

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Urbanisasi merupakan fenomena global yang mendorong pergeseran besar-besaran fungsi lahan di wilayah perkotaan. Seiring meningkatnya kebutuhan permukiman, infrastruktur, dan pusat komersial, ruang terbuka hijau, lahan pertanian, dan hamparan tanah kosong secara perlahan terkonversi menjadi kawasan terbangun. Dinamika alih fungsi lahan ini terjadi di hampir seluruh kota-kota berkembang di Indonesia, membawa dampak serius terhadap keseimbangan ekologis, kualitas lingkungan, serta keberlanjutan tata ruang wilayah (Aziz et al., 2023). Ekspansi kawasan terbangun yang terus berlangsung tanpa evaluasi terukur berpotensi memperburuk fenomena *urban heat island*, meningkatkan risiko genangan air, dan menghambat perencanaan tata ruang yang berbasis data aktual (Hayati et al., 2022).

Kota Surakarta menjadi salah satu representasi nyata dari tekanan urbanisasi tersebut. Dengan luas wilayah yang relatif ringkas, yakni sekitar 46 kilometer persegi, kota ini menanggung kepadatan penduduk yang sangat tinggi sebagai pusat kegiatan ekonomi, budaya, dan pendidikan di kawasan Solo Raya. Keterbatasan ruang yang ada memaksa tata ruang kota beradaptasi secara masif dengan pembangunan infrastruktur, permukiman modern, dan pusat komersial baru terus menggerus tutupan lahan alami di berbagai sudut wilayah kota. Secara konsep geospasial, dinamika ini mengubah tutupan lahan. Tutupan lahan merupakan

perwujudan fisik dari material yang menutupi permukaan bumi, baik berupa objek alami seperti tutupan vegetasi dan badan air, maupun objek buatan manusia seperti aspal dan bangunan (Achmadi et al., 2023). Tutupan lahan terbangun berpengaruh terhadap peningkatan suhu rata-rata di Kota Surakarta sebesar 99,8%, dengan peningkatan suhu rata-rata mencapai sebesar 10,491°C antara tahun 1997 hingga 2017 (Putra et al., 2018).

Bagi Pemerintah Daerah (Pemda), pemetaan tutupan lahan bukan sekadar data geografis, melainkan instrumen vital dalam manajemen perkotaan. Pemda memiliki kewenangan dan kewajiban hukum untuk mengendalikan alih fungsi lahan agar tidak merusak keseimbangan ekologi. Pengendalian ini diatur melalui dokumen Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) dan Rencana Detail Tata Ruang (RDTR). RTRW merupakan produk regulasi berdimensi makro yang menetapkan struktur dan pola peruntukan ruang secara umum di tingkat kota, seperti pembagian kawasan lindung dan kawasan budi daya. Sementara itu, RDTR adalah produk penjabaran dari RTRW yang mengatur zonasi secara lebih spesifik, detail, dan teknis hingga skala blok kawasan, yang secara hukum digunakan sebagai acuan operasional pemberian Izin Mendirikan Bangunan (IMB) atau Persetujuan Bangunan Gedung (PBG). Proses perancangan dokumen ini sangat kompleks karena melibatkan tahap pengumpulan data primer lintas sektoral, kajian akademis yang panjang, hingga konsultasi publik, sebelum akhirnya disahkan menjadi Peraturan Daerah yang berlaku hingga 20 tahun dengan Peninjauan Kembali (PK) minimal setiap lima tahun sekali (Aken Andha, 2024).

Mengingat dokumen tata ruang berlaku dalam jangka waktu yang sangat panjang, Pemda wajib melakukan evaluasi berkala untuk memastikan bahwa kondisi tutupan lahan aktual di lapangan selaras dan tidak melanggar zonasi RTRW/RDTR yang telah ditetapkan. Namun, metode pemantauan yang saat ini dilakukan oleh Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (PUPR) masih bersifat konvensional. Proses pemantauan dilakukan melalui pengadaan survei lapangan dengan metode terestrial melalui inspeksi visual langsung yang melibatkan pengukuran lahan, pendekatan deliniasi, atau mengandalkan laporan perizinan bangunan. Ketergantungan pada metode manual ini menghadirkan kendala operasional yang sangat berat. Survei terestrial menuntut pengerahan tenaga kerja lapangan (*surveyor*) yang banyak dan memakan waktu cukup lama untuk mencakup seluruh area administrasi kota, dan pada akhirnya menyerap anggaran operasional daerah yang tinggi (Latue, 2023). Beban sumber daya yang masif inilah yang membuat pemantauan pembaruan tutupan lahan tidak mungkin dilakukan oleh instansi pemerintah secara rutin setiap tahun. Keterbatasan kritis ini menegaskan urgensi mengapa sebuah instrumen teknologi yang mampu mengotomatisasi pemetaan secara mandiri, murah, dan cepat sangat dibutuhkan saat ini.

Berdasarkan hasil observasi dan wawancara yang telah dilakukan bersama Pak Yuki Riswandha selaku staf tata ruang Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang. Kota Surakarta, proses pemantauan tutupan lahan yang berjalan saat ini masih menemui sejumlah kendala operasional yang krusial. Pelaksanaan pemetaan saat ini sangat bergantung pada ketersediaan Citra Satelit Resolusi Tinggi (CSRT) yang diajukan kepada Badan Informasi Geospasial (BIG). Sistem pemetaan

kemudian dilakukan melalui pendekatan terestrial, yakni pengamatan objek secara visual dan pengukuran langsung di lapangan yang melibatkan survei berskala besar. Sebagai langkah digitalisasi, Dinas PUPR sebenarnya telah memiliki platform Sistem Informasi Tata Ruang (SIMTARU), namun antarmuka sistem tersebut saat ini baru beroperasi sebatas sebagai direktori peta statis tanpa fitur analitik dinamis.

Keterbatasan dari sistem yang berjalan saat ini memberikan hasil dan dampak yang kurang efisien bagi tata kelola wilayah. Pertama, karena pihak BIG tidak menyediakan data CSRT untuk setiap tahun, Dinas PUPR gagal memiliki rekam jejak data tutupan lahan historis yang berkesinambungan setiap tahunnya. Kedua, ketergantungan pada metode survei lapangan konvensional menyerap anggaran operasional, waktu, dan tenaga yang sangat masif, sekaligus rentan terhadap bias subjektivitas petugas survei dalam menginterpretasikan batas transisi lahan. Hasilnya, timbul jeda informasi yang signifikan yang berakibat pada pelanggaran tata ruang atau alih fungsi lahan sering kali baru terdeteksi setelah bangunan fisik selesai didirikan, yang pada akhirnya menghambat proses peninjauan kembali kelayakan dokumen RTRW.

Sebagai respons atas kesenjangan tersebut, penelitian yang akan dilakukan mengusulkan pendekatan klasifikasi tutupan lahan berbasis kecerdasan buatan menggunakan algoritma Random Forest pada citra satelit Sentinel-2 multitemporal. Hal yang menjadi pembeda utama pada penelitian yang akan dilakukan adalah pemisahan arsitektur antara proses komputasi analitik dan antarmuka visual. Seluruh tahapan pra-pemrosesan citra satelit, ekstraksi fitur spektral, hingga klasifikasi menggunakan algoritma *Random Forest* dieksekusi secara *offline*

menggunakan bahasa pemrograman Python. Algoritma *Random Forest* dipilih karena terbukti tangguh terhadap data bervolume besar, stabil terhadap noise citra, dan tidak sensitif terhadap *overfitting* (Prayesy, 2025), dengan capaian akurasi yang telah dibuktikan oleh berbagai studi terdahulu mencapai lebih dari 85% (Prayogi & Setiadi, 2023; Waladi, 2025). Adapun citra satelit Sentinel-2 multitemporal didapatkan melalui penyedia *open source*, yaitu Google Earth Engine.

Hal yang menjadi pembeda utama pada penelitian yang akan dilakukan adalah pemisahan arsitektur antara proses komputasi analitik dan antarmuka visual. Seluruh tahapan pra-pemrosesan citra satelit, ekstraksi fitur spektral, hingga klasifikasi menggunakan algoritma *Random Forest* dieksekusi secara *offline* menggunakan bahasa pemrograman Python. Keputusan untuk memproses data secara *offline* didasarkan pada besarnya dimensi data citra satelit. Menjalankan pelatihan algoritma secara *real-time* di *cloud server* akan memicu pembengkakan biaya pemeliharaan yang tidak efisien bagi instansi tingkat daerah. Sebaliknya, eksekusi *offline* memanfaatkan kapasitas RAM dan CPU lokal secara optimal, mengingat *Random Forest* merupakan algoritma ansambel yang tangguh memproses data paralel tanpa mewajibkan spesifikasi *Graphics Processing Unit* (GPU) kelas atas.

Output dari pemrosesan *offline* berupa data raster peta tutupan lahan yang sudah matang dan terklasifikasi, barulah diintegrasikan ke dalam antarmuka WebGIS menggunakan *framework* FastAPI dengan metode pengembangan menggunakan *Rapid Application Development* (RAD). Melalui pemisahan ini, WebGIS difungsikan murni sebagai dashboard visualisasi. Arsitektur terpisah ini

memastikan WebGIS tetap sangat ringan, memiliki loading time yang cepat, dan sangat responsif saat diakses secara terbuka oleh masyarakat umum maupun perancang tata ruang Pemda, tanpa membebani sistem dengan eksekusi komputasi algoritma yang berat di latar belakang.

Untuk mendukung efektivitas operasional, rancang bangun WebGIS ini mendefinisikan dua tingkatan hak akses pengguna (*user roles*), yakni Pengguna Umum dan Administrator. Hak akses Administrator secara spesifik ditujukan bagi pegawai staf teknis bagian tata ruang Dinas PUPR. Administrator wajib melakukan peninjauan pakar secara *offline* terhadap data hasil model *machine learning* untuk memastikan tidak ada anomali atau kesalahan sebelum data tersebut diunggah dan dikonsumsi oleh publik. Setelah data divalidasi dan diunggah, sistem akan secara otomatis memvisualisasikannya di atas peta dasar interaktif, lengkap dengan fitur komparasi visual dan kalkulasi statistik yang membedah tren alih fungsi lahan antar-tahun. Fitur interaktif ini menjadikan WebGIS bukan sekadar pemapar peta statis, melainkan dashboard dinamis yang mempermudah Dinas PUPR dalam mengevaluasi dinamika spasial wilayah dan mendukung perumusan kebijakan kota secara faktual.

Untuk menjaga integritas sistem, lapisan otentikasi berupa kewajiban memasukkan kata sandi diterapkan guna membuka fitur pengelolaan data. Melalui fitur ini, Administrator Dinas PUPR dapat mengunggah (*upload*) data raster tahun terbaru secara mandiri. Desain unggah mandiri ini merupakan keputusan arsitektur yang disengaja (*by design*) dengan dua pertimbangan utama. Pertama, dari segi efisiensi perangkat lunak, evaluasi RTRW berkarakteristik tahunan atau multi-

tahunan. Membangun jalur pipa data (*data pipeline*) otomatis dari satelit ke *server* untuk data yang jarang diperbarui merupakan bentuk *over-engineering* yang tidak efisien dalam hal biaya pemeliharaan *server*. Kedua, dari segi tata kelola data pemerintahan, sistem ini memerlukan tahap kendali mutu (*Quality Control*).

Sebagai sebuah sistem yang ditujukan untuk menunjang kinerja instansi pemerintah, pengembangan *prototype* WebGIS ini tidak hanya berhenti pada tahap penulisan kode program. Untuk menjamin kelayakan, kualitas, dan kesesuaian sistem sebelum diimplementasikan, diperlukan serangkaian pengujian yang terstruktur. Dari sisi desain, tingkat kenyamanan dan kemudahan interaksi (*usability*) antarmuka WebGIS akan diukur secara kualitatif melalui wawancara. Sementara itu, dari sisi teknis, fungsionalitas sistem akan dievaluasi menggunakan metode *Black Box Testing* guna memastikan seluruh fitur antarmuka, seperti otentikasi kata sandi, navigasi peta, dan pengunggahan data *raster*, berjalan dengan sempurna tanpa adanya galat (*error*). Pengujian ini penting untuk memastikan bahwa tata letak *dashboard* yang dibangun bersifat intuitif dan tidak membingungkan, baik bagi masyarakat umum maupun staf teknis tata ruang.

Lebih jauh lagi, karena sistem ini dirancang secara spesifik sebagai instrumen pemantauan bagi Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (PUPR) Kota Surakarta, pengujian penerimaan pengguna atau *User Acceptance Testing* (UAT) menjadi tahapan yang diperlukan. UAT dilakukan dengan melibatkan langsung perwakilan staf dinas terkait untuk memvalidasi apakah aplikasi yang dibangun benar-benar relevan, dapat diterima, dan mampu mengakomodasi kebutuhan operasional evaluasi tata ruang secara nyata di lapangan. Sebagai

penutup dari rangkaian evaluasi tersebut, kelayakan strategis dari implementasi inovasi WebGIS ini dibandingkan dengan metode pemantauan konvensional akan dianalisis secara mendalam menggunakan kerangka SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*). Melalui analisis SWOT, penelitian yang akan dilakukan diharapkan tidak hanya menghasilkan produk sistem yang fungsional, tetapi juga mampu memberikan pijakan rekomendasi strategis bagi Pemda dalam merumuskan tata kelola wilayah yang lebih modern, efisien, dan berkelanjutan.

Untuk menjamin keberlanjutan (*sustainability*) dari siklus kerja ini di tahun-tahun mendatang, tahapan implementasi sistem ke Dinas PUPR Kota Surakarta tidak hanya sebatas penyerahan aplikasi WebGIS, tetapi juga mencakup fase alih pengetahuan (*transfer knowledge*). Model *Random Forest* beserta alur pra-pemrosesan datanya akan dirancang menjadi sebuah skrip *pipeline* yang sangat modular dan fleksibel. Hal ini memungkinkan staf Dinas PUPR untuk mengeksekusi proses klasifikasi secara utuh sekaligus maupun menjalankannya per tahapan proses sesuai kebutuhan evaluasi instansi. Melalui pendampingan teknis, staf Dinas PUPR akan dibekali pemahaman untuk mengakuisisi citra satelit terbaru secara mandiri, menjalankan skrip *pipeline* kecerdasan buatan tersebut di perangkat komputer instansi, memvalidasi hasil klasifikasinya, hingga mempublikasikannya ke *dashboard* WebGIS. Rangkaian implementasi ini menjamin kemandirian instansi dalam memproduksi dan mengevaluasi data tata ruang yang akurat secara berkelanjutan, tanpa harus bergantung pada pengembang awal.

1.2. Rumusan Masalah

Penelitian yang akan dilakukan berfokus pada pengembangan *machine learning* untuk mendeteksi perubahan lahan pada Kota Surakarta. Beberapa pertanyaan yang akan dijawab dalam penelitian yang akan dilakukan adalah:

- a. Bagaimana menerapkan algoritma *Random Forest* untuk mengklasifikasikan citra satelit menjadi empat kelas tutupan lahan (lahan terbangun, vegetasi, tanah kosong, dan badan air) di wilayah Kota Surakarta sekaligus mengoptimalkan performa klasifikasi model berdasarkan pengujian *Confusion Matrix*?
- b. Bagaimana merancang dan menguji *prototype dashboard* interaktif berbasis *web* (WebGIS) menggunakan metode *Rapid Application Development* (RAD) untuk memvisualisasikan hasil klasifikasi algoritma *Random Forest* sebagai instrumen pemantauan alih fungsi lahan?

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian yang akan dilakukan tetap terfokus pada ruang lingkup yang telah ditentukan dan tidak melebar dari tujuan utama, maka batasan masalah dalam penelitian yang akan dilakukan ditetapkan sebagai berikut:

- a. Data yang digunakan adalah citra satelit Sentinel-2 multitemporal tahun 2021 dan 2025.
- b. Wilayah kajian dibatasi secara spesifik pada batas administratif wilayah Kota Surakarta.
- c. Penelitian hanya berfokus pada klasifikasi terhadap kelas tutupan lahan yang terdiri dari empat kelas, yaitu lahan kosong, lahan terbangun, vegetasi, dan badan air.

- d. Model *Machine Learning* yang diimplementasikan untuk melakukan klasifikasi dan deteksi perubahan lahan difokuskan pada algoritma *Random Forest*.
- e. Pengujian performa dan validasi tingkat keandalan model akhir diukur menggunakan pengujian *Confusion Matrix*, dengan metrik evaluasi berupa Akurasi (*Accuracy*), Presisi (*Precision*), *Recall*, dan *F1-Score*.
- f. Luaran akhir dari penelitian yang akan dilakukan adalah sebuah *prototype* aplikasi sistem informasi geografis berbasis *website* (WebGIS) interaktif yang dikembangkan menggunakan metode *Rapid Application Development* (RAD). WebGIS digunakan sebagai visualisasi hasil dari *machine learning* terkait perubahan tutupan lahan Kota Surakarta.
- g. Tingkatan hak akses pengguna (*user roles*) WebGIS dibagi menjadi dua, yakni Pengguna Umum dan Administrator. Pengguna Umum hanya dapat mengakses WebGIS untuk melihat informasi tanpa perlu login. Administrator memiliki hak akses Pengguna Umum dan fitur *upload* yang membutuhkan kata sandi sebelum dapat digunakan.

1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan memiliki beberapa tujuan yaitu:

- a. Membangun dan mengoptimalkan model *machine learning* menggunakan algoritma *Random Forest* untuk mengklasifikasikan citra satelit multitemporal (tahun 2021 dan 2025) menjadi empat kelas tutupan lahan di Kota Surakarta, serta mengevaluasi performa klasifikasi model melalui pengujian *Confusion Matrix*.

- b. Merancang, mengembangkan, dan menguji *prototype dashboard* interaktif berbasis *web* (WebGIS) menggunakan metode *Rapid Application Development* (RAD) sebagai instrumen visualisasi dan publikasi hasil klasifikasi tutupan lahan bagi masyarakat umum.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan diharapkan dapat memberikan manfaat yang nyata dan aplikatif bagi berbagai pihak, antara lain:

- a. Bagi Pemerintah Daerah Kota Surakarta:
 - 1. Memperoleh sistem analisis spasial-temporal berbasis *machine learning* dengan model komputasi menggunakan algoritma *Random Forest* yang tangguh dan efisien untuk memproses klasifikasi citra satelit serta mendeteksi tren alih fungsi lahan secara berkala, guna meminimalisasi ketergantungan pada survei lapangan konvensional yang padat biaya, waktu, dan tenaga.
 - 2. Memperoleh *prototype* sistem pemantauan tutupan lahan berbasis *website* yang efisien, hemat biaya operasional, dan mutakhir.
- b. Bagi Masyarakat Umum:
 - 1. Memberikan akses transparansi informasi secara visual mengenai perkembangan tata ruang dan lingkungan di Kota Surakarta melalui antarmuka *website* yang interaktif dan mudah dipahami.

2. Meningkatkan kesadaran masyarakat luas terhadap pentingnya menjaga keseimbangan ekologi dan tata guna lahan di lingkungan tempat tinggal mereka.
- c. Bagi Institusi Pendidikan dan Peneliti Selanjutnya:
1. Memberikan kontribusi literatur ilmiah di perpustakaan STMIK AMIKOM Surakarta, khususnya mengenai rekayasa perangkat lunak yang mengintegrasikan penginderaan jauh, optimasi algoritma *Random Forest*, dan metode *Rapid Application Development* (RAD) ke dalam satu kesatuan sistem WebGIS.
 2. Menjadi rujukan, bahan evaluasi, maupun landasan awal bagi penelitian keilmuan Informatika selanjutnya yang ingin mengembangkan arsitektur *Machine Learning* untuk analisis spasial pada kawasan urban.