut. Akurasi keseluruhan menggambarkan proporsi klasifikasi yang benar dibandingkan dengan jumlah total pengamatan. Nilai ini dihitung dengan membagi jumlah pengamatan yang diklasifikasikan dengan benar (nilai diagonal pada *confusion matrix*) dengan jumlah total pengamatan.

Perhitungan akurasi pengguna, akurasi pembuat, dan akurasi keseluruhan dilakukan sesuai dengan rumus yang telah ditentukan (Santoso *et al.*, 2024). Perhitungan akurasi dalam penelitian ini menggunakan beberapa indikator, yaitu *User's Accuracy* (UA), *Producer's Accuracy* (PA), dan *Overall Accuracy* (OA) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5. Selanjutnya, tingkat akurasi juga dianalisis menggunakan nilai kappa yang dikategorikan berdasarkan Vierra dan Garret (2005; dalam Santoso *et al.*, 2024) seperti ditunjukkan pada Tabel 6. Untuk menggambarkan hasil perhitungan akurasi klasifikasi, digunakan *confusion matrix* sebagaimana disajikan pada Tabel 7. Diagram uji validasi data penelitian ini secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 6.

Tabel 5. Rumus User Accuracy (UA), Producer's Accuracy (PA), Overall Accuracy (OA).

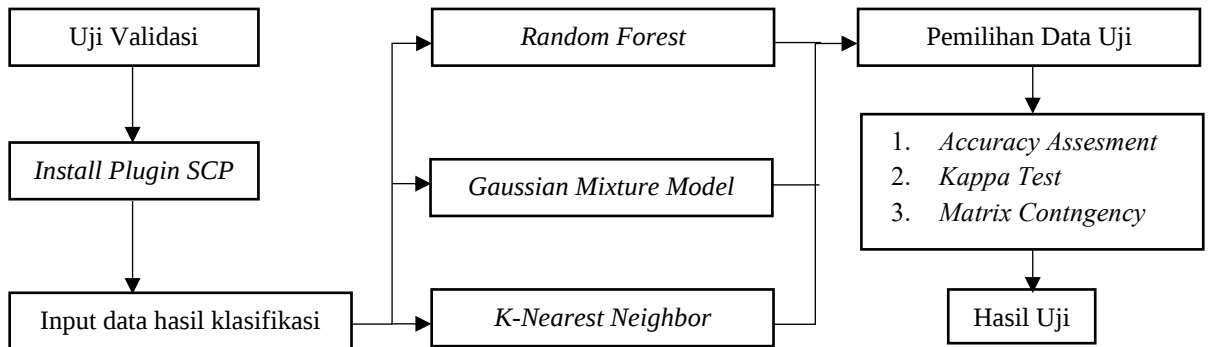
<i>User's Accuracy</i>	$= \frac{x_{ii}}{x_{+i}} \times 100\%$	Berhane <i>et al.</i> (2018)
------------------------	--	------------------------------

$$\text{Producer's Accuracy} = \frac{x_{ii}}{x_{i+}} \times 100\% \quad \text{Maxwell et al. (2021)}$$

$$\text{Overall Accuracy} = \frac{\sum_i^r x_{ii}}{N} \times 100\% \quad \text{Mishra et al. (2021)}$$

Keterangan :

- x_{ii} = Jumlah piksel yang diklasifikasikan dengan benar ke dalam kategori i (diagonal)
- x_{+i} = Jumlah piksel referensi dalam kategori i (total kolom).
- x_{i+} = Jumlah piksel diklasifikasikan ke dalam kategori i (total baris).
- $\sum x_{ii}$ = Total jumlah piksel yang diklasifikasikan benar (total diagonal).
- N = Total Jumlah piksel referensi.



Gambar 6. Diagram Alir Uji Validasi

Pengujian validasi untuk klasifikasi tutupan lahan terbuka hijau merupakan langkah penting untuk memastikan akurasi algoritma yang digunakan dalam identifikasi penggunaan lahan. Proses evaluasi dilakukan dengan menggunakan *error matrix* yang akan menghasilkan nilai akurasi keseluruhan serta *Kappa Coefiecient* untuk setiap jenis penggunaan lahan yang tervalidasi. *Confusion matrix* memberikan gambaran menyeluruh mengenai tingkat akurasi dari masing-masing klasifikasi objek serta interpretasi secara keseluruhan (Yuliana dan Rizqiana, 2024).

$$K = \frac{\sum_{i=1}^1 \pi_{ii} - \sum_{i=1}^1 \pi_i + \pi + i}{1 - \sum_{i=1}^1 \pi_i + \pi + i}$$

Keterangan :

- K = Nilai *Kappa*
- $\sum_{i=1}^1 \pi_{ii}$ = Jumlah proporsi diagonal dari frekuensi observasi

- $\sum_{i=1}^1 \pi_i + \pi_i$ = Jumlah proporsi dari observasi frekuensi marginal

Tabel 6. Kategori akurasi nilai kappa (Vierra dan Garret, 2005; dalam Santoso *et al.*, 2024).

Nilai <i>Kappa</i>	Kategori
$K < 0$	Tidak ada kesepakatan
0.01 – 0.20	Kesepakatan sangat kecil
0.21 – 0.40	Kesepakatan cukup
0.41 – 0.60	Kesepakatan sedang
0.61 – 0.80	Kesepakatan substansial
0.81 – 0.99	Kesepakatan hampir sempurna

Tabel 7. Contoh Tabel *Confusion Matrix*

Algoritma	<i>User's Accuracy</i>	<i>Producer's Accuracy</i>	<i>Overall Accuracy</i>	<i>Kappa Values</i>
RF	...	...	...	...
SVM	...	...	...	...
GMM	...	...	...	...

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Simpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. *Machine Learning* berpotensi dalam mengidentifikasi tutupan lahan terbuka hijau di Kotamadya Bandar Lampung yang dikombinasikan dengan citra Sentinel-2A.
2. *Gaussian Mixture Model* (GMM) merupakan metode terakurat dan terefisien dalam pengidentifikasian tutupan lahan terbuka hijau di Kotamadya Bandar Lampung, karena mendapatkan nilai *Producer's Accuracy* tertinggi sebesar 94,53%, nilai *Overall Accuracy* tertinggi sebesar 93.19%, nilai *Kappa Coefficient* tertinggi sebesar 92.06%, dan waktu komputasi tercepat yaitu 6,28 detik.
3. Tutupan lahan terbuka hijau di Kotamadya Bandar Lampung tahun 2025 berhasil ditampilkan melalui proses klasifikasi citra dengan menggunakan algoritma machine learning. Hasil klasifikasi ini menunjukkan sebaran serta luasan lahan terbuka hijau yang dapat menjadi dasar informasi penting dalam perencanaan tata ruang kota dan pengelolaan lingkungan berkelanjutan. Dengan demikian, penggunaan algoritma machine learning terbukti efektif dalam memvisualisasikan kondisi aktual tutupan lahan terbuka hijau di wilayah penelitian.

5.2 Saran

Adapun saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pemerintah Kota Bandar Lampung perlu memperkuat regulasi terkait perlindungan dan pemanfaatan ruang terbuka hijau agar alih fungsi lahan dapat dikendalikan secara berkelanjutan.

2. Diperlukan peningkatan sosialisasi dan edukasi kepada masyarakat mengenai pentingnya ruang terbuka hijau bagi kualitas lingkungan, kesehatan, dan kenyamanan hidup di perkotaan.
3. Pemerintah daerah dapat mendorong kolaborasi lintas sektor (pemerintah, swasta, akademisi, dan masyarakat) dalam upaya perencanaan, pengelolaan, dan pemeliharaan ruang terbuka hijau.
4. Program insentif atau penghargaan dapat diberikan kepada pihak swasta maupun masyarakat yang berkontribusi dalam menjaga dan menambah ruang terbuka hijau di lingkungannya.
5. Perencanaan tata ruang kota sebaiknya memasukkan indikator keberlanjutan ekologis sebagai pertimbangan utama, sehingga keberadaan ruang terbuka hijau tetap terjamin di tengah laju pertumbuhan pembangunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A. 2023. Monitoring Perubahan Tutupan Lahan di Kota Blitar Berbasis Algoritma Random Forest. *Jurnal Fisika Unand*. 12(3): 410-416.
- Putra, I.M. 2023. *Pengembangan Wilayah*. Prokreatif Media.
- Triwanto, J. 2024. *Peran Agroforestri dalam ketahanan pangan dan kelestarian Lingkungan Secara Berkelanjutan*. UMMPress.
- Azzam, M., HM Musiyam, M.T.P. 2015. *Karakteristik Pemekaran Kota Bogor Dan Evaluasinya Terhadap Pola Ruang*. (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Sastrawan, I.W.W. 2015. Permasalahan Lingkungan Di Kawasan Permukiman Daerah Sempadan Sungai/Kali Code, Jogjakarta. In *Seminar Nasional Tata Ruang Dan Space*. 224-240.
- Fandeli, C. 2021. *Pembangunan kota hijau*. Ugm Press.
- Lestari, D.E., Satrianegara, M.F., Susilawaty, A. 2012. Efektivitas Pengolahan Limbah Cair Domestik dengan Metode Rawa Buatan (Constructed Wetland). *Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar. Makassar*.
- Rohmah, F.N. 2022. Dampak Peningkatan Penggunaan Lahan Non Pertanian Terhadap Harga Tanah di Kecamatan Mojolaban Kabupaten Sukoharjo Tahun 2010-2020.
- Gai, A.M., Witjaksono, A., Maulida, R.R. 2020. *Perencanaan dan Pengembangan Desa*.
- Syamdermawan, W. 2013. *Pengaruh Ruang Terbuka Hijau terhadap Kualitas Lingkungan pada Kawasan Perumahan Menengah Atas Kota Malang*. (Doctoral dissertation, Universitas Brawijaya).
- Efendi, E. 2016. Implementasi sistem pertanian berkelanjutan dalam mendukung produksi pertanian. *Warta Dharmawangsa*. (47).

- Kurnia, U. 2004. Prospek pengairan pertanian tanaman semusim lahan kering. *Jurnal Litbang Pertanian*. 23(4):130-138.
- Khambali, I., ST, M. 2017. *Model Perencanaan Vegetasi Hutan Kota*. Penerbit Andi.
- Mashur, D., Rusli, Z. 2018. Upaya dan implikasi penyediaan ruang terbuka hijau (RTH). *Jurnal Kebijakan Publik*. 9(1): 45.
- Harahap, I.H. 2021. Analisis ketersediaan ruang terbuka hijau dan dampaknya bagi warga kota DKI Jakarta. *Journal of Entrepreneurship, Management and Industry (JEMI)*. 4(1):18-24.
- Kusyanto, M. 2012. Kajian Hutan Kota dalam Pengembangan Kota Demak. *Tatal*. 8(1): 221711.
- Kusmana, C. 2015. Makalah utama: keanekaragaman hayati (biodiversitas) sebagai elemen kunci ekosistem kota hijau. *Pros Sem Nas Masy Biodiv Indon*. 1(8):1747-1755.
- Murti, W., Maya, S. 2021. Pengelolaan Sumber Daya Alam.
- Razak, B.D. 2020. *Prediksi Sedimen Pada Daerah Aliran Sungai Bila Berdasarkan Penggunaan Lahan*. (Doctoral dissertation, UNIVERSITAS HASANUDDIN).
- Andriyani, W., Purnomo, R., Hendrawan, S.A., Irvani, A.I., Sujarwo, A., Asri, Y.N., Jones, A.H.S., Feta, N.R., Wulandari, I.Y., Hatma, S., Suhendi, H.Y., 2024. *Data Sebagai Fondasi Kecerdasan Buatan*. TOHAR MEDIA.
- Ardiansyah, M., Munibah, A., Raniah, N. 2024. Estimasi Umur Padi Menggunakan Sentinel-2 Dengan Pendekatan Gaussian Mixture Model. *Jurnal Ilmu Tanah Lingkungan*. 26(1): 21-28
- Arianti, I. 2013. Ruang Terbuka Hijau.
- Arif, N. 2011. Kajian kemampuan jaringan syaraf tiruan berbasis citra alos dalam identifikasi lahan kritis. Tesis. Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta
- Arif, N., Wahyuni, F.S. 2016. Prnggunaan Metode Machine Learning Untuk Pengenalan Pola Tutupan Lahan Pada Citra Satelit. *SEMNASSTEKNOMEDIA ONLINE*. 4(1):1-2.
- Aulia, T.M.P., Arifin, N., Mayasari, R. 2021. Perbandingan Kernel Support Vector Machine (Svm) Dalam Penerapan Analisis Sentimen Vaksinisasi Covid-19. *SINTECH (Science and Information Technology) Journal*. 4(2): 139-145.

- Badan Pusat Statistik. 2024. Kota Bandar Lampung Dalam Angka 2024.
- Basheer, S., Wang, X., Farooque, A. A., Nawaz, R. A., Liu, K., Adekanmbi, T., Liu, S. 2022. Comparison of land use land cover classifiers using different satellite imagery and machine learning techniques. *Remote Sensing*. 14(19): 1–18.
- Belgiu, M., Drăgu, L. 2016. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 114: 24–31.
- Bimanjaya, A., Handayani, H. H., Rachmadi, R. F. 2024. Penggunaan Deep Learning dan Post-Processing Algoritma Douglas-Peucker untuk Ekstraksi Jaringan Jalan pada Area Urban dari Orthophoto. *GEOID*. 19(2): 371-385.
- Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5–32.
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., Stone, C. J. 1984. *Classification and regression tree*. Florida: Chapman and Hall/CRC Press
- Cintari, N.P., Alifviansyah, K., Tsabitah, D.U., Sartono, B., Firdawanti, A.R. 2024. A Analisis Perbandingan Kinerja Metode Ensemble Bagging dan Boosting pada Klasifikasi Bantuan Subsidi Listrik di Kabupaten/Kota Bogor. *The Indonesian Journal of Computer Science*. 13(6).
- Congedo, L. 2017. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*.
- Danoedoro, P. 1996. *Pengolahan Citra Digital*. Universitas Gadjah Mada.
- Eramudadi, D. and Rokhmana, C.A. 2024. Ekstraksi Permukiman dari Kombinasi Citra Sentinel-2 dan Sentinel-1 dengan Pendekatan Object-Based Image Analysis. *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering*. 7(1): 71-80.
- Fitrah, A. 2023. *Analisis Perubahan Penutupan Lahan Dan Hubungannya Terhadap Suhu Permukaan Lahan Di Kabupaten Sinjai = Analysis Of Land Cover Change And Its Relationship To Land Surface Temperature In Sinjai District*. (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- Fitriyah, Nur, Budi Warsito,, I. Maruddani Di Asih. 2020. Analisis Sentimen Gojek Pada Media Sosial Twitter Dengan Klasifikasi Support Vector Machine (SVM). *Jurnal Gaussian*. 9(3): 376-390.
- Gumilang, M.P.M. 2020. *Analisis hasil koreksi geometri orthorektifikasi citra satelit resolusi tinggi dengan menggunakan DEM SRTM, DEM ALOS-PALSAR, dan DEM NASIONAL (Studi kasus: Kecamatan Wonosari, Kabupaten Malang)*. (Doctoral dissertation, INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG).

- Hapsari, E., Murti, S. H. 2015. Klasifikasi berbasis objek pada citra Pleiades untuk pemetaan ketersediaan ruang terbuka hijau di perkotaan Purwokerto. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XX dan Kongres Masyarakat Peginderaan Jauh Indonesia*. 244-254.
- Hariyono, M.I., Rohkmatuloh,, Dewi, R.S. 2023. Land Use And Land Cover (LULC) Classification With Machine Learning Approach Using Orthophoto Data. *Majalah Ilmiah Globe* 25(1): 87-89
- Hasyim, D., Imran, A., Imran, H. A. 2017. Peran sampling peran sampling dan distribusi data dalam penelitian komunikasi pendekatan kuantitatif (the role of sampling and data distribution in communication research quantitative approach). *Jurnal Studi Komunikasi dan Media*. 21(1): 111–126
- Hatta, H. R., Hidayat, M., Subandi, S., Nuryadhin, S., Samta, S. R., Alfita, R., Rahayu, S. S. 2024. Intelligent System.
- Hesty, R.S., Paramitha, M., Al Hafizh, M. 2022. Ketersediaan Jalur Hijau sebagai Ruang Terbuka Hijau di Koridor Pendidikan Kota Bandarlampung (Studi Kasus: Jalan Za Pagar Alam). *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*. 22(3):1928-1931.
- Kalinda, I.O.P., Sasmito, B., Sukmono, A. 2018. Analisis pengaruh koreksi atmosfer terhadap deteksi land surface temperature menggunakan citra landsat 8 di Kota Semarang. *Jurnal Geodesi Undip*. 7(3): 66-76.
- Kesumawati, A. 2018. Perbandingan Metode Support Vector Machine (SVM) Linear, Radial Basis Function (RBF), dan Polinomial Kernel dalam Klasifikasi Bidang Studi Lanjut Pilihan Alumni UII.
- Koman, W.A.F., Janur A., Putri, F.N.I.D., Pratiwi, G. 2021. Perbandingan Metode Otomatisasi Supervised Machine Learning Terhadap Perubahan Tutupan Lahan. *Prosiding FIT ISI Vol 1*, 301-307
- Kristiani, E. 2022. *Analisis Prediksi Curah Hujan Dan Kelembapan Udara Menggunakan Metode Jaringan Saraf Tiruan Backpropagation Di Kabupaten Muaro Jambi (Doctoral dissertation, Fisika)*.
- Kusrini, I., Shiddiq, M. F. A., Setyanto, A., Kartikakirana, R. A., Adninda, G. B., Yuana, K. A., Hartato, B. P. *DATA SCIENCE GEOSPASIAL*. Penerbit Andi.
- Kusuma, H.M., Sukmono, A., Amarrohman, F.J. 2023. Analisis perkembangan kerapatan hutan mangrove di kota semarang dengan metode normalized difference vegetation index tahun 2017-2022. *Jurnal Geodesi Undip*. 12(4): 388-395.

- Marlina, D. 2022. Klasifikasi tutupan lahan pada citra Sentinel-2 Kabupaten Kuningan dengan NDVI dan algoritme random forest. *STRING (Satuan Tulisan Riset dan Inovasi Teknologi)*. 7(1): 41-49.
- Maulana, D.A., Darmawan, A. 2014. Perubahan penutupan lahan di taman nasional way kambas. *Jurnal Sylva Lestari*. 2(1): 87-94.
- Michael, D., Meena, R. S., Kumar, B. 2024. A Comparative Study of High-level Classification Algorithms for Land Use and Land Cover Classification and Periodic Change Analysis Over Transboundary Ruvu River Basin, Tanzania. *RESEARCH*. 7: 218-235
- Mudjiyanto, B. 2018. Tipe penelitian eksploratif komunikasi. *Jurnal studi komunikasi dan media*. 22(1): 65-74.
- Mujiono, M. 2019. Buku Ajar Pengindraan Jauh Untuk Pertanian.
- Mukhtar, R.A., Ramdani, F., Wicaksono, S.A. 2018. Pembangunan Mobile GIS Analisis Tutupan Lahan pada Kabupaten Trenggalek. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*. 2(9): 3416-3424.
- Muttaqin, N. N. 2024. *Klasifikasi penyakit diabetes menggunakan metode Random Forest dan Adaboost*. (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim).
- Patel, E., Kushwaha, D.S. 2020. Clustering Cloud Workloads: K-Means vs Gaussian Mixture Model. *Procedia Computer Science*. 171. 158-167
- Pradhesta, Y.F., Nurjani, E., Arijuddin, B.I. 2019. Local climate zone classification for climate-based urban planning using landsat 8 imagery (a case study in Yogyakarta Urban Area). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 303, 012022.
- Purboyo, A.A., Kurniawan, A., Ali, L.M. 2024. Identifikasi Tutupan Lahan Menggunakan Support Vector Machine di Kawasan Perkotaan Cekungan Bandung. *Jurnal Komtika*. 8(1): 54-64
- Putra, D.K., Triasmoro, I.I., Ratri, D.A. 2017. Simulasi dan Analisis Speaker Recognition Menggunakan Metode Mel Frequency Cepstrum Coeficient (MFCC) dan Gaussian Mixture Model. *Proceeding of Engineering*. 4(2): 1766-1772
- Putra, R.F., Mukhlis, I.R., Datya, A.I., 2024. *ALGORITMA PEMBELAJARAN MESIN* (online)
- Putri, E. S., Sari, A. W., Karim, R. A., Somantri, L., Ridwana, R. 2021. Pemanfaatan Citra Sentinel-2 untuk analisis vegetasi di wilayah Gunung Manglayang. *Jurnal Pendidikan Geografi Undiksha*. 9(2): 133-143.

- Putri, K.A., Handayani, H.H., 2024. Perbandingan Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan Menggunakan Metode Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM), dan Random Forest (RF) dengan Bahasa Pemrograman R. *GEOID*. 19(2): 349-360.
- Rodriguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., Rigol-Sanchez, J. P. 2012. An Assessment of the Effectiveness of a Random Forest Classifier for Land-Cover Classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 67(1): 93–104.
- Santoso, T., Darmawan, A., Hilmanto, R. 2024. Agroforestry land use land cover area classification using decision tree algorithm. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*. 30(3): 399-399.
- SAPUTRA, W. 2018. *Analisis Geospasial Terhadap Konversi Lahan Non Permukiman Menjadi Lahan Permukiman Dengan Menggunakan Metode Artificial Neural Network (Ann)*. (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- Sinatra, F., Azhari, D., Asbi, A. M., Affandi, M. I. 2022. Prinsip pengembangan ruang terbuka hijau kota sebagai infrastruktur hijau di Kota Bandar Lampung. *Jurnal Planologi*. 19(1): 19-36.
- Sugiyono, D. 2013. Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan Tindakan.
- SYARIF, S. 2013. *Model sistem cerdas untuk deteksi awal penebangan liar kawasan hutan pada daerah aliran sungai* (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).
- T. Zhang, J. Su, Z. Xu, Y. Luo., J. Li, Sentinel-2 satellite imagery for urban land cover classification by optimized random forest classifier, *Appl. Sci*. 11(2): 1–17.
- Tasha, K. 2012. *Pemodelan perubahan penggunaan lahan dengan pendekatan artificial neural network (Studi Kasus: Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau)*. Institut Pertanian Bogor.
- Tassi, A., Vizzari, M. 2020. Object-Oriented Lulc Classification in Google Earth Engine Combining SNIC, GLCM, and Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*. 12(22): 1– 17.
- Trihandaru, S. 2024. *CLUSTERING UNTUK DATA SUARA Studi Kasus Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) dan Long Short Term Memory (LSTM) dengan Internet of Things (IoT) untuk Klasifikasi Suara*. Uwais Inspirasi Indonesia.
- Veriana, K., Hidayat, B., Saidah, S., 2018. Identifikasi Dan Klasifikasi Tutupan Lahan Melalui Pengolahan Citra Google Earth Dengan Metode Singular

Value Decomposition Dan Klasifikasi K-nearest Neighbor. *eProceedings of Engineering*. 5(3).

Wahyuni, F.S., Zah'ro, H.Z., Sasmito, A.P. and Musyafa, M.Z. 2023. Penerapan Metode K-Nearest Neighbor Untuk Klasifikasi Tutupan Lahan. *Prosiding SENIATI*. 7(1): 91-96.

Wahyuningrum, V. 2020. Penerapan Radial Basis Function Neural Network dalam Pengklasifikasian Daerah Tertinggal di Indonesia. *Jurnal Aplikasi Statistika and Komputasi Statistik*. 12(1): 37-54.

Yuliana, H., Rizqiana, Z.C.H., 2024. Analisis Metode Klasifikasi Pemetaan Tutupan Lahan (Land Cover) di Area Kota Bandung Menggunakan Algoritma Random Forest Pada Google Earth Engine. *EPSILON: Journal of Electrical Engineering and Information Technology*. 22(2): 97-106.

ULFI, I., 2023. Perubahan Tutupan Lahan Di Kecamatan Gedong Tataan Kabupaten Pesawaran.

Pratama, A.A., 2022. *Analisis Perubahan Tutupan Lahan Menggunakan Google Earth Engine: Di Wilayah Kerja UPTD KPH Karossa, Provinsi Sulawesi Barat= Analysis of Land Cover Change Using Google Earth Engine: In Working Area of UPTD KPH Karossa, West Sulawesi Province* (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin).

Karasiak, N. 2016. *Dzetsaka: Modul Machine Learning untuk QGIS*. Unpublished educational module cited in Putra, B. T. W. *Modul Machine Learning DZETSAKA untuk QGIS*. Universitas Jember Repository.