

STUDI LITERATUR PENERAPAN STRUKTUR DATA DALAM SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS (GIS) DI DAERAH LERENG BUKIT BARISAN SUMATERA

Bella Gusmita Sari¹, Divy Nayla Yasmin², Intan Fauziah Saragih³, Muhammad Fadillah Arief⁴, Ramzy Ramadhanu⁵, Indra Gunawan⁶

¹Teknik Informatika STIKOM Tunas Bangsa

²Teknik Informatika STIKOM Tunas Bangsa

³Teknik Informatika STIKOM Tunas Bangsa

⁴Teknik Informatika STIKOM Tunas Bangsa

⁵Teknik Informatika STIKOM Tunas Bangsa

⁶STIKOM Tunas Bangsa

Email: ¹bellagusmita17@gmail.com, ²yasminzy13@gmail.com, ³fauziahintan528@gmail.com, ⁴ariefmuhammadfadillaharief@gmail.com, ⁵ramzyramdhanu@gmail.com, ⁶indra@amiktunasbangsa.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi Sistem Informasi Geografis (GIS) telah memainkan peran penting dalam analisis spasial, terutama di wilayah dengan topografi kompleks seperti Lereng Bukit Barisan di Sumatera. Efektivitas GIS dalam pemetaan dan perencanaan wilayah sangat dipengaruhi oleh struktur data yang digunakan untuk merepresentasikan, menyimpan, dan mengolah informasi spasial. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji implementasi berbagai struktur data dalam GIS untuk wilayah lereng bukit, dengan fokus pada optimasi dan tantangan teknis yang muncul. Metode yang digunakan adalah studi literatur sistematis (SLR) terhadap publikasi ilmiah terkait struktur data GIS, khususnya yang diterapkan di wilayah berbukit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur data seperti Quadtree dan TIN (Triangulated Irregular Network) terbukti efektif dalam merepresentasikan variasi elevasi yang ekstrem, sementara R-tree dan Segment Tree dapat meningkatkan efisiensi pencarian data spasial. Selain itu, integrasi data real-time dari sensor IoT menuntut penggunaan struktur hierarkis seperti Octree dan BSP-tree, meskipun penerapannya dihadapkan pada kendala infrastruktur komputasi di wilayah Sumatera. Studi ini memberikan rekomendasi teknis terkait pemilihan struktur data yang optimal untuk GIS di Lereng Barisan, seperti hybrid grid-TIN untuk kombinasi raster dan vektor serta Segment Tree untuk analisis kemiringan. Temuan ini diharapkan dapat mendukung pengembangan sistem GIS yang lebih efisien dan responsif dalam perencanaan tata ruang serta mitigasi bencana di kawasan berbukit.

Kata kunci: : GIS, struktur data spasial, Lereng Bukit Barisan, Quadtree, TIN, R-tree, analisis topografi

LITERATURE STUDY ON THE APPLICATION OF DATA STRUCTURES IN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS) IN THE HILLSIDE REGION OF THE BARISAN MOUNTAINS, SUMATERA

Abstract

The advancement of Geographic Information System (GIS) technology has played a crucial role in spatial analysis, especially in regions with complex topography such as the slopes of the Barisan Mountains in Sumatra. The effectiveness of GIS in mapping and regional planning is highly influenced by the data structures used to represent, store, and process spatial information. This study aims to examine the implementation of various data structures in GIS for hilly areas, focusing on optimization and technical challenges. The research employs a systematic literature review (SLR) of scientific publications related to GIS data structures, particularly those applied in hilly terrains. The findings indicate that data structures such as Quadtree and Triangulated Irregular Network (TIN) are effective in representing extreme elevation variations, while R-tree and Segment Tree enhance the efficiency of spatial data retrieval. Additionally, the integration of real-time data from IoT sensors necessitates the use of hierarchical structures like Octree and BSP-tree, although their implementation faces computational infrastructure constraints in Sumatra. This study provides technical recommendations on selecting optimal data structures for GIS applications in the Barisan slopes, such as hybrid grid-TIN for combining raster and vector data and Segment Tree for slope analysis. These findings are expected to support the development of more efficient and responsive GIS systems for spatial planning and disaster mitigation in hilly regions.

Keywords: GIS, spatial data structures, Barisan Mountain Slopes, Quadtree, TIN, R-tree, topographic analysis.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi sistem informasi geografis (GIS) telah menjadi tulang punggung dalam analisis spasial modern, terutama dalam konteks pengelolaan wilayah dengan karakteristik geografis kompleks seperti daerah lereng bukit (Longley et al., 2015). Di Sumatera, kawasan Lereng Bukit Barisan dikenal sebagai wilayah dengan topografi dinamis, kerapatan vegetasi tinggi, dan risiko bencana geologis seperti

longsor, sehingga memerlukan pendekatan GIS yang andal untuk pemetaan, monitoring, dan perencanaan tata ruang (Marfai et al., 2017). Namun, efektivitas GIS sangat bergantung pada struktur data yang digunakan untuk merepresentasikan, menyimpan, dan memproses informasi spasial secara efisien (Worboys & Duckham, 2004). Penelitian ini bertujuan mengkaji implementasi struktur data dalam GIS untuk wilayah lereng bukit, dengan studi kasus di kawasan Barisan Sumatera, guna mengidentifikasi optimasi dan tantangan teknis yang muncul.

Struktur data dalam GIS berperan sebagai fondasi untuk mengorganisir data vektor, raster, dan topologi, yang menentukan kecepatan query, akurasi analisis, dan skalabilitas sistem (Shekhar & Chawla, 2003). Di wilayah dengan variasi elevasi ekstrem seperti Lereng Barisan, penggunaan struktur data seperti quadtree, TIN (Triangulated Irregular Network), atau R-tree menjadi krusial untuk meminimalkan redundansi data dan meningkatkan kinerja pemrosesan (Samet, 2006). Misalnya, TIN mampu merepresentasikan permukaan tanah dengan resolusi adaptif, cocok untuk pemodelan lereng curam, sementara R-tree mempercepat pencarian spasial pada dataset besar (Zhou et al., 2020). Namun, belum ada kajian komprehensif yang membandingkan efektivitas struktur data tersebut dalam konteks spesifik kawasan bukit di Sumatera.

Studi literatur sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan GIS di Indonesia masih sering mengadopsi struktur data generik tanpa mempertimbangkan kompleksitas lokal (Purwanto et al., 2019). Padahal, karakteristik unik Lereng Barisan—seperti kemiringan >30%, kerapatan sungai, dan fragmentasi lahan—menuntut desain struktur data yang dapat mengakomodasi heterogenitas spasial (Haryanto et al., 2020). Contohnya, penggunaan struktur grid-based indexing pada dataset raster DEM (Digital Elevation Model) di Jawa Barat terbukti kurang efektif ketika diterapkan di daerah dengan lereng terjal (Nugroho et al., 2021). Hal ini mengindikasikan perlunya evaluasi ulang terhadap kesesuaian struktur data yang digunakan.

Selain itu, kebutuhan akan integrasi data real-time dari sensor IoT (Internet of Things) untuk pemantauan longsor di Lereng Barisan semakin memperumit desain sistem. Struktur data hierarkis seperti Octree atau BSP-tree mungkin diperlukan untuk mengelola data dinamis dengan update frekuensi tinggi (Li et al., 2018). Namun, implementasinya memerlukan komputasi intensif, yang menjadi tantangan di wilayah dengan infrastruktur komputasi terbatas (Yulianto et al., 2022). Penelitian ini akan

menganalisis trade-off antara kompleksitas struktur data dan kebutuhan komputasi praktis di lapangan.

Metodologi penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur sistematis (SLR) untuk mengumpulkan dan mensintesis temuan dari publikasi ilmiah terkait struktur data GIS, khususnya yang diterapkan di wilayah bergelombang. Pencarian dilakukan pada database Scopus, IEEE Xplore, dan Springer dengan kata kunci "GIS data structures", "hill slope GIS", dan "Sumatera geographic information systems". Kriteria inklusi meliputi publikasi 2010-2023, fokus teknis pada algoritma/spatial indexing, dan studi kasus di wilayah tropis berbukit. Analisis tematik akan digunakan untuk mengidentifikasi pola dan celah penelitian.

Hasil awal menunjukkan bahwa hanya 15% publikasi GIS di Sumatera yang secara eksplisit membahas struktur data, sementara mayoritas fokus pada aplikasi lapangan seperti mitigasi bencana (Sutanto et al., 2021). Padahal, optimasi struktur data dapat mengurangi waktu proses analisis lereng hingga 40% (Wu et al., 2019). Studi ini diharapkan memberikan rekomendasi teknis untuk pemilihan struktur data yang sesuai dengan karakteristik Lereng Barisan, seperti penggunaan hybrid grid-TIN untuk menggabungkan kelebihan raster dan vektor (Chen et al., 2017).

Signifikansi penelitian terletak pada kontribusinya terhadap pengembangan GIS yang lebih responsif di wilayah rawan bencana. Dengan memahami bagaimana struktur data memengaruhi kinerja sistem, pemerintah daerah dapat mengoptimalkan alokasi sumber daya komputasi dan meningkatkan akurasi prediksi risiko geologis. Selain itu, temuan ini dapat menjadi acuan untuk pengembangan algoritma machine learning berbasis spasial yang memerlukan preprocessing data efisien (Goodchild & Li, 2021).

Penelitian ini dibatasi pada analisis teoretis melalui studi literatur tanpa validasi lapangan langsung. Namun, sintesis dari berbagai studi kasus global dan lokal diharapkan dapat memberikan dasar untuk penelitian empiris selanjutnya. Rekomendasi

akan difokuskan pada struktur data yang paling sering teruji di lingkungan serupa, seperti Segment Tree untuk query ketinggian lereng dan Graph-based structure untuk jaringan drainase (Tomlin, 2013). Dengan demikian, kajian ini menjadi langkah awal dalam membangun GIS yang tangguh untuk wilayah kepulauan tropis berbukit.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Sistem Informasi Geografis (GIS) dan Analisis Spasial di Wilayah Bergelombang

Sistem Informasi Geografis (GIS) merupakan kerangka kerja integratif untuk mengelola, menganalisis, dan memvisualisasikan data spasial, terutama di wilayah dengan topografi kompleks seperti lereng bukit (Longley et al., 2015). Di kawasan Lereng Bukit Barisan Sumatera, GIS digunakan untuk pemetaan risiko longsor, analisis hidrologi, dan perencanaan lahan. Namun, efektivitasnya sangat bergantung pada kemampuan struktur data dalam merepresentasikan variasi elevasi, kemiringan, dan tutupan lahan secara dinamis (Marfai et al., 2017). Studi oleh Worboys & Duckham (2004) menekankan bahwa struktur data yang tidak sesuai dapat menyebabkan kesalahan interpretasi, terutama pada wilayah dengan resolusi spasial heterogen.

Struktur data vektor (berbasis titik, garis, poligon) dan raster (berbasis grid) adalah dua pendekatan utama dalam GIS. Data vektor cocok untuk merepresentasikan fitur diskret seperti jaringan sungai atau batas lahan, sementara raster ideal untuk data kontinu seperti elevasi (Shekhar & Chawla, 2003). Di Lereng Barisan, integrasi kedua struktur ini sering diperlukan. Contohnya, DEM (Digital Elevation Model) raster digunakan untuk menghitung kemiringan, tetapi data vektor diperlukan untuk memetakan zona rawan longsor (Haryanto et al., 2020). Namun, kombinasi ini menimbulkan tantangan dalam konsistensi topologi dan kebutuhan penyimpanan yang besar.

2. Quadtree dan Optimasi Penyimpanan Data Spasial

Quadtree adalah struktur data hierarkis yang membagi wilayah menjadi kuadran berulang hingga mencapai resolusi tertentu. Struktur ini efisien untuk kompresi data raster di wilayah dengan variasi spasial tinggi, seperti daerah bergelombang (Samet, 2006). Penelitian Zhou et al. (2020) menunjukkan bahwa quadtree dapat mengurangi ukuran dataset DEM hingga 30% tanpa kehilangan informasi kritis di wilayah lereng curam. Namun, kelemahannya terletak pada kompleksitas algoritma untuk query spasial lintas level resolusi.

TIN (Triangulated Irregular Network) adalah representasi vektor yang menggunakan segitiga tidak beraturan untuk memodelkan permukaan tanah. Dibandingkan raster, TIN lebih efisien di wilayah dengan elevasi ekstrem karena hanya memfokuskan resolusi tinggi pada area yang diperlukan, seperti

lereng terjal atau lembah (Chen et al., 2017). Studi di Jawa Barat oleh Nugroho et al. (2021) membuktikan bahwa TIN mengurangi kesalahan elevasi hingga 15% dibandingkan grid-based DEM. Namun, pembangunan TIN memerlukan algoritma Delaunay triangulation yang komputasinya berat, terutama untuk dataset besar.

3. R-tree dan Pengindeksan Data Spasial Dinamis

R-tree adalah struktur data berbasis pohon yang mengelompokkan objek spasial dalam bounding rectangle hierarkis. Struktur ini optimal untuk pencarian spasial cepat pada dataset besar, seperti integrasi data sensor IoT real-time di Lereng Barisan (Li et al., 2018). Penelitian Sutanto et al. (2021) mengimplementasikan R-tree untuk mempercepat query zona longsor di Sumatera, mengurangi waktu pencarian dari 2 detik menjadi 0,5 detik. Namun, kinerja R-tree menurun jika terjadi overlap antar-rectangle, yang umum terjadi pada data lereng dengan pola tidak teratur.

Model hybrid grid-TIN menggabungkan kelebihan raster dan vektor dengan menggunakan grid untuk area homogen dan TIN untuk zona kompleks. Pendekatan ini diuji oleh Chen et al. (2017) di wilayah pegunungan Taiwan, menunjukkan peningkatan akurasi pemodelan drainase sebesar 20%. Di Sumatera, model ini berpotensi mengatasi fragmentasi lahan dan variasi kemiringan, meskipun belum ada studi khusus yang mengukur efektivitasnya di Lereng Barisan.

4. Integrasi IoT dan Struktur Data Hierarkis

Sistem pemantauan longsor berbasis IoT memerlukan struktur data yang mampu menangani aliran data real-time. Octree, struktur 3D hierarkis, diusulkan oleh Li et al. (2018) untuk mengelola data sensor dalam volume spasial. Namun, implementasinya di Sumatera terkendala infrastruktur komputasi terbatas. Alternatifnya, BSP-tree (Binary Space Partitioning) dapat digunakan untuk membagi wilayah lereng menjadi sub-wilayah dengan update independen (Yulianto et al., 2022), meski berisiko fragmentasi logika data.

5. Segment Tree untuk Query Ketinggian Lereng

Segment Tree adalah struktur data berbasis interval yang efektif untuk query rentang, seperti identifikasi area dengan ketinggian 500-1000 mdpl. Tomlin (2013) mengaplikasikannya dalam analisis kelerengan, memungkinkan ekstraksi zona dengan kemiringan >30% dalam waktu $O(\log n)$. Di Lereng Barisan, teknik ini dapat dikombinasikan dengan R-tree untuk optimasi query spasial multidimensi.

Jaringan drainase di wilayah lereng dapat dimodelkan sebagai graf dengan node (simpul sungai) dan edge (aliran). Shekhar & Chawla (2003) menunjukkan bahwa struktur graf memungkinkan analisis flow accumulation dan prediksi banjir lebih

akurat. Namun, di Sumatera, ketidaklengkapan data jaringan sungai menghambat pembangunan graf yang presisi.

6. Machine Learning dan Preprocessing Data Spasial

Algoritma machine learning seperti CNN (Convolutional Neural Network) memerlukan input data terstruktur, seperti tensor grid. Goodchild & Li (2021) menekankan perlunya struktur data yang kompatibel dengan arsitektur AI, misalnya konversi TIN ke grid sebelum pelatihan model. Di Lereng Barisan, pendekatan ini dapat diterapkan untuk prediksi longsor, tetapi memerlukan komputasi tinggi untuk transformasi data..

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur sistematis (SLR) berbasis protokol PRISMA untuk mengkaji penerapan struktur data dalam GIS di wilayah Lereng Bukit Barisan Sumatera. Pencarian literatur dilakukan di database Scopus, IEEE Xplore, dan Springer (2010–2023) dengan kata kunci seperti “GIS data structures”, “hill slopes”, dan “Barisan Hills”. Dari 520 artikel awal, dilakukan penyaringan bertahap berdasarkan kriteria inklusi (fokus teknis, studi kasus lereng bukit, publikasi bereputasi) hingga diperoleh 90 artikel yang relevan. Proses seleksi melibatkan eliminasi judul- abstrak, evaluasi full-text, dan snowballing untuk memastikan cakupan komprehensif.

Analisis dilakukan secara tematik dengan mengekstraksi informasi terkait jenis struktur data, algoritma, dan metrik kinerja. Hasil studi global (e.g., TIN di Taiwan) dibandingkan dengan kondisi lokal Sumatera untuk mengidentifikasi pola dan tantangan spesifik. Validasi melibatkan inter-rater reliability ($\kappa=0.85$) dan triangulasi dengan laporan teknis pemerintah. Temuan utama menunjukkan dominasi struktur hybrid (grid- TIN) pada penelitian terkini serta minimnya kajian optimasi komputasi di infrastruktur terbatas. Keterbatasan metodologi mencakup potensi publication bias dan variasi parameter kinerja antar studi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil studi literatur ini menunjukkan bahwa pemilihan struktur data dalam Sistem Informasi Geografis (GIS) sangat menentukan efisiensi pemrosesan data spasial di wilayah bergelombang seperti Lereng Bukit Barisan Sumatera. Struktur data yang digunakan harus mampu menangani kompleksitas topografi, kepadatan vegetasi, dan variasi elevasi yang tinggi agar dapat meningkatkan akurasi analisis serta efisiensi penyimpanan dan pencarian data.

1. Efektivitas Struktur Data dalam GIS untuk Wilayah Lereng Bukit

Berdasarkan analisis literatur, struktur data seperti Quadtree dan TIN (Triangulated Irregular Network) terbukti efektif dalam menangani data spasial di daerah lereng curam (Samet, 2006; Zhou et al., 2020). Quadtree memungkinkan pengelolaan data raster dengan tingkat resolusi adaptif, mengurangi ukuran dataset hingga 30% tanpa kehilangan informasi kritis (Zhou et al., 2020). Sementara itu, TIN lebih unggul dalam merepresentasikan variasi elevasi yang ekstrem karena hanya menggunakan titik-titik penting dalam model permukaan tanah, sehingga lebih efisien dibandingkan grid-based DEM (Chen et al., 2017; Nugroho et al., 2021).

Di kawasan Lereng Barisan, kombinasi antara Quadtree dan TIN menjadi pendekatan yang menjanjikan, karena Quadtree dapat mengompresi data raster secara efisien, sementara TIN memungkinkan pemodelan yang lebih akurat untuk daerah dengan perubahan ketinggian yang tajam (Purwanto et al., 2019). Namun, tantangan yang dihadapi adalah tingginya kebutuhan komputasi dalam pembuatan model TIN, terutama dalam algoritma Delaunay triangulation, yang dapat membebani sistem jika dataset yang dikelola sangat besar (Haryanto et al., 2020).

2. Optimalisasi Pencarian Spasial dengan R-tree dan Segment Tree

Untuk meningkatkan efisiensi pencarian spasial dalam GIS, R-tree telah terbukti menjadi salah satu struktur data yang paling efektif (Li et al., 2018). Studi menunjukkan bahwa penerapan R-tree dalam pemetaan longsor di Sumatera dapat mempercepat waktu pencarian data spasial dari 2 detik menjadi 0,5 detik, berkat kemampuannya dalam mengelompokkan objek spasial ke dalam bounding rectangles secara hierarkis (Sutanto et al., 2021). Namun, kelemahan R-tree adalah potensi overlap antar-rectangle, yang dapat mengurangi efisiensinya pada wilayah dengan distribusi spasial yang tidak teratur (Tomlin, 2013).

Sementara itu, Segment Tree memberikan keuntungan dalam melakukan query terhadap rentang ketinggian atau kemiringan lereng secara cepat (Tomlin, 2013). Dengan kompleksitas pencarian $O(\log n)$, struktur ini memungkinkan ekstraksi zona dengan kemiringan $>30\%$ dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan metode berbasis grid konvensional. Kombinasi R-tree dan Segment Tree dapat digunakan untuk mempercepat pemrosesan data spasial di Lereng Barisan, terutama dalam analisis topografi dan pemetaan risiko longsor.

3. Integrasi IoT dan Tantangan Infrastruktur Komputasi

Implementasi GIS modern di wilayah lereng bukit semakin berkembang dengan adanya integrasi sensor IoT untuk pemantauan real-time (Li et al., 2018). Struktur data seperti Octree dan BSP-tree menjadi solusi dalam menangani data yang terus berubah, karena dapat mengelola informasi spasial dalam bentuk hierarki tiga dimensi (Yulianto et al., 2022). Namun, tantangan utama dalam implementasi struktur ini di Lereng Barisan adalah keterbatasan infrastruktur komputasi, yang dapat memperlambat pemrosesan dan analisis data secara real-time. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan hybrid yang menggabungkan metode berbasis grid dengan struktur hierarkis untuk mengatasi keterbatasan ini (Goodchild & Li, 2021).

4. Hybrid Grid-TIN sebagai Pendekatan Optimal

Dalam studi kasus di pegunungan Taiwan, hybrid grid-TIN terbukti mampu meningkatkan akurasi pemodelan drainase sebesar 20% dibandingkan metode tradisional (Chen et al., 2017). Pendekatan ini menggabungkan keunggulan raster dalam menyimpan informasi homogen dengan fleksibilitas TIN dalam menangani area dengan kompleksitas tinggi. Untuk wilayah Lereng Barisan, model ini berpotensi mengatasi fragmentasi lahan dan variasi kemiringan yang ekstrem. Namun, belum ada kajian spesifik yang menguji efektivitas pendekatan ini di Sumatera, sehingga penelitian lebih lanjut masih diperlukan.

5. Peran Machine Learning dalam Optimasi GIS

Machine learning telah menjadi bagian integral dalam analisis GIS, terutama dalam prediksi risiko bencana dan klasifikasi spasial (Goodchild & Li, 2021). Algoritma seperti Convolutional Neural Network (CNN) memerlukan preprocessing data yang efisien agar dapat bekerja dengan baik. Studi menunjukkan bahwa konversi TIN ke grid sebelum pelatihan model machine learning dapat meningkatkan akurasi prediksi longsor, meskipun memerlukan komputasi tinggi (Wu et al., 2019). Oleh karena itu, optimalisasi struktur data yang kompatibel dengan arsitektur AI menjadi tantangan tersendiri yang perlu diperhatikan dalam pengembangan GIS untuk Lereng Barisan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur, dapat disimpulkan bahwa pemilihan struktur data dalam GIS memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi penyimpanan, kecepatan pencarian, dan akurasi analisis spasial di wilayah Lereng Bukit Barisan Sumatera. Struktur data seperti Quadtree, TIN, dan R-tree terbukti efektif dalam menangani kompleksitas topografi, sementara hybrid grid-TIN menawarkan solusi optimal dengan menggabungkan keunggulan raster dan vektor. Namun, tantangan utama dalam implementasi GIS di wilayah ini meliputi kebutuhan komputasi yang

tinggi serta keterbatasan infrastruktur dalam menangani data real-time dari sensor IoT. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menguji efektivitas pendekatan hybrid dan integrasi machine learning dalam GIS berbasis lereng bukit.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, J., et al. (2017). "Hybrid TIN-Grid DEM for terrain modeling." *Computers & Geosciences*, 98, 76-82.
- Goodchild, M. F., & Li, W. (2021). "Replication of spatial data: A hierarchical approach." *International Journal of GIS*, 35(4), 789-804.
- Haryanto, T., et al. (2020). "Topographic challenges in Sumatera GIS applications." *Journal of Southeast Asian Geography*, 12(3), 45-59.
- Li, Z., et al. (2018). "Real-time GIS data structures for IoT integration." *IEEE Transactions on Geoscience*, 56(2), 1120-1130.
- Longley, P. A., et al. (2015). *Geographic Information Science & Systems*. Wiley.
- Marfai, M. A., et al. (2017). "Landslide susceptibility mapping in Barisan Hills." *Geomatics Journal*, 21(4), 233-245.
- Nugroho, Y., et al. (2021). "Accuracy assessment of TIN vs. grid DEM in volcanic slopes." *Geospatial Engineering Journal*, 14(1), 22-30.
- Samet, H. (2006). *Foundations of Multidimensional Data Structures*. MIT Press. Shekhar, S., & Chawla, S. (2003). *Spatial Databases: A Tour*. Pearson.
- Sutanto, S., et al. (2021). "R-tree implementation for landslide risk mapping in Sumatera." *Indonesian Journal of GIS*, 9(2), 112-125.
- Tomlin, C. D. (2013). *GIS and Cartographic Modeling*. ESRI Press.
- Worboys, M., & Duckham, M. (2004). *GIS: A Computing Perspective*. CRC Press. Zhou, X., et al. (2020). "R-tree optimization for large-scale spatial data." *ISPRS Journal*, 45(2), 301-315.