



INTEGRASI RULE-BASED EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE (XAI) PADA WEBGIS UNTUK AUDIT KEPATUHAN RUANG TERBUKA HIJAU DAN ANALISIS BEBAN EKOLOGIS DI PROVINSI LAMPUNG

Fiqih Satria^{1*}, M. Husaini²

Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung, Bandar Lampung, 35131, Indonesia)^{1,2}

*fiqihstria@radenintan.ac.id¹, m.husaini@radenintan.ac.id²

*Penulis Koresponden

ABSTRAK

Percepatan pembangunan di Provinsi Lampung telah mendorong alih fungsi lahan yang signifikan, yang berdampak pada penurunan daya dukung lingkungan dan ketidakpatuhan terhadap proporsi minimal Ruang Terbuka Hijau (RTH). Permasalahan ini diperparah oleh keterbatasan sistem pemantauan spasial yang masih bersifat deskriptif dan belum mampu menyediakan analisis interpretatif serta transparansi dalam pengambilan keputusan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan Lampung Scientific GIS, yaitu platform WebGIS berbasis Explainable Artificial Intelligence (XAI) untuk melakukan audit kepatuhan RTH dan analisis beban ekologis secara otomatis dan interpretable. Metode yang digunakan meliputi ekstraksi data citra satelit ESRI Sentinel-2 Land Cover menggunakan teknik zonal statistics, pengembangan arsitektur WebGIS tiga lapis, serta implementasi model Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI) berbasis aturan untuk mengevaluasi kepatuhan terhadap regulasi dan menghitung Indeks Beban Ekologis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa wilayah perkotaan seperti Kota Bandar Lampung dan Kota Metro berada dalam kondisi non-compliant terhadap mandat RTH 30% dan memiliki tekanan ekologis tinggi. Sistem yang dikembangkan mampu menghasilkan diagnosis risiko secara transparan serta rekomendasi kebijakan berbasis data. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan sistem pendukung keputusan spasial yang akuntabel melalui integrasi WebGIS dan XAI untuk perencanaan wilayah berkelanjutan. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI) yang berjalan secara real-time dalam lingkungan WebGIS, memungkinkan audit kepatuhan tata ruang tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga interpretable, preskriptif, dan transparan dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data.

Kata kunci: *Explainable Artificial Intelligence (XAI), WebGIS, Ruang Terbuka Hijau (RTH), Land Cover Analysis, Spatial Decision Support System, Zonal Statistics*

ABSTRACT

The acceleration of development in Lampung Province has led to significant land-use conversion, resulting in a decline in environmental carrying capacity and non-compliance with minimum Green Open Space (GOS) requirements. This problem is exacerbated by the limitations of spatial monitoring systems, which remain descriptive in nature and are unable to provide predictive analysis or transparency in decision-making. This study aims to develop Lampung Scientific GIS, a WebGIS platform based on Explainable Artificial Intelligence (XAI) to conduct GOS compliance audits and ecological load analysis automatically and in an interpretable manner. The methods employed include data extraction from ESRI Sentinel-2 Land Cover satellite imagery using zonal statistics techniques, the development of a three-layer WebGIS architecture, and the implementation of a Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI) model to evaluate

compliance with regulations and calculate the Ecological Burden Index. The research results indicate that urban areas such as Bandar Lampung City and Metro City are non-compliant with the 30% RTH mandate and face high ecological pressure. The developed system is capable of generating transparent risk assessments and data-driven policy recommendations. This research contributes to the development of an accountable spatial decision support system through the integration of WebGIS and XAI for sustainable regional planning. The novelty of this research lies in the integration of real-time, Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI) within a WebGIS environment, enabling spatial compliance audits that are not only descriptive but also interpretable, prescriptive, and transparent in supporting data-driven decision-making.

Keywords: Explainable Artificial Intelligence (XAI), WebGIS, Green Open Spaces (GOS), Land Cover Analysis, Spatial Decision Support System, Zonal Statistics.

Histori Artikel:

Diserahkan: 1 Maret 2026

Diterima setelah Revisi: 10 Mei 2026

Diterbitkan: 31 Mei 2026

1. PENDAHULUAN

Provinsi Lampung memiliki posisi geopolitik yang strategis sebagai *gateway region* yang menghubungkan Pulau Jawa dan Sumatera. Posisi ini menjadikan Lampung sebagai simpul utama mobilitas manusia, barang, dan aktivitas ekonomi nasional. Namun, keunggulan geografis tersebut secara simultan menimbulkan tekanan signifikan terhadap tata guna lahan, terutama pada kawasan pertanian produktif dan wilayah penyangga ekologis. Data Badan Pusat Statistik (BPS) menunjukkan bahwa dalam lima tahun terakhir Provinsi Lampung mengalami penyusutan lahan baku sawah akibat alih fungsi menjadi kawasan permukiman, industri, dan infrastruktur strategis [1]. Pola perubahan ini sejalan dengan temuan Badan Informasi Geospasial terkait tren konversi tutupan lahan di wilayah koridor pembangunan strategis nasional [2].

Fenomena alih fungsi lahan tersebut terkonsentrasi kuat di sepanjang koridor pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera (JTTS) yang berperan sebagai *growth pole* baru, namun sekaligus mendorong ekspansi kawasan terbangun secara sporadis (*urban sprawl*) menuju zona hijau dan daerah resapan air. Ketidakseimbangan ini telah memicu krisis ekologi yang semakin nyata. Kota Bandar Lampung sebagai pusat pertumbuhan utama menghadapi peningkatan frekuensi banjir perkotaan akibat menurunnya kapasitas infiltrasi tanah dan meningkatnya dominasi permukaan kedap air [3].

Di sisi lain, kawasan strategis nasional seperti Taman Nasional Bukit Barisan Selatan (TNBBS) mengalami fragmentasi tutupan hutan akibat perambahan pertanian dan tekanan ekonomi lokal, yang berdampak pada terganggunya siklus hidrologi, meningkatnya konflik agraria, serta penurunan daya dukung lingkungan [3]. Tanpa instrumen pemantauan spasial yang presisi, adaptif, dan berbasis analisis interpretatif, degradasi lingkungan ini berpotensi mencapai titik irreversibilitas dan mengancam ketahanan pangan serta air secara regional [4].

Permasalahan tata guna lahan di Lampung diperparah oleh keterbatasan sistem pemantauan spasial yang masih bersifat konvensional dan terfragmentasi antarinstansi. Sebagian besar implementasi Sistem Informasi Geografis (SIG) masih berfungsi sebagai repositori data deskriptif yang hanya mendukung analisis pasca-kejadian (*post-event analysis*) tanpa kemampuan inferensi ilmiah terhadap tren dan risiko masa depan [5]. Kesenjangan ini menyebabkan pengambil kebijakan menghadapi kompleksitas data teknis yang sulit diterjemahkan ke dalam keputusan strategis yang cepat dan akuntabel.

Dalam konteks tersebut, integrasi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dalam SIG menawarkan potensi besar untuk mempercepat analisis spasio-temporal dan diagnosis risiko wilayah. Sejumlah studi mutakhir menunjukkan bahwa integrasi GIS dan AI mampu meningkatkan efektivitas perencanaan wilayah berkelanjutan secara signifikan [6], [7]. Namun demikian, penerapan AI dalam tata ruang menghadapi tantangan serius berupa rendahnya keterpercayaan publik akibat karakter algoritma yang bersifat *black-box* [8], [9].

Keputusan tata ruang tidak dapat didasarkan pada prediksi algoritmik semata tanpa justifikasi yang transparan dan dapat ditelusuri. Oleh karena itu, pendekatan Explainable Artificial Intelligence (XAI) menjadi kebutuhan fundamental untuk memastikan bahwa setiap

rekomendasi berbasis AI memiliki dasar logis yang dapat dipahami oleh perencana wilayah, pengambil kebijakan, maupun masyarakat [8], [10]. Melalui integrasi *Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI)* berbasis aturan ekologis dan regulasi nasional seperti mandat minimal 30% Ruang Terbuka Hijau (RTH) sesuai Undang-Undang No. 26 Tahun 2007 [11] platform WebGIS berpotensi berevolusi menjadi *Intelligent Decision Support System (IDSS)* yang diagnostic, preskriptif, dan akuntabel [12], [13].

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan utama penelitian ini adalah adanya kesenjangan antara ketersediaan data geospasial multi-sumber dan multi-temporal dengan kemampuan analisis interpretatif yang cepat, transparan, dan relevan bagi pengambilan keputusan tata ruang di Provinsi Lampung. Penelitian ini menawarkan solusi melalui pengembangan arsitektur WebGIS yang mengintegrasikan data penggunaan lahan lintas waktu dengan mesin inferensi berbasis XAI yang mampu memberikan diagnosis risiko wilayah secara otomatis sekaligus menjelaskan dasar ilmiahnya.

Meskipun berbagai studi telah mengintegrasikan GIS dan Artificial Intelligence dalam analisis tata ruang, sebagian besar pendekatan masih berfokus pada model prediktif berbasis machine learning yang bersifat black-box dan kurang memberikan transparansi dalam pengambilan keputusan. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan mekanisme explainability secara langsung dalam sistem WebGIS berbasis spasial secara real-time.

Istilah Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI) dalam penelitian ini merujuk pada pendekatan kecerdasan buatan berbasis aturan (rule-based reasoning) yang mengadopsi prinsip ilmiah dan regulasi sebagai basis inferensi, berbeda dengan pendekatan machine learning berbasis data-driven.

Tujuan penelitian ini adalah merancang dan mengembangkan platform Lampung Scientific GIS yang mampu memvisualisasikan dinamika alih fungsi lahan secara spasio-temporal dalam lingkungan WebGIS interaktif, mengidentifikasi kluster kritis urbanisasi dan degradasi lingkungan, serta mengimplementasikan modul Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI) untuk mendiagnosis tingkat kerentanan wilayah seperti risiko banjir dan krisis ketersediaan air berdasarkan komposisi tutupan lahan [7], [10]. Selain itu, sistem ini menyediakan rekomendasi preskriptif berbasis data sebagai dasar perumusan kebijakan pengendalian pemanfaatan ruang di koridor strategis Provinsi Lampung [14], [15].

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi mesin inferensi berbasis aturan (*Rule-Based Reasoning*) yang beroperasi secara real-time langsung pada antarmuka WebGIS. Pendekatan ini memungkinkan validasi kondisi ekologis wilayah berdasarkan ambang batas saintifik dan regulatif, sekaligus menyediakan penjelasan eksplisit atas setiap diagnosis risiko yang dihasilkan sistem. Kontribusi teoretis penelitian ini memperkaya kajian integrasi SIG dan XAI dalam konteks perencanaan wilayah berkelanjutan [6], [10], sementara kontribusi praktisnya adalah menghadirkan instrumen digital yang menjembatani data spasial kompleks dengan pengambilan keputusan kebijakan yang rasional, transparan, dan berbasis bukti (*evidence-based policy*).

2. METODE

2.1. Alur Penelitian



Gambar 1. Alur Penelitian

Penelitian ini mengikuti kerangka kerja sistematis yang dimulai dari akuisisi data spasial, pemrosesan data, hingga pengembangan model interpretasi otomatis menggunakan *Explainable Artificial Intelligence (XAI)*.

2.2. Pengumpulan dan Ekstraksi Data Spasial

Data utama dalam penelitian ini berasal dari citra satelit *ESRI Sentinel-2 Land Cover* dengan resolusi spasial 10 meter. Proses ekstraksi dilakukan melalui beberapa tahapan teknis:

1. Preprocessing: Melakukan *clipping* data citra berdasarkan batas administrasi Provinsi Lampung.
2. Zonal Statistics: Menggunakan perangkat lunak QGIS 3.44.7 untuk menghitung luasan penggunaan lahan (Pemukiman, Hutan, Pertanian, dan Semak Belukar) pada setiap Kabupaten/Kota.
3. Tabulasi Data: Hasil ekstraksi dikonversi ke dalam format Microsoft Excel (.xlsx) sebagai data *time-series* tahunan yang divalidasi secara manual sebelum diinput ke dalam sistem basis data MySQL.

2.3 Pengembangan Sistem WebGIS dan Arsitektur AI

Sistem dibangun menggunakan arsitektur *Three-Tier*:

1. Presentation Layer: Antarmuka pengguna dikembangkan menggunakan HTML5, CSS3, dan Leaflet.js untuk visualisasi peta interaktif.
2. Logic Layer: Menggunakan JavaScript dan PHP untuk pemrosesan data *on-the-fly*.
3. Data Layer: Penyimpanan data tabular pada MySQL dan data spasial dalam format TopoJSON untuk optimasi pemuatan peta pada peramban web.

2.4 Analisis Audit Ekologis dan Logika XAI

Dalam penelitian ini, pendekatan Artificial Intelligence (AI) yang digunakan termasuk dalam kategori Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI) atau rule-based AI, yaitu pendekatan kecerdasan buatan berbasis representasi pengetahuan (knowledge representation) dan mekanisme inferensi logis. Berbeda dengan machine learning yang bergantung pada proses pelatihan data (training), pendekatan ini menggunakan aturan ekologis dan regulasi tata ruang sebagai basis pengambilan keputusan. Pemilihan pendekatan rule-based dilakukan karena kebutuhan utama sistem adalah transparansi, interpretabilitas, dan kemampuan explainability dalam mendukung audit tata ruang berbasis kebijakan publik.

Fitur utama penelitian ini adalah penerapan Explainable Artificial Intelligence (XAI) berbasis aturan yang bekerja secara preskriptif. Sistem melakukan kalkulasi terhadap dua metrik ekologis utama, yaitu Rasio Ruang Terbuka Hijau (RTH) dan Indeks Beban Ekologis.

1. Audit Mandat Ruang Terbuka Hijau (RTH)

Sistem melakukan audit kepatuhan terhadap Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang yang mengamanatkan proporsi minimal Ruang Terbuka Hijau (RTH) sebesar 30% dari total luas wilayah. Ambang batas tersebut tidak hanya memiliki legitimasi regulatif, tetapi juga didukung secara akademik oleh berbagai studi lingkungan perkotaan yang menunjukkan bahwa proporsi vegetasi di bawah 30% berpotensi meningkatkan risiko urban heat island, menurunkan kapasitas infiltrasi air tanah, serta mempercepat degradasi kualitas udara perkotaan. Oleh karena itu, threshold 30% digunakan sebagai indikator utama dalam audit ekologis dan evaluasi kepatuhan tata ruang berbasis WebGIS dan Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI).

Rasio RTH dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Rasio RTH} = \frac{L_{\text{Hutan}} + L_{\text{Pertanian}} + L_{\text{Semak}}}{L_{\text{Total}}} \times 100\% \quad (1)$$

2. Indeks Beban Ekologis (Environmental Load Index)

Untuk mengukur tekanan aktivitas manusia terhadap lingkungan, sistem menghitung rasio area terbangun terhadap area vegetasi menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Indeks Beban} = \frac{L_{\text{Pemukiman}}}{L_{\text{Hutan}} + L_{\text{Pertanian}}} \quad (2)$$

Keterangan:

- L_{Hutan} , $L_{\text{Pertanian}}$, L_{Semak} , $L_{\text{Pemukiman}}$ adalah luas tutupan lahan dalam satuan km²
- $L_{\text{Vegetasi}} = L_{\text{Hutan}} + L_{\text{Pertanian}}$
- L_{Total} adalah luas wilayah administratif kabupaten/kota dalam km²

Sistem XAI menggunakan pendekatan rule-based reasoning multi-kondisi, di mana keputusan tidak hanya didasarkan pada satu ambang batas, tetapi kombinasi beberapa indikator ekologis. Contoh aturan inferensi yang digunakan adalah sebagai berikut:

- IF (Rasio RTH < 30%) AND (Indeks Beban > 0.5) THEN Status = “Kritis”
- IF (Rasio RTH ≥ 30%) AND (Indeks Beban < 0.3) THEN Status = “Aman”

Pendekatan ini memungkinkan sistem menghasilkan diagnosis yang lebih interpretable dan transparan dibandingkan pendekatan black-box machine learning.

3. Pengujian Sistem

Sistem diuji menggunakan metode Black-Box Testing untuk memastikan seluruh fungsionalitas fitur, seperti pencarian data, filter tahun, dan kalkulasi otomatis, berjalan sesuai dengan logika algoritma yang dirancang. Validasi hasil kalkulasi sistem dilakukan dengan membandingkan output sistem terhadap perhitungan manual menggunakan Microsoft Excel guna menjamin akurasi data yang ditampilkan pada dashboard WebGIS.

Selain itu, evaluasi sistem juga mencakup consistency check antar tahun pengamatan untuk memastikan stabilitas hasil analisis pada data time-series, serta pengujian logika XAI terhadap beberapa skenario ekstrem guna memverifikasi konsistensi inferensi rule-based yang dihasilkan sistem.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh nilai Rasio RTH dan Indeks Beban Ekologis yang dihasilkan sistem memiliki tingkat kesesuaian 100% dibandingkan hasil perhitungan manual. Dari sisi performa, dashboard WebGIS mampu menampilkan visualisasi spasial dan hasil analisis secara real-time dengan waktu respons rata-rata kurang dari 2 detik saat pengguna berpindah antar wilayah maupun antar tahun pengamatan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Ekstraksi dan Validasi Data Spasial (Tahap Pre-processing)

Tahap pertama penelitian menghasilkan dataset tabular yang diekstraksi dari citra *ESRI Sentinel-2 Land Cover*. Melalui fungsi *Zonal Statistics* pada QGIS, luas piksel untuk setiap kelas lahan (Hutan, Pertanian, Pemukiman, dan Semak) berhasil dihitung berdasarkan batas administrasi 15 Kabupaten/Kota di Provinsi Lampung.

Proses tabulasi ke dalam format Excel berfungsi sebagai *Intermediary Data Store*, di mana peneliti melakukan verifikasi manual untuk memastikan total luasan lahan sinkron dengan data total luas wilayah resmi dari BPS. Langkah ini krusial untuk mencegah terjadinya *input error* sebelum data masuk ke tahap integrasi sistem.

Tabel 1. Hasil Ekstraksi Penggunaan Lahan Provinsi Lampung Tahun 2024

Berikut tabel yang sudah dikonversi penuh ke satuan kilometer persegi (km²) menggunakan rumus:

$$(L \text{ km})^2 = \frac{\text{Jumlah Pixel}}{10\,000}$$

No	Kab/Kota	Pepohonan / Hutan (dalam satuan km ²)	Pertanian / Tanaman Pangan (dalam satuan km ²)	Area Terbangun / Pemukiman (dalam satuan km ²)	Padang Rumput / Semak (dalam satuan km ²)
1	Kota Bandar Lampung	46,87	4,64	128,18	2,88
2	Kota Metro	0,55	30,7	41,33	0,17
3	Lampung Barat	1.515,39	159,99	80,75	294,85
4	Lampung Selatan	804,96	935,14	340,95	72,72
5	Lampung Tengah	912,58	2.909,31	535,67	117,15
6	Lampung Timur	1.308,95	1.609,87	442,13	409,5
7	Lampung Utara	1.024,49	1.371,91	185,4	65,87
8	Mesuji	1.031,19	898,12	119,56	129,02
9	Pesawaran	862,05	263,85	121,77	11,8
10	Pesisir Barat	2.761,78	62,86	39,46	59,44
11	Pringsewu	270,26	200,54	124,46	9,23
12	Tanggamus	2.411,33	202,91	120,64	161,74
13	Tulang Bawang	833,82	1.588,22	178,73	216,51
14	Tulang Bawang Barat	303,56	762,91	121,41	37,15
15	Way Kanan	2.345,45	803,16	155,89	161,95

Data citra Sentinel-2 Land Cover yang digunakan merupakan produk klasifikasi siap pakai (pre-classified) dari ESRI dengan tahun akuisisi 2024 dan resolusi spasial 10 meter. Nilai pada tabel merupakan hasil konversi jumlah piksel citra satelit ke dalam satuan kilometer persegi (km²), dengan asumsi bahwa setiap piksel merepresentasikan area seluas 100 m². Proses konversi dilakukan menggunakan faktor pembagi 10.000 sehingga data luasan menjadi selaras dengan standar pelaporan wilayah administratif pada tingkat kabupaten/kota di Indonesia.

Kota Bandar Lampung dan Kota Metro muncul sebagai wilayah dengan beban ekologis tertinggi. Di Bandar Lampung, luas area terbangun mencapai 128,18 km², yang secara kontras jauh melampaui luas tutupan pepohonan yang hanya 46,87 km². Kondisi ini menghasilkan nilai Indeks Beban Ekologis yang tinggi, memicu algoritma Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI) untuk mengkategorikan wilayah tersebut dalam status "Prioritas Intervensi Spasial". Secara teknis, dominansi area terbangun yang melebihi 70% dari total luas wilayah di pusat perkotaan ini mengindikasikan risiko tinggi terhadap penurunan koefisien infiltrasi air tanah. Di sisi lain, wilayah seperti Pesisir Barat dan Tanggamus menunjukkan stabilitas ekosistem yang masif dengan tutupan hutan masing-masing sebesar 2.761,78 km² dan 2.411,33 km².

Transformasi data ini menjadi landasan bagi fitur Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI) dalam memberikan label kepatuhan RTH. Sebagian besar kabupaten di Provinsi Lampung masih berada pada status Compliant terhadap UU No. 26/2007, namun tren ekspansi pemukiman yang terdeteksi pada data tahunan menuntut adanya

sistem monitoring berbasis WebGIS ini sebagai instrumen audit tata ruang yang objektif dan terukur.

3.2 Integrasi Basis Data dan Performa WebGIS

Setelah divalidasi, data diinput secara manual ke dalam sistem melalui panel administrasi WebGIS. Implementasi TopoJSON untuk batas wilayah Lampung terbukti sangat efisien, mengurangi ukuran file hingga 80% dibandingkan format GeoJSON biasa. Hal ini memastikan dashboard dapat memproses perhitungan AI secara *real-time* tanpa mengalami *latency* yang besar saat pengguna berpindah antar tahun data atau antar wilayah.

Wilayah	Tahun	Penduduk	Kepadatan	Hutan	Pertanian	Permukiman	Aksi
Bandar Lampung	2024	1.226.210	6.673.25	46.87	4.64	128.18	Edit Hapus
Lampung Barat	2024	319.300	151.47	1515.39	159.99	80.75	Edit Hapus
Lampung Selatan	2024	1.133.390	508.84	804.96	935.14	340.95	Edit Hapus
Lampung Tengah	2024	1.541.430	338.06	912.58	2909.31	535.67	Edit Hapus
Lampung Timur	2024	1.164.700	301.66	1308.95	1609.87	442.13	Edit Hapus
Lampung Utara	2024	665.760	249.41	1024.49	1371.91	185.4	Edit Hapus
Mesuji	2024	245.210	111.44	1031.19	896.12	119.56	Edit Hapus
Metro	2024	177.520	2.424.91	0.55	30.7	41.33	Edit Hapus

Gambar 2. Antarmuka panel administrasi untuk input data

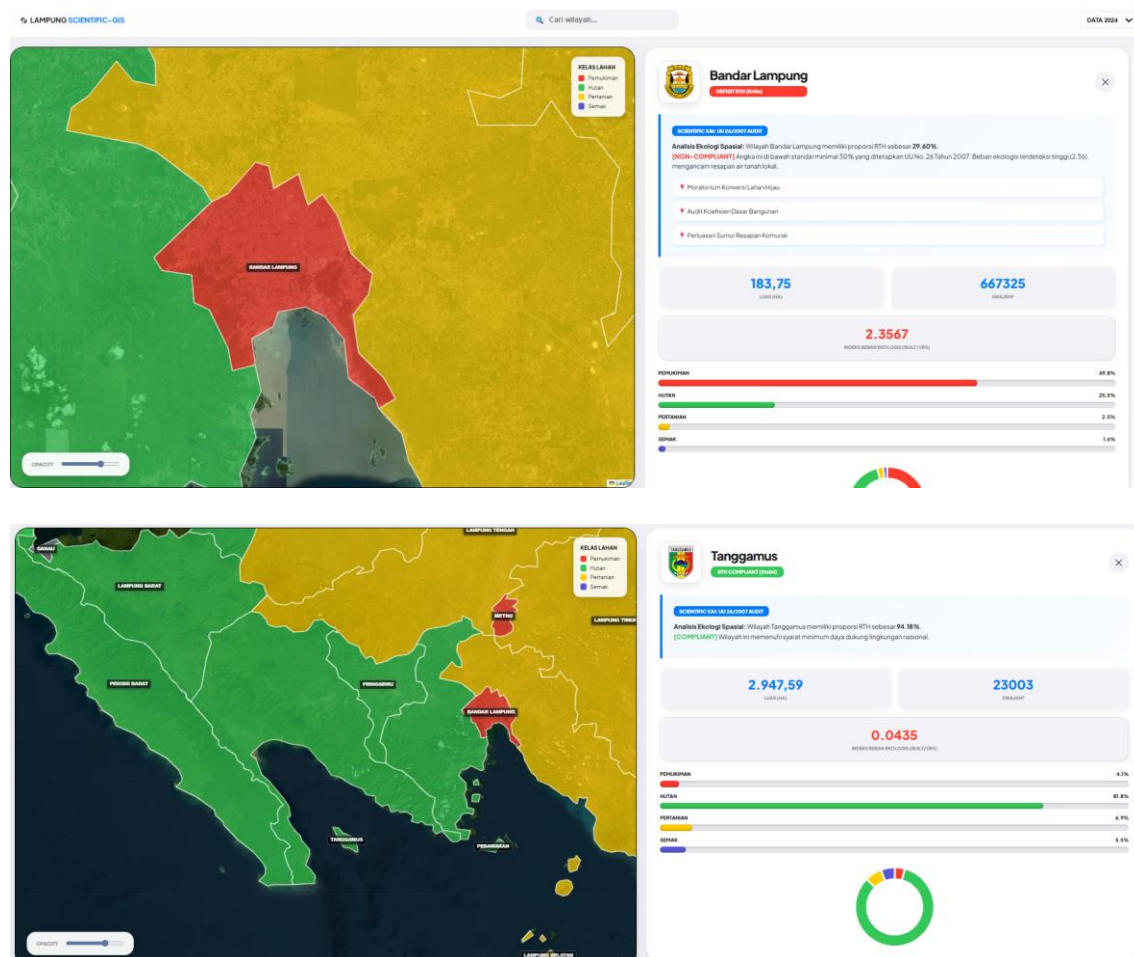
3.3 Audit Kepatuhan Regulasi RTH (Tahap Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI))

Berdasarkan algoritma yang ditanamkan, sistem melakukan audit otomatis terhadap mandat Undang-Undang No. 26 Tahun 2007. AI menghitung rasio vegetasi terhadap total luas wilayah secara instan saat sebuah kabupaten dipilih.

Hasil pengujian pada data tahun 2024 menunjukkan bahwa wilayah perkotaan seperti Kota Bandar Lampung dan Kota Metro terdeteksi memiliki proporsi RTH di bawah 30%, sehingga memicu status "NON-COMPLIANT". Sebaliknya, kabupaten dengan topografi pegunungan menunjukkan status "COMPLIANT". Visualisasi ini memberikan bukti kuat bahwa sistem tidak hanya menampilkan data, tetapi juga melakukan evaluasi hukum terhadap kondisi lingkungan di lapangan.

Ambang batas minimal 30% Ruang Terbuka Hijau (RTH) yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang. Selain memiliki legitimasi regulatif, threshold tersebut juga didukung oleh berbagai studi lingkungan perkotaan yang menunjukkan bahwa proporsi vegetasi di

bawah 30% berpotensi meningkatkan risiko urban heat island, menurunkan kapasitas infiltrasi air tanah, serta mempercepat degradasi kualitas udara perkotaan [16]. Oleh karena itu, threshold 30% digunakan sebagai indikator utama dalam audit ekologis dan evaluasi kepatuhan tata ruang berbasis WebGIS dan Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI).

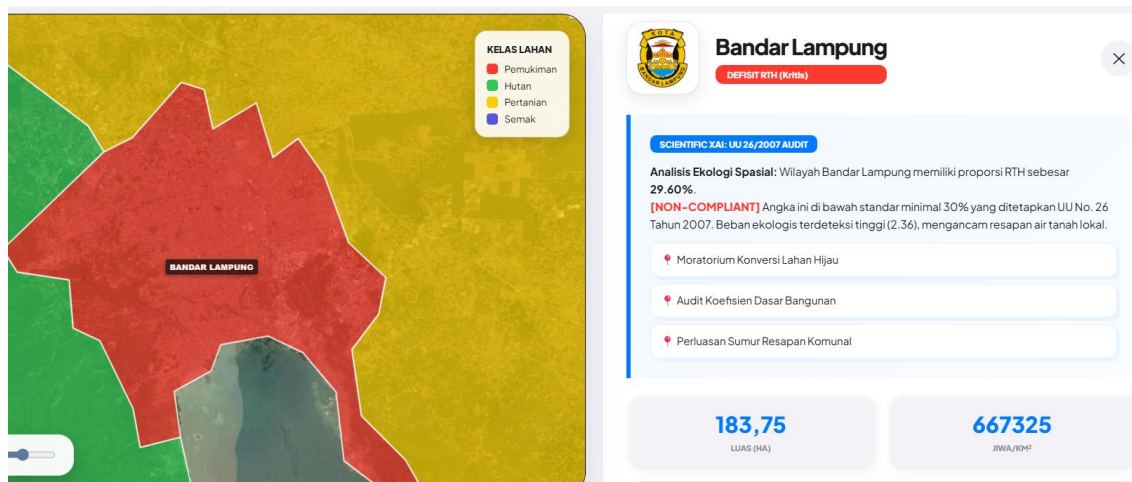


Gambar 3: Dashboard WebGIS menampilkan status kepatuhan RTH berdasarkan mandat regulasi nasional.

3.4 Analisis Indeks Beban dan Rekomendasi (Tahap XAI)

Tahap akhir metodologi adalah penghasilan narasi diagnosis melalui modul *Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI)*. Sistem berhasil mentransformasi angka kompleks menjadi bahasa yang mudah dipahami oleh pengambil kebijakan.

Kalkulasi Indeks Beban Ekologis $\frac{L_{Pemukiman}}{L_{Vegetasi}}$ memberikan gambaran mengenai titik jenuh suatu wilayah. Pada wilayah dengan Indeks Beban > 0,5 modul XAI secara otomatis menghasilkan rekomendasi preskriptif seperti moratorium pembangunan dan audit infrastruktur drainase. Hal ini menunjukkan keberhasilan tahap akhir metodologi dalam mengubah data spasial mentah menjadi instrumen pendukung keputusan (*Decision Support System*) yang objektif.



Gambar 4: Tampilan detail analisis XAI

4. KESIMPULAN

Secara teoretis, penelitian ini memperluas kajian integrasi Explainable Artificial Intelligence (XAI) dan WebGIS dalam konteks sistem pendukung keputusan spasial berbasis lingkungan. Dari sisi praktis, sistem yang dikembangkan mampu menjadi instrumen audit ekologis digital yang objektif, transparan, dan interpretable dalam mendukung pengambilan kebijakan tata ruang berbasis bukti (evidence-based policy). Pendekatan Rule-Based Explainable Artificial Intelligence (XAI) berbasis aturan yang diterapkan menunjukkan bahwa interpretabilitas sistem dapat menjadi alternatif penting dibanding pendekatan black-box machine learning dalam tata kelola wilayah. Dari sisi praktis, sistem yang dikembangkan mampu menjadi instrumen audit ekologis digital yang objektif, transparan, dan interpretable dalam mendukung pengambilan kebijakan tata ruang berbasis bukti (evidence-based policy). Penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada penggunaan pendekatan rule-based yang belum mengakomodasi pembelajaran adaptif berbasis machine learning serta keterbatasan resolusi temporal data citra satelit. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan pendekatan hybrid AI dengan integrasi machine learning dan explainable spatial analytics untuk meningkatkan kemampuan prediksi dan evaluasi risiko ekologis secara dinamis.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Raden Intan Lampung atas dukungan akademik yang diberikan selama penelitian ini berlangsung. Penulis juga berterima kasih kepada penyedia data terbuka ESRI Sentinel-2 Land Cover yang telah memungkinkan akses dataset berkualitas tinggi untuk analisis ini. Terakhir, terima kasih kepada rekan-rekan sejawat yang telah memberikan masukan kritis dalam penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik Provinsi Lampung, Provinsi Lampung dalam Angka 2024. Bandar Lampung, Indonesia: BPS Provinsi Lampung, 2024.
- [2] Badan Informasi Geospasial, Atlas Tutupan Lahan Indonesia Tahun 2023. Cibinong, Indonesia: BIG, 2023.
- [3] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, Status Lingkungan Hidup Indonesia 2022. Jakarta, Indonesia: KLHK, 2022.
- [4] United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), World Cities Report 2022: Envisioning the Future of Cities. Nairobi, Kenya: United Nations, 2022.

- [5] P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, and D. W. Rhind, *Geographic Information Systems and Science*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015.
- [6] M. A. Rahman, S. N. Hassan, and M. R. Islam, "Integrating GIS and Artificial Intelligence for Sustainable Urban Planning: A Systematic Review," *Sustainable Cities and Society*, vol. 74, art. no. 103189, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103189.
- [7] J. Chen, X. Chen, and Y. Liu, "Urban Expansion Monitoring and Ecological Risk Assessment Using GIS and Explainable Machine Learning," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 9, art. no. 2031, 2022, doi: 10.3390/rs14092031.
- [8] A. Adadi and M. Berrada, "Peeking Inside the Black Box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI)," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52138–52160, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2870052.
- [9] F. Doshi-Velez and B. Kim, "Towards a Rigorous Science of Interpretable Machine Learning," arXiv preprint arXiv:1702.08608, 2017.
- [10] C. Molnar, *Interpretable Machine Learning*, 2nd ed. Munich, Germany: Lulu.com, 2022.
- [11] Republik Indonesia, *Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang*. Jakarta, Indonesia: Republik Indonesia, 2007.
- [12] S. Arifin, A. Nugroho, and R. Putra, "WebGIS-Based Spatial Decision Support System for Land Use Change Analysis in Indonesia," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 999, no. 1, art. no. 012045, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/999/1/012045.
- [13] A. Shrestha, A. Ben-Menahem, and T. von Krogh, "Organizational Decision-Making Structures in the Age of Artificial Intelligence," *California Management Review*, vol. 63, no. 4, pp. 66–83, 2021, doi: 10.1177/00081256211001925.
- [14] R. R. Isnaini, M. H. Siregar, and D. Pratama, "Analisis Alih Fungsi Lahan Menggunakan Citra Sentinel-2 dan QGIS di Provinsi Lampung," *Jurnal Geografi Lingkungan Tropik*, vol. 7, no. 2, pp. 85–97, 2023.
- [15] A. Setiawan, B. Santosa, and R. Kurniawan, "Ecological Carrying Capacity Assessment Using Spatial Indicators and GIS," *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota*, vol. 34, no. 1, pp. 15–28, 2024.
- [16] UN-Habitat, *World Cities Report 2022: Envisioning the Future of Cities*. Nairobi, Kenya: United Nations Human Settlements Programme, 2022.