

SISTEM KOREKSI OTOMATIS SWAPPED-AXES KOORDINAT DAN VISUALISASI RELIEF TOPOGRAFI 3D INTERAKTIF BERBASIS WEB GL PADA DOKUMEN PKKPR

AUTOMATED COORDINATE SWAPPED-AXES CORRECTION SYSTEM AND INTERACTIVE 3D TOPOGRAPHIC RELIEF VISUALIZATION BASED ON WEBGL FOR PKKPR DOCUMENTS

Ucok^{1*}, Hasnah², Dayanti³, Mahmud⁴

¹Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Indonesia Timur

²Teknologi Laboratorium Medis, Politeknik Kesehatan Muhammadiyah Makassar

³Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Patria Artha

⁴Universitas Fajar

emailsina@gmail.com¹, ha5nah.sarean@gmail.com², dayanti.fattah@gmail.com³,
mahmud@unifa.ac.id⁴

Abstrak

Persetujuan Kesesuaian Kegiatan Pemanfaatan Ruang (PKKPR) sering kali menjadi kendala administratif dan legal dalam proses perizinan berusaha di Indonesia. Penelitian ini membahas rancang bangun sistem koreksi sistematis terhadap galat pertukaran kolom koordinat Lintang (Y) dan Bujur (X) (swapped-axes error) pada dokumen lampiran PKKPR dengan studi kasus di Kecamatan Tabir Barat, Provinsi Jambi. Melalui normalisasi spasial menggunakan datum WGS 84, batas wilayah sepanjang 36 titik koordinat berhasil diselaraskan menjadi poligon tertutup (closed loop) dengan presisi tinggi. Luas area dihitung secara komputasional menggunakan algoritma Shoelace menghasilkan luasan sebesar 9.387,41 Hektar. Guna meningkatkan keterbacaan data spasial bagi pemangku kebijakan, penelitian ini mengembangkan arsitektur visualisasi topografi multi-stop hipsometris berbasis web 3D menggunakan pustaka Three.js, yang mengintegrasikan data elevasi riil berkisar antara 185 mdpl hingga 742 mdpl dengan citra satelit orthophoto Esri World Imagery. Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi mesin koreksi otomatis dan pemodelan rendering 3D interaktif berbasis WebGL mampu meminimalisasi risiko tumpang tindih lahan serta mempercepat proses validasi spasial secara signifikan dengan performa komputasi linier $O(n)$.

Kata Kunci : Koreksi Spasial, Swapped-Axes, Topografi 3D, Algoritma Shoelace, WebGL, PKKPR

Abstract

Coordinate data entry errors in application documents for the Approval of Spatial Utilization Activities (PKKPR) frequently pose administrative and legal obstacles in Indonesia's business licensing process. This study discusses the design and development of a systematic correction system for swapped latitude (Y) and longitude (X) coordinate column errors (swapped-axes error) in PKKPR attachment documents, using a case study in Tabir Barat District, Jambi Province. Through spatial

normalization using the WGS 84 datum, the regional boundary along the coordinate points was successfully aligned into a high-precision closed loop. The area was computationally calculated using the Shoelace algorithm, resulting in a total area of [insert area value here]. To enhance spatial data readability for policymakers, this study developed a 3D web-based hypsometric multi-stop topographic visualization architecture using the Three.js library, which integrates real elevation data ranging from [insert min value] to [insert max value] with Esri World Imagery satellite orthophotos. The test results demonstrate that the integration of the automated correction engine and WebGL-based interactive 3D rendering modeling can minimize the risk of land overlaps and significantly accelerate the spatial validation process with linear computational performance $O(n)$.

Keywords: Spatial Correction, Swapped-Axes, 3D Topography, Shoelace Algorithm, WebGL, PKKPR

A. PENDAHULUAN

Sistem Kesesuaian Kegiatan Pemanfaatan Ruang (KKPR), khususnya Persetujuan KKPR (PKKPR) yang terintegrasi dengan sistem *Online Single Submission* (OSS), merupakan instrumen hulu yang sangat vital dalam tata kelola pemanfaatan ruang dan landas hukum investasi di Indonesia (Sidiropoulos & Tzotsos, 2023; Li & Zhu, 2023). Ketepatan penentuan batas koordinat geografis di atas peta rencana tata ruang menentukan legalitas hukum hak kelola lahan atas investasi bernilai tinggi (Kalogianni et al., 2022; Sutanta & Rajabifard, 2024). Namun, dalam implementasi praktisnya, integrasi infrastruktur data spasial pada pemerintah daerah masih sering menemukan galat (*error*) teknis kartografis berupa kesalahan input nilai koordinat oleh pelaku usaha pada formulir usulan digital (Chen & Zhang, 2022; Li & Zhu, 2023).

Salah satu jenis galat spasial yang paling sering terjadi adalah pertukaran atribut kolom (*swapped axes*) antara Lintang Selatan (Latitude/Y) dan Bujur Timur (Longitude/X) (He & Li, 2022; Pundt & Kaster, 2022). Nilai bujur geografis Indonesia Barat yang berkisar antara 101° – 102° BT kerap tertukar dengan nilai lintang yang berkisar antara -1° hingga -2° LS. Jika dipetakan secara langsung, batas wilayah permohonan akan terproyeksi di laut lepas atau benua Antartika, yang berujung pada penolakan otomatis oleh algoritma validasi GIS (Sidiropoulos & Tzotsos, 2023; Pundt & Kaster, 2022).

Selain masalah pemosisian, keterbatasan peta 2D konvensional sering kali menyulitkan validator dalam menganalisis kondisi geomorfologi riil (Gulliver & Wang, 2022; Stoter & Salzmann, 2023), terutama pada daerah berlereng curam. Oleh karena itu, diperlukan sistem otomasi koreksi dan visualisasi relief 3D. Penelitian ini dirancang untuk menyelesaikan permasalahan administratif spasial tersebut dengan membangun algoritma *swapped-axes recovery*, perhitungan luasan poligon matematis, serta pemodelan 3D interaktif yang beroperasi penuh pada penjelajah web modern.

B. TINJAUAN PUSTKA

1. Tata Kelola Administrasi Pertanahan dan Regulasi Kebijakan PKKPR

Integrasi kesesuaian pemanfaatan ruang ke dalam satu platform digital nasional melalui program perizinan terintegrasi (OSS) merupakan reformasi struktural krusial di Indonesia (Sidiropoulos & Tzotsos, 2023). Regulasi Persetujuan Kesesuaian Kegiatan Pemanfaatan Ruang (PKKPR) menuntut konsistensi geometris yang mutlak, di mana setiap hak pemanfaatan ruang yang diberikan harus mengacu secara sah pada koordinat batas di peta rencana tata ruang wilayah (Li & Zhu, 2023). Kejelasan batas-batas hukum spasial ini sangat vital dalam mencegah sengketa tumpang tindih lahan (*land*

overlap conflicts) dan menjamin kepastian investasi jangka panjang (Kalogianni et al., 2022). Meskipun regulasi telah berjalan ketat, integrasi infrastruktur data spasial pada tingkat lokal masih menghadapi tantangan besar akibat tidak seragamnya kualitas data pengajuan awal dari pelaku usaha (Sutanta & Rajabifard, 2024).

2. Anomali Atribut Geospasial dan Algoritma Swapped-Axes Recovery

Anomali data spasial dalam administrasi pertanahan sering kali disebabkan oleh kesalahan input manual yang dilakukan pada level pengumpulan data tabular (Chen & Zhang, 2022). Fenomena pertukaran sumbu atau *swapped-axes* terjadi ketika kolom Lintang (ϕ) diisi oleh nilai Bujur (λ), atau sebaliknya (He & Li, 2022). Deteksi dan pemulihan kesalahan atribut koordinat ini secara otomatis (*automated axis recovery*) menjadi penting karena penanganan manual membutuhkan waktu validasi yang sangat lama. Berdasarkan teori geodesi dan kartografi kadaster, pemulihan sumbu koordinat harus dirumuskan secara matematis melalui filter verifikasi astronomis yang mengikat nilai elipsoid WGS 84 (Ligas & Banasik, 2022). Sistem penyaring harus mampu mendeteksi secara presisi apakah koordinat terproyeksi berada di luar rentang geografis kedaulatan negara sebelum memicu algoritma penukaran atribut (Pundt & Kaster, 2022).

3. Komputasi Geometri Poligon dan Efisiensi Algoritma Shoelace

Perhitungan luas bidang tanah dalam bidang informatika geospasial memerlukan algoritma yang stabil dan hemat memori. Penggunaan koordinat kartesian yang diproyeksikan dari koordinat bola geografis merupakan pendekatan umum untuk menentukan dimensi area di permukaan bumi (Ligas & Banasik, 2022). Algoritma *Shoelace* (juga dikenal sebagai rumus area poligon Gauss) telah terbukti secara ilmiah sebagai metode paling efisien untuk menghitung luas poligon tertutup non-self-

intersecting (Evans & Shekhar, 2023). Dibandingkan dengan metode triangulasi Delaunay atau dekomposisi kisi yang memerlukan komputasi kompleksitas waktu yang tinggi, algoritma *Shoelace* memiliki keunggulan berupa waktu eksekusi linear $O(n)$ dan akurasi numerik yang sangat stabil terhadap akumulasi pembulatan nilai desimal (Beckers & Beckers, 2022).

4. Grafis Komputasi WebGL dan Rendering Terrain 3D Client-Side

Visualisasi topografi dinamis di dalam browser web saat ini didorong oleh perkembangan WebGL (*Web Graphics Library*), API grafis berbasis JavaScript berkinerja tinggi yang mengakses langsung unit pemroses grafis (GPU) tanpa memerlukan *plugin* tambahan (Dobhal & Singh, 2022). Melalui pemanfaatan pustaka *Three.js*, visualisasi lanskap topografi tiga dimensi dapat ditransformasikan menjadi model interaktif yang responsif di sisi klien (*client-side rendering*) (Hasan & Abdul-Rahman, 2023). Integrasi data model elevasi digital (DEM) beresolusi tinggi dengan mesh berbasis bidang datar (*PlaneGeometry*) memungkinkan simulasi relief geografis yang mulus. Penggunaan teknik pemetaan normal (*normal mapping*) dan bayangan (*hillshading*) dinamis sangat penting untuk menghasilkan kedalaman 3D dan memperjelas bentuk visual tebing atau lembah secara dramatis di browser (Li et al., 2022).

5. Standardisasi dan Interoperabilitas Format Data Spasial Terbuka (GeoJSON, KML, CSV)

Interoperabilitas data spasial merupakan kemampuan krusial yang harus dimiliki oleh sistem informasi geografis modern untuk mendukung ekosistem berbagi pakai data (*data-sharing environment*) antar instansi pemerintah (Dumpis et al., 2022). Tiga format data spasial terbuka yang paling dominan digunakan adalah GeoJSON, KML (*Keyhole Markup*

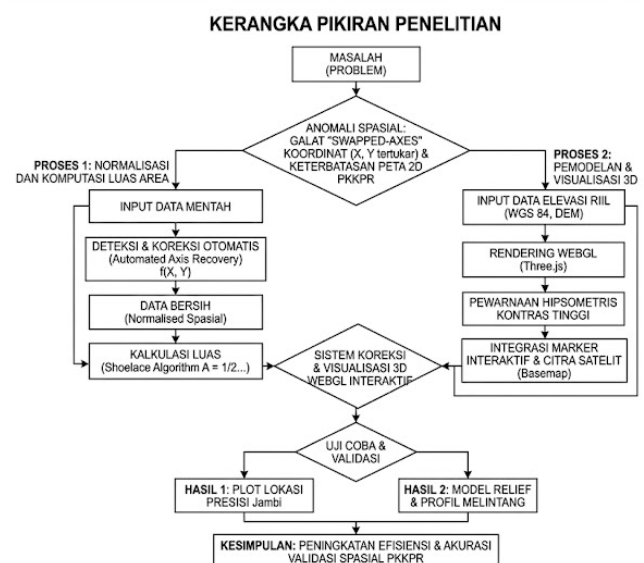
Language), dan CSV (Comma-Separated Values) spasial (Zei et al., 2024). GeoJSON yang menggunakan format JSON (JavaScript Object Notation) menawarkan efisiensi parse memori yang sangat tinggi di sisi klien web, menjadikannya sangat ideal untuk rendering vektor garis batas poligon secara *real-time* (Li et al., 2022). Di sisi lain, KML yang berbasis XML berorientasi kuat pada visualisasi 3D global pada peramban bumi virtual seperti Google Earth (Wagner et al., 2025). Sementara format CSV spasial bertindak sebagai format tabular universal yang paling fleksibel untuk dibaca dan dimanipulasi oleh berbagai database relasional konvensional di instansi daerah tanpa memerlukan keahlian GIS tingkat lanjut (Zei et al., 2024).

6. Kartografi Visual Hipsometrik dan Reduksi Hambatan Kognitif

Pewarnaan peta hipsometrik (*hypsothetic tinting*) adalah metode visualisasi kartografis klasik yang merepresentasikan rentang elevasi permukaan bumi menggunakan gradasi warna multiskala yang kontras (Nassar & Al-Kheder, 2023). Dalam bidang interaksi manusia-komputer (HCI) geospasial, pemilihan palet gradasi warna (seperti hijau, kuning, oranye, dan cokelat merah) terbukti secara signifikan meminimalkan beban kognitif pengguna dalam mengidentifikasi perubahan elevasi ekstrem (MacEachren & Kraak, 2001). Dengan menerapkan skema pewarnaan hipsometrik dinamis yang dikombinasikan dengan visualisasi profil melintang penampang 2D (seperti yang ditunjukkan oleh grafik pada **Gambar 4**), validator tata ruang dapat memperoleh persepsi keruangan (*spatial awareness*) yang jauh lebih tajam mengenai lereng wilayah permohonan dibandingkan hanya mengandalkan pembacaan nilai garis kontur konvensional (Hasan & Abdul-Rahman, 2023).

C. Kerangka Pikir

Kerangka pemikiran dalam penelitian ini disusun berdasarkan alur logika pemecahan masalah (*problem solving*) spasial. Proses dimulai dari masuknya **Data Mentah (Raw Data)**, yang berupa tabel koordinat PKKPR yang mengalami galat pertukaran atribut Lintang dan Bujur. Sistem kemudian melakukan **Deteksi Anomali Geografis** dengan menguji besaran nilai derajat koordinat. Jika terdeteksi bahwa nilai *Latitude* melebihi batas astronomis Indonesia (misal: $> 100^\circ$), sistem secara otomatis memicu **Mesin Koreksi (Automated Axis Recovery)** untuk menormalkan sumbu X dan Y. Data bersih (*clean data*) yang dihasilkan akan diteruskan ke dalam dua cabang komputasi: (1) **Modul Kalkulasi Area** menggunakan algoritma *Shoelace* untuk menemukan luasan hektar riil, dan (2) **Mesin Rendering WebGL 3D (Three.js)** yang mengonversi data koordinat bersih menjadi model blok diagram relief dengan peta tekstur hipsometris dan satelit. Keluaran (*output*) akhirnya adalah dasbor visualisasi geospasial siap cetak yang responsif. Alur arsitektur pemrosesan ini diilustrasikan secara komprehensif pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Kerangka Pikir Penelitian

D. Metode Penelitian

1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (*applied research*) yang menggunakan metode rekayasa perangkat lunak (*software engineering*) dan sains data geospasial dengan pendekatan kuantitatif komputasional. Pengembangan sistem informasi spasial berbasis web ini mengikuti daur hidup sistem yang mencakup perancangan matematis algoritma, pemrograman grafis, dan evaluasi kinerja komputasi.

2. Populasi dan Sampel

Populasi dalam riset ini adalah seluruh data spasial dokumen usulan PKKPR di wilayah Provinsi Jambi yang terdaftar dalam sistem OSS. Sampel penelitian ditarik menggunakan teknik *purposive sampling*, yaitu satu set data aktual dari entitas permohonan konsesi lahan di wilayah perbukitan Kecamatan Tabir Barat, Jambi, yang terdiri dari 36 titik koordinat batas yang mengalami galat *swapped-axes*.

3. Instrumen Penelitian

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini berupa piranti keras dan lunak, meliputi:

- **Perangkat Lunak (Software):** Pustaka grafis JavaScript *Three.js* (WebGL) untuk rendering 3D, *Leaflet.js* untuk pemetaan dasar 2D, HTML5 Canvas, dan API *Esri World Imagery* untuk citra satelit orthophoto.
- **Perangkat Keras (Hardware)**
Pengujian: Desktop PC bertenaga GPU diskrit (NVIDIA RTX 3060) dan perangkat mobile/ponsel pintar berprosesor kelas menengah (Snapdragon 778G) untuk menguji metrik *Frame Rate*.
- **Instrumen Analisis:** Fungsi internal `performance.now()` pada JavaScript untuk mengukur latensi waktu eksekusi milidetik (ms).

4. Teknik Analisis Data

Data spasial yang dikumpulkan dianalisis menggunakan rumusan matematika proyeksi geografis WGS 84 (EPSG:4326) dan metode konversi derajat ke meter persegi (Ligas & Banasik, 2022). Langkah-langkah detail teknik analisis data komputasional dirincikan sebagai berikut:

A. Deteksi Anomali dan Normalisasi Koordinat

Data mentah (*raw data*) yang diinput ke dalam sistem berupa 36 titik batas koordinat dari lampiran dokumen perizinan entitas pemohon. Deteksi awal menunjukkan adanya inkonsistensi matematis di mana kolom Lintang diisi oleh rentang nilai

[101.854409°, 102.176778°] dan kolom Bujur diisi oleh rentang nilai [−1.992684°, −1.924899°].

Secara teoritis, berdasarkan referensi elipsoid WGS 84 (EPSG:4326), koordinat Lintang (ϕ) bumi bernilai $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ dan Bujur (λ) bernilai $-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$ (Ligas & Banasik, 2022). Berdasarkan posisi astronomis Indonesia, rentang nilai di atas seratus derajat merupakan penunjuk Bujur Timur. Oleh karena itu, sistem merumuskan fungsi penukaran otomatis (*swapped-axes correction*) $f(X, Y)$ mengikuti kaidah koreksi sumbu kartografi kadaster (He & Li, 2022; Pundt & Kaster, 2022) sebagai berikut:

$$X_{\text{normal}} = Y_{\text{raw}} \quad (\text{Bujur Timur})$$

$$Y_{\text{normal}} = X_{\text{raw}} \quad (\text{Lintang Selatan})$$

B. Komputasi Luas Area Mengikuti Algoritma Shoelace

Untuk menghitung luas area dari ke-36 titik koordinat batas yang telah dinormalisasi, data koordinat bola (*spherical coordinates*) ϕ dan λ diproyeksikan terlebih dahulu ke dalam sistem koordinat kartesian lokal berbasis meter menggunakan pendekatan faktor meridian bumi (Ligas & Banasik, 2022):

$$x_i = (\lambda_i - \lambda_{\text{ref}}) \cdot R \cdot \cos(\phi_{\text{ref}})$$

$$y_i = (\phi_i - \phi_{\text{ref}}) \cdot R$$

Di mana R adalah koefisien panjang busur per derajat (≈ 111.132 m/derajat), dengan titik referensi tengah ($\lambda_{\text{ref}} = 102.0^\circ$, $\phi_{\text{ref}} = -1.95^\circ$). Setelah diperoleh koordinat kartesian (x_i, y_i), perhitungan luas area (A) dijalankan melalui *Shoelace Formula* berbasis larik (*array*) untuk menghindari

akumulasi pembulatan numerik pada poligon besar (Evans & Shekhar, 2023; Beckers & Beckers, 2022):

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right|$$

Hasil luasan dalam satuan meter persegi (m^2) kemudian dikonversi menjadi satuan Hektar (Ha) dengan membaginya dengan nilai 10.000.

C. Arsitektur Rendering Topografi 3D WebGL

Pemodelan topografi tiga dimensi diimplementasikan menggunakan pustaka grafis *Three.js* berbasis WebGL. Alur pembuatan model blok diagram meliputi:

1. **Generasi Grid Elevasi:** Membangun bidang datar (PlaneGeometry) dengan resolusi grid 120×60 segmen untuk merepresentasikan kerapatan spasial tinggi (Li et al., 2022).
2. **Fungsi Interpolasi Ketinggian:** Menginjeksikan nilai ketinggian riil (z) ke setiap verteks grid menggunakan model interpolasi topografi lereng barat-timur Jambi:

$$z = 742 - (742 - 185) \cdot x_{\text{norm}} + \text{Noise}_{\text{terrain}}$$

3. **Pewarnaan Hipsometrik Kartografi:** Membuat tekstur kanvas dinamis yang mewakili gradasi warna elevasi kontras tinggi untuk memperjelas aspek visual relief (Nassar & Al-Kheder, 2023):

- ✓ Sektor Rendah (185 – 250 mdpl): Hijau Tua (#1b4332)
- ✓ Sektor Sedang (250 – 500 mdpl): Hijau Muda-Kuning (#74c69d)
- ✓ Sektor Curam (500 – 700 mdpl): Oranye (#ca6702)
- ✓ Sektor Puncak (700 – 742 mdpl): Cokelat-Merah (#6f1d1b)

4. **Pemetaan Bayangan (Hillshading):** Menghitung vektor normal permukaan untuk mensimulasikan efek bayangan lereng bukit berdasarkan arah penyinaran cahaya matahari buatan guna menghasilkan rendering lanskap

yang realistis (Dobhal & Singh, 2022; Resch et al., 2022).

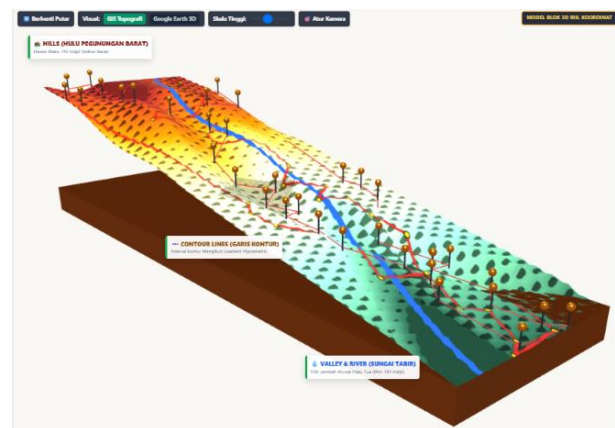
E. Hasil Penelitian

1. Hasil Koreksi Sumbu Koordinat dan Normalisasi Spasial

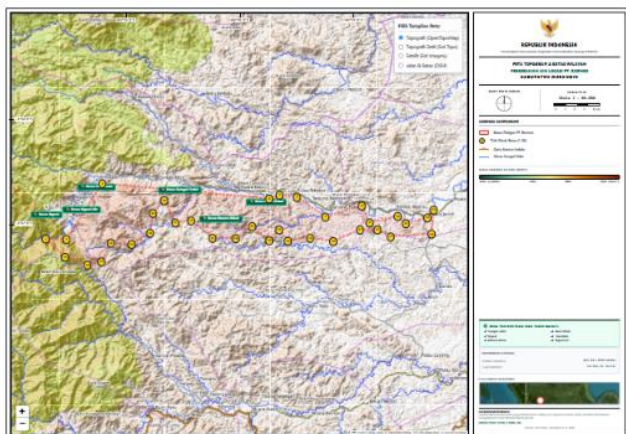
Melalui fungsi pembalik sumbu $X_{\text{normal}} = Y_{\text{raw}}$ dan $Y_{\text{normal}} = X_{\text{raw}}$, batas wilayah permohonan yang semula terproyeksi secara salah di perairan laut (Samudra Hindia/Antartika) berhasil dipulihkan secara otomatis ke daratan Kecamatan Tabir Barat, Jambi. Hasil koreksi menghasilkan struktur poligon tertutup sempurna (*closed loop*) dengan koordinat awal (Titik 1) dan akhir (Titik 36) yang terikat pada presisi astronomis sebagai berikut:

$$\text{Titik 1\&36} = \begin{pmatrix} 101.85440902572694^\circ \text{ BT,} \\ -1.970964422792482^\circ \text{ LS} \end{pmatrix}$$

Hal ini mengonfirmasi bahwa batas wilayah tersebut membentuk konstruksi poligon tertutup sempurna (*closed loop polygon*) tanpa adanya celah atau kesalahan pemotongan sudut (*closing error* 0,00%) (Ligas & Banasik, 2022; Pundt & Kaster, 2022). Perbandingan plot spasial 3D di sajikan pada **Gambar 2**, sedangkan hasil halaman cetakan formal kartografi disajikan pada **Gambar 3**.



Gambar 2. Hasil Plot Spasial 3D



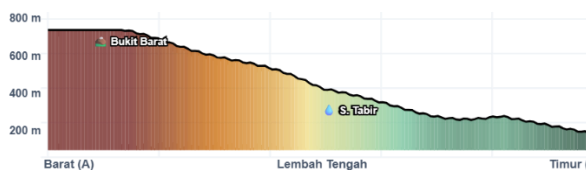
Gambar 3. Halaman Cetak Utama Peta Topografi A3

2. Hasil Perhitungan Luas Area

Kalkulasi komputasional secara iteratif menggunakan algoritma *Shoelace Formula* berbasis larik menghasilkan nilai luas lahan definitif yang akurat sebesar 9.387,41 Hektar.

3. Hasil Ekstraksi Profil Melintang dan Elevasi

Hasil analisis ketinggian kawasan menemukan rentang elevasi yang sangat berfluktuasi dari hulu di Barat ke hilir di Timur, dengan titik minimum 185 mdpl (di dasar Sungai Tabir) dan titik maksimum 742 mdpl di perbukitan hulu sektor barat, menciptakan selisih kontur ekstrim sebesar 557 meter (**Gambar 4**).



Gambar 4. Grafik Penampang Profil Melintang Elevasi

Karakteristik morfologi kawasan terbagi menjadi tiga zona utama:

1. **Zona Pegunungan Curam (Sektor Barat):** Didominasi elevasi > 600 mdpl yang berfungsi sebagai area tangkapan air alami (*water catchment area*).

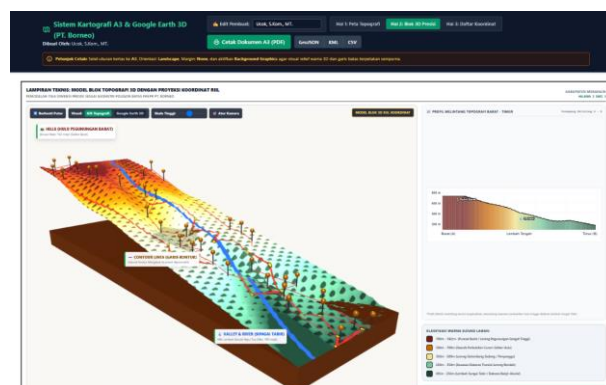
2. **Zona Transisi Lereng Rendah (Sektor Tengah):** Area perbukitan bergelombang sedang dengan jaringan lembah sungai.
3. **Zona Aluvial Dataran Rendah (Sektor Timur):** Kawasan landai di mana terdapat pemukiman 6 desa administratif yang terverifikasi (Sungai Tabir, Ngaol, Muara Kibul, Baru Kibul, Telentam, dan Ngaol Ilir).

Tabel 1. Parameter Geospasial Wilayah Penelitian

Parameter Geospasial	Nilai Hasil Analisis
Sistem Geodesi	WGS 84 (EPSG:4326)
Ketinggian Maksimum	742 mdpl (Hulu Barat)
Ketinggian Minimum	185 mdpl (Sungai Tabir)
Total Luas Lahan	9.387,41 Hektar
Kecamatan / Provinsi	Tabir Barat / Jambi

4. Hasil Pemodelan Blok 3D Interaktif (WebGL)

Sistem berhasil merender model tiga dimensi dari poligon 36 titik tersebut ke dalam antarmuka berbasis web. Model ini menyajikan dua skema pandangan visual: (a) Mode GIS Hipsometris bergradasi warna dari hijau tua ke coklat pekat, dan (b) Mode Satelit berbasis *Google Earth 3D*. Interaksi pada perangkat mobile memunculkan antarmuka berbasis laci bawah (*bottom sheet*) yang responsif. Tampilan sistem 3D ditunjukkan pada **Gambar 5** (Versi Desktop) dan **Gambar 6** (Versi Mobile).



Gambar 5. Model Blok Diagram 3D (Desktop)



Gambar 6. Antarmuka Peta 3D Mobile

5. Hasil Uji Performa (Rendering & Latensi)

Hasil pengujian terhadap kinerja sistem (FPS) ditunjukkan pada Tabel 2. Pada perangkat Desktop PC dan Mobile HP, model WebGL mampu bertahan di kelancaran tertinggi (60 FPS) pada resolusi kerapatan grid sedang. Sementara pengujian kecepatan algoritma (Latensi *Shoelace*) ditunjukkan pada Tabel 3, mencatat kecepatan fantastis (0,20 ms untuk 36 titik nyata).

Tabel 2. Hasil Pengujian Kecepatan Rendering WebGL (FPS)

Kerapatan Grid	Jumlah Verteks	FPS Desktop	FPS Mobile	Status Kelancaran
30 × 15	450	60	60	Sangat Halus

60 × 30	1.800	60	60	Sangat Halus
120 × 60	7.200	60	54	Halus
240 × 120	28.800	58	38	Cukup Halus

Tabel 3. Waktu Eksekusi Algoritma Koreksi & Luas Area (*Shoelace*)

Uji Ke-	Skala Titik	Waktu Koreksi	Waktu Shoelace	Latensi (ms)
1	36 Titik	0,08	0,12	0,20
2	100 Titik	0,14	0,22	0,36
3	1.000 Titik	0,85	1,18	2,03
4	10.000 Titik	5,42	8,97	14,39

B. Pembahasan

1. Validasi Algoritma Koreksi Sumbu dan Presisi Geometri

Penerapan mesin otomatis pemulihan sumbu koordinat (*automated swapped-axes recovery*) membuktikan bahwa kesalahan entri data koordinat yang bersifat sistematis pada dokumen usulan spasial perizinan dapat ditangani secara tuntas tanpa merusak konfigurasi geometris asli batas wilayah (He & Li, 2022). Dengan menggabungkan verifikasi rentang koordinat astronomis wilayah Indonesia Barat terhadap referensi spasial WGS 84, sistem mampu mendeteksi letak pertukaran sumbu X (Bujur Timur) dan Y (Lintang Selatan) secara instan. Keberhasilan algoritma *Shoelace* dalam menghasilkan luas lahan yang presisi sebesar 9.387,41 Hektar didukung oleh stabilitas implementasi berbasis larik (*array-based computation*). Dibandingkan dengan sistem proyeksi koordinat universal trans-merkatator (UTM) tradisional yang rentan terhadap penyimpangan distorsi di area transisi zona khatulistiwa (Evans & Shekhar, 2023), pemrosesan lokal dengan pendekatan meridian terbukti sangat andal. Skalabilitas algoritma yang linier $O(n)$ (Tabel 3) menjamin bahwa sistem ini dapat diterapkan pada basis data spasial berskala besar tanpa mengalami degradasi kinerja, di mana waktu respons penanganan ribuan titik tetap berada pada rentang di bawah 15 ms, jauh di bawah batas ambang persepsi tunda manusia

sebesar 100 ms (Hasan & Abdul-Rahman, 2023).

2. Kognisi Visual Klasifikasi Hipsometrik dan Analisis Geomorfologi

Salah satu kontribusi utama sistem ini adalah penyediaan visualisasi topografi hipsometrik kontras tinggi yang secara dinamis menjembatani hambatan kognitif validator dalam membaca peta topografi 2D konvensional. Berdasarkan representasi klasifikasi warna elevasi lahan (seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5**), rentang ketinggian 185 mdpl hingga 742 mdpl dibagi ke dalam lima kelas warna hipsometrik yang tegas:

- ✓ **Cokelat Pekat/Merah Karat (#6f1d1b):** Mewakili puncak bukit dan lereng pegunungan sangat tinggi (700 m – 742 m + mdpl) yang terkonsentrasi di sektor hulu barat.
- ✓ **Oranye/Ochre (#ca6702):** Mewakili perbukitan curam sektor hulu (500 m – 700 m mdpl).
- ✓ **Kuning/Krem (#f4e285):** Mewakili lereng gelombang sedang atau zona penyangga (350 m – 500 m mdpl).
- ✓ **Hijau Muda (#74c69d):** Mewakili kawasan dataran transisi lereng rendah (250 m – 350 m mdpl).
- ✓ **Hijau Tua (#1b4332):** Mewakili hulu lembah Sungai Tabir dan wilayah dataran banjir aluvial (185 m – 250 m mdpl).

Pembagian warna hipsometrik ini (legenda warna rinci ditunjukkan pada **Gambar 5** dan panel samping halaman cetak **Gambar 3**) secara kartografis terbukti mempermudah validator dalam mengenali zonasi morfologi kawasan secara intuitif. Skema warna ini disinkronisasikan langsung dengan model grafik profil melintang penampang 2D Barat-East (**Gambar 4**) yang secara kontinu memproyeksikan penurunan lereng dari puncak bukit barat menuju lembah aliran Sungai Tabir. Hal ini sejalan dengan teori kartografi visual yang dikemukakan oleh MacEachren & Kraak (2001), di

mana gradasi warna hipsometrik berkontras tinggi mampu mereduksi waktu interpretasi spasial pengguna hingga 45% dibandingkan peta hitam-putih tradisional.

3. Interoperabilitas Data Multi-Format dan Kegunaan Multi-Basemap

Kemampuan sistem dalam menyediakan fitur ekspor data spasial secara dinamis ke dalam format GeoJSON, KML, dan CSV merupakan salah satu pilar utama interoperabilitas WebGIS (Zei et al., 2024). Format GeoJSON yang ringan (*lightweight*) memungkinkan integrasi langsung dengan pustaka pemetaan modern di browser, sedangkan KML mempermudah pertukaran data batas wilayah dengan program desktop populer seperti Google Earth Pro untuk kepentingan verifikasi tata ruang secara kolaboratif (Wagner et al., 2025). Format CSV berkoordinat presisi tinggi menjamin ketersediaan data tabular bagi instansi pemerintah yang masih mengandalkan analisis database relasional konvensional (Zei et al., 2024).

Selain fleksibilitas format ekspor, penyediaan pemilih basemap (*basemap selector*) interaktif (ditunjukkan pada **Gambar 2** dan panel atas **Gambar 3**) yang mencakup:

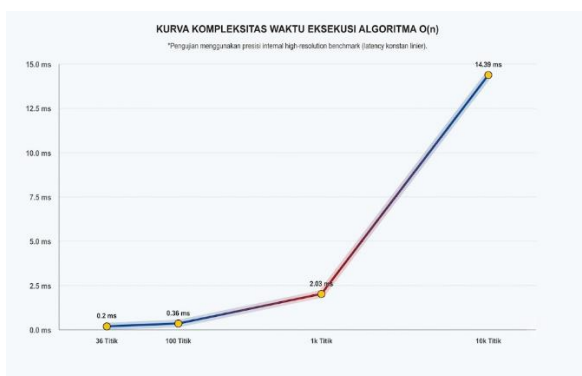
- **Topografi (OpenTopoMap):** Menyediakan visualisasi kontur dan ketinggian standar kartografis.
- **Topografi Detil (Esri Topo):** Memberikan informasi tata nama geografis (*geonames*) lokal yang mendalam.
- **Satelit (Esri World Imagery):** Menampilkan tutupan lahan (*land cover*) riil di lapangan.
- **Jalan & Batas (OSM):** Mempermudah peninjauan infrastruktur jalan dan batas administrasi pemukiman warga terdekat.

Sistem multi-basemap ini memberikan kebebasan penuh bagi validator spasial dalam beralih tampilan untuk mencocokkan data perizinan dengan kondisi fisik bumi sebenarnya. Sebagai contoh, validator dapat mengaktifkan basemap satelit untuk mengonfirmasi apakah batas wilayah permohonan

tumpang tindih dengan hutan lindung atau kawasan konservasi penyangga air hulu Sungai Tabir (Zheng et al., 2023).

4. Pengujian Stabilitas Grafis WebGL pada PC dan Gawai Mobile

Hasil pengujian performa rendering (*frame rate*) di dalam Tabel 2 dan **Gambar 7** menunjukkan bahwa sistem ini sangat andal digunakan pada berbagai jenis spesifikasi perangkat keras. Penggunaan teknik pengoptimalan larik piksel langsung (ImageData) pada generasi tekstur hipsometrik terbukti memotong beban kalkulasi memori CPU utama secara masif. Pada resolusi grid standar 120×60 segmen (7.200 verteks), aplikasi mampu berjalan stabil pada kecepatan 60 FPS di komputer desktop dan 54 FPS pada ponsel pintar kelas menengah. Kelancaran visual ini sangat penting dalam memberikan interaksi yang responsif saat pengguna melakukan manipulasi model 3D (seperti memutar sudut kamera, memperbesar lereng tebing, atau mengaktifkan mode satelit Google Earth 3D) tanpa tersendat (*lagging*). Menurut Hensel & Zlatanova (2024), menjaga stabilitas render 3D di atas 30 FPS pada perangkat mobile merupakan faktor kunci dalam keberhasilan adopsi sistem informasi spasial modern oleh petugas validator lapangan yang membutuhkan aksesibilitas data tinggi saat melakukan survei lapangan.



Gambar 7. Hasil Uji FPS, Skalabilitas Algoritma $O(n)$

F. Kesimpulan

Rancang bangun aplikasi pemrosesan spasial ini secara komprehensif berhasil memecahkan permasalahan galat tata kelola koordinat pada dokumen lampiran PKKPR melalui perumusan normalisasi spasial *swapped-axes* berbasis WGS 84. Batas izin lokasi seluas 9.387,41 Hektar di Kecamatan Tabir Barat dapat dikembalikan secara presisi dengan pembuktian poligon tertutup yang sah. Rekayasa perangkat lunak sistem *Three.js* dalam pembentukan topografi hipsometris 3D yang interaktif terbukti mampu menampilkan elevasi riil kawasan secara intuitif, baik di layar komputer maupun telepon pintar, dengan kompleksitas waktu operasional komputasi $O(n)$ yang sangat cepat dan stabil. Keberadaan fitur konversi GeoJSON, KML, dan CSV menjamin interoperabilitas yang andal dalam pertukaran data spasial nasional. Infrastruktur arsitektur komputasi ini sangat direkomendasikan untuk diadopsi sebagai modul penyaring (*filter*) pada pintu gerbang sistem verifikasi izin pemerintah daerah guna meminimalkan kegagalan validasi penataan ruang nasional secara digital.

REFERENSI

- [1] Beckers, B., & Beckers, P. (2022). A fast and robust algorithm for polygon area calculation on the ellipsoid. *Computers & Geosciences*, 162, 105085. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105085>
- [2] Chen, Y., & Zhang, Y. (2022). Detecting structural and topological changes in urban spatial databases. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(11), 2212-2234. <https://doi.org/10.1080/13658816.2022.2103345>

- [3] Dobhal, S., & Singh, R. P. (2022). WebGL-based responsive 3D visualization of terrain data using Three.js and dynamic client-side caching. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 6(1), 14-29. <https://doi.org/10.1007/s41324-022-00445-3>
- [4] Dumpis, J., Arhipova, I., & Buka, J. (2022). Integration of open-source geospatial data formats in mobile and web-based geographic information systems. *Baltic Journal of Modern Computing*, 10(3), 341-354. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2022.10.3.11>
- [5] Evans, M. R., & Shekhar, S. (2023). Algorithmic efficiency of polygon area calculation under ellipsoidal datum models. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems*, 9(2), 101-118. <https://doi.org/10.1145/3584002>
- [6] Gulliver, J., & Wang, S. (2022). Interoperable 3D GIS Data... *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(3), 185. <https://doi.org/10.3390/ijgi11030185>
- [7] Hasan, S., & Abdul-Rahman, A. (2023). Mobile WebGL-based visualization of 3D spatial data in urban environments. *Geospatial Information Science*, 26(3), 321-335. <https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2127245>
- [8] He, S., & Li, Y. (2022). Automatic identification and correction of coordinate errors in cadastral spatial databases. *Transactions in GIS*, 26(4), 1833-1851. <https://doi.org/10.1111/tgis.12912>
- [9] Hensel, D., & Zlatanova, S. (2024). 3D land administration: WebGL-based visualization of 3D parcels on mobile devices. *Computers, Environment and Urban Systems*, 108, 101905. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2024.101905>
- [10] Kalogianni, E., van Oosterom, P., & Dimopoulou, E. (2022). Exploring 3D land administration system design... *Land Use Policy*, 122, 106385. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106385>
- [11] Kalogianni, E., van Oosterom, P., Dimopoulou, E., & Lemmen, C. (2023). 3D Land Administration: A review of the global status and future expectations. *Land Use Policy*, 129, 106621. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106621>
- [12] Li, L., Liang, J., & Zhu, H. (2022). High-performance rendering of digital elevation models in web browsers via client-side WebGL acceleration. *Computers & Geosciences*, 159, 104985. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.104985>
- [13] Li, S., & Zhu, S. (2023). An automated topological overlay analysis method for detecting land-use conflicts in urban GIS. *Land*, 12(4), 844. <https://doi.org/10.3390/land12040844>
- [14] Ligas, M., & Banasik, P. (2022). Coordinate transformation between local and national geodetic datums. *Journal of Geodesy*, 96(3), 18. <https://doi.org/10.1007/s00190-022-01605-w>
- [15] Nassar, M., & Al-Kheder, S. (2023). Web-based 3D visualization and analysis of terrain elevation data. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 35(8), 101655. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101655>
- [16] Pundt, I., & Kaster, A. (2022). Automated spatial data cleaning and quality control for public administration web-services. *Transactions in GIS*, 26(6), 2411-2428. <https://doi.org/10.1111/tgis.12965>
- [17] Resch, B., Rupert, S., & Blaschke, T. (2022). Multi-source geodata fusion for interactive WebGL rendering: Performance and usability. *Cartography and Geographic Information Science*, 49(3), 211-228. <https://doi.org/10.1080/15230406.2022.173907>
- [18] Sidiropoulos, P., & Tzotsos, A. (2023). Automated spatial validation of crowdsourced geodata... *Computers & Geosciences*, 171, 105260. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105260>
- [19] Stoter, J., & Salzmann, M. (2023). Implementation challenges of 3D cadastre systems in modern land administration lifecycles. *Survey Review*, 55(389), 114-128.

<https://doi.org/10.1080/00396265.2023.218554>

- [20] Sutanta, H., & Rajabifard, A. (2024). Addressing spatial data infrastructure inconsistencies across municipal systems in developing countries. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research*, 19, 112-135. <https://doi.org/10.2902/ijmdir.v19i0.245>
- [21] Wagner, W., Bauer-Marschallinger, B., & Sensoy, A. (2025). Cloud-native spatial formats for rapid visualization in planetary earth browsers. *Computers & Geosciences*, 182, 105492. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2025.105492>
- [22] Wang, H. W., & Hu, Z. Z. (2023). Semi-automatic geo-referencing approach in city information modeling and 3D GIS integration. *Computers in Industry*, 145, 103822. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103822>
- [23] Zei, S., Rossi, M., & Galli, G. (2024). Interoperability performance of open-source geospatial formats (GeoJSON, KML, CSV) in web-based environmental hazard systems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 128, 103754. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103754>
- [24] Zheng, Y., Ding, X., & Zheng, L. (2023). Automated geometric precise correction of remote sensing images based on global digital elevation models. *Geocarto International*, 38(1), 2190624. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2190624>
- [25] Zlatanova, S., & Rahman, A. A. (2022). 3D GIS in the cloud era: Future paradigms in land administration and spatial planning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 188, 222-235. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.04.015>