INSECT: Jurnal Teknik Informatika
INFORMATICS AND SECURITY e-ISSN. 2614-431X

Visualisasi Interaktif Simulasi Penyebaran Kebakaran Hutan dan Lahan Berbasis *WebGIS* Menggunakan Leaflet.js

Joko Supriyanto*[1], Muhammad Immawan Aulia[2], Khairina Eka Setya Putri[3], Arif Ramadan[4], Gilar Adi Prayatna[5]
[1]Program Studi Informatika, Universitas Siber Muhammadiyah, Yogyakarta
[2]Program Studi Informatika, Universitas Islam Mulia, Yogyakarta
[3,4,5]Program Studi Sistem Informasi, Universitas Siber Muhammadiyah, Yogyakarta
E-mail: ***[1]joko@sibermu.ac.id**, [2]muhimmawanaulia16@uim-yogya.ac.id,
[3]khairinaekasetyaputri@sibermu.ac.id, [4]arif20230200060@sibermu.ac.id,
[5]gilar20230200040@sibermu.ac.id

Abstrak

Kebakaran hutan dan lahan di Indonesia terjadi hampir setiap tahun dan memerlukan alat bantu visualisasi yang mudah diakses oleh petugas lapangan untuk mendukung pengambilan keputusan mitigasi bencana secara cepat, tanpa bergantung pada perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG) yang kompleks dan berlisensi mahal. Penelitian ini membangun dan mengevaluasi lapisan visualisasi interaktif berbasis pustaka Leaflet.js untuk menampilkan hasil simulasi penyebaran api pada peta digital, terintegrasi dengan mesin simulasi rambatan api berbasis Probabilistic Cellular Automata dan model Rothermel yang berjalan sepenuhnya di sisi klien (client-side) tanpa server backend. Metode penelitian menggunakan pendekatan Experimental Software Engineering deskriptif dan implementatif: merancang arsitektur tiga lapisan (layer) Leaflet.js berupa peta dasar (basemap), overlay tingkat risiko bahan bakar (fuel risk), dan poligon perimeter api dinamis, kemudian mengujinya secara fungsional (black-box testing) pada tiga aspek pengujian. Hasil pengujian pada delapan skenario dengan durasi berbeda (20, 24, 32, dan 48 jam) menunjukkan bahwa Leaflet.js mampu merender data grid geospasial dan poligon vektor pada peramban standar; pada skenario tiga titik api rendering berlangsung tanpa kegagalan yang teramati hingga luas area terbakar 109 ha, sedangkan skenario berdurasi 24 hingga 48 jam menghasilkan luas 604 hingga 2.338 ha dengan poligon perimeter tetap tertampil. Dapat disimpulkan bahwa Leaflet.js berpotensi menjadi pilihan pustaka visualisasi WebGIS sumber terbuka yang fleksibel, bebas lisensi berbayar, dan sesuai untuk aplikasi mitigasi bencana kebakaran berbasis web dengan sumber daya komputasi terbatas, meskipun validasi kuantitatif lebih lanjut terhadap kinerja rendering (penggunaan memori dan frame rate) pada variasi perangkat keras masih diperlukan.

Kata kunci *- Leaflet.js, WebGIS,* Visualisasi Interaktif, Simulasi Kebakaran, Peta Digital

1. PENDAHULUAN

Indonesia menghadapi tantangan besar dalam penanggulangan kebakaran hutan dan lahan yang terjadi hampir setiap tahun [1]. Kendala yang sering dihadapi di lapangan adalah terbatasnya akses petugas terhadap alat bantu visualisasi spasial yang cepat dan mudah dioperasikan, karena perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG) *desktop* umumnya memerlukan instalasi khusus dan, pada produk komersial, lisensi berbayar. Kebutuhan akan peta interaktif yang ringan dan dapat dijalankan langsung pada peramban tanpa instalasi tambahan menjadi relevan bagi tim

pemadam kebakaran dan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) yang membutuhkan dukungan informasi spasial dalam manajemen kebakaran [2,3].

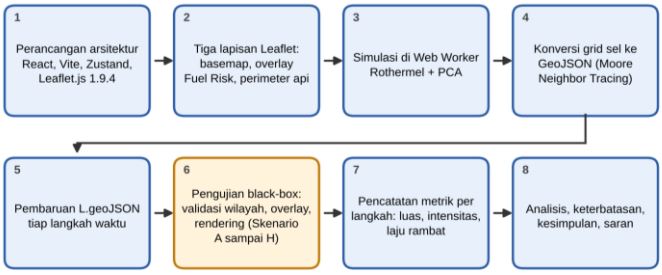
Leaflet.js merupakan pustaka JavaScript sumber terbuka (*open-source*) untuk membangun peta web interaktif yang dikenal ringan dan ramah perangkat *mobile* [4]. Pustaka ini menyediakan *rendering* lapisan ubin (*tile layer*), *overlay* raster/vektor, dan interaksi pengguna melalui arsitektur *plugin* [4]. Evaluasi kinerja pustaka pemetaan web sumber terbuka melaporkan bahwa Leaflet 1.9.4 termasuk yang tercepat pada jumlah fitur vektor kecil hingga menengah (sekitar 10.000 fitur), namun melambat pada jumlah fitur yang sangat besar [5]. Kajian komparatif lain terhadap pustaka pemetaan web gratis juga telah dilakukan sebagai alat pendukung keputusan pada proyek basis data geospasial [6].

Pada domain mitigasi kebakaran hutan dan lahan, sejumlah penelitian telah mengembangkan sistem berbasis geospasial dan pembelajaran mesin untuk pemetaan risiko dan prediksi kebakaran [1] serta sistem deteksi kebakaran multisumber [7]. Model *Cellular Automata* (CA) juga banyak digunakan untuk mensimulasikan pola rambatan api secara spasial [8,9], sedangkan parameterisasi bahan bakar pada simulasi berbasis Rothermel umumnya merujuk pada klasifikasi model bahan bakar standar [10]. Studi tersebut pada umumnya menjadikan akurasi model prediksi atau algoritma simulasi sebagai luaran utama. Sepanjang penelusuran penulis, laporan kuantitatif kinerja *rendering* sisi klien (misalnya penggunaan memori peramban atau kapasitas penanganan poligon vektor multilapisan) untuk arsitektur visualisasi WebGIS yang menyajikan hasil simulasi kepada pengguna akhir relatif jarang ditemukan. Sebagian studi memang memuat keluaran visual dan integrasi SIG [2], tetapi lapisan visualisasinya tidak dievaluasi sebagai objek penelitian. Hal inilah yang menjadi kesenjangan spesifik yang dituju oleh penelitian ini.

Penelitian ini berfokus pada implementasi dan evaluasi awal lapisan visualisasi interaktif menggunakan Leaflet.js dalam konteks sistem simulasi penyebaran kebakaran hutan dan lahan berbasis web. Berbeda dari penelitian yang menitikberatkan pada akurasi model fisis rambatan api, penelitian ini menitikberatkan pada bagaimana Leaflet.js diimplementasikan untuk merender data hasil simulasi (peta dasar, *overlay* risiko bahan bakar, dan poligon perimeter api dinamis) pada peramban standar. Kontribusi penelitian ini adalah pendokumentasian arsitektur visualisasi WebGIS berbasis Leaflet.js beserta hasil pengujian awalnya, yang dapat menjadi acuan awal bagi pengembangan aplikasi mitigasi bencana serupa dengan sumber daya komputasi terbatas.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Experimental Software Engineering* dengan pendekatan deskriptif dan implementatif, yaitu merancang, mengimplementasikan, dan menguji secara fungsional lapisan visualisasi berbasis Leaflet.js pada sistem simulasi penyebaran api yang telah dikembangkan sebelumnya (Spread Fire Simulation/SFS). Alur penelitian diringkas pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur metode penelitian

2.1 Arsitektur Visualisasi Berbasis Leaflet.js

Sistem diimplementasikan menggunakan arsitektur pemrosesan sisi klien (*client-side processing*) dengan pustaka React, *build tool* Vite, dan *state management* Zustand, sedangkan

seluruh visualisasi peta interaktif ditangani oleh pustaka Leaflet.js versi 1.9.4. Perhitungan simulasi (model Rothermel dan *Probabilistic Cellular Automata*) dijalankan pada *Web Worker* terpisah dari *thread* utama peramban, dengan tujuan menjaga peta tetap dapat berinteraksi selama komputasi berjalan. Arsitektur lapisan Leaflet.js pada sistem ini terdiri atas tiga kelompok utama sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1 Arsitektur Lapisan (*Layer*) Leaflet.js pada Sistem

Jenis Lapisan	Komponen Leaflet.js	Fungsi
Peta dasar (*basemap*)	L.tileLayer	Ubin peta jalan (OSM), satelit, atau topografi yang dapat dipilih pengguna
Overlay risiko bahan bakar	L.imageOverlay / canvas	Gradasi warna probabilitas mudah terbakar per sel *grid*
Perimeter api & titik ignisi	L.geoJSON, L.marker	Poligon area terbakar dan penanda titik api, diperbarui dinamis
Kontrol interaksi	L.control.layers, event click	Panel pemilihan *layer* dan penempatan titik api melalui klik peta

Data hasil simulasi dari *Web Worker* dikonversi menjadi format GeoJSON menggunakan algoritma *Moore Neighbor Tracing* untuk menghasilkan poligon vektor dari sel *grid* raster, dengan tujuan menjaga *overlay* peta tetap ringan meskipun merepresentasikan banyak sel simulasi. Setiap kali langkah waktu simulasi diperbarui, lapisan L.geoJSON pada peta di-*refresh* dengan data poligon terbaru tanpa memuat ulang seluruh peta (*basemap* tetap statis), dengan tujuan menjaga transisi visual tetap mulus.

2.2 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan secara fungsional (*black-box testing*) terhadap tiga aspek pengujian utama: (1) validasi cakupan wilayah dan penempatan titik api, untuk memastikan interaksi klik pada peta dan penanganan galat berjalan sebagaimana dirancang; (2) *rendering* lapisan *overlay* risiko bahan bakar, untuk memastikan gradasi warna per sel *grid* tervisualisasi dengan benar di atas peta dasar; dan (3) *rendering* hasil simulasi rambatan api, untuk memastikan poligon perimeter api diperbarui secara dinamis mengikuti langkah waktu simulasi. Pengujian dilakukan pada kawasan Daerah Istimewa Yogyakarta menggunakan data elevasi digital (DEM) dan model tutupan lahan yang telah dikurasi. Untuk mendukung klaim kinerja secara lebih terukur, pengujian aspek ketiga dilakukan pada dua kondisi beban *rendering* yang berbeda sebagaimana dirangkum pada Tabel 2, menggunakan jumlah titik ignisi, durasi simulasi, jumlah langkah waktu (interval 5 menit), dan luas poligon area terbakar akhir sebagai proksi beban yang terukur. Data Skenario B diperoleh dari berkas metrik simulasi yang mencatat luas area terbakar, intensitas, dan laju rambat pada setiap langkah waktu (cuplikan pada berkas Lampiran); berkas tersebut tidak merekam jumlah titik ignisi maupun pengamatan visual rendering. Enam skenario tambahan (Skenario C sampai H) berdurasi 32 dan 48 jam masing-masing menggunakan tiga titik ignisi pada kawasan berbeda di DI Yogyakarta; datanya berasal dari berkas metrik simulasi berinterval 5 menit (384 langkah waktu pada skenario 32 jam dan 576 langkah waktu pada skenario 48 jam; cuplikan pada berkas Lampiran) serta tangkapan layar akhir sesi simulasi pada panel pemutar, yang menampilkan waktu simulasi, luas area terbakar (*burned*), dan laju rambat akhir (*spread*) (Tabel 3). Kecepatan angin, kelembapan, dan suhu skenario tersebut tidak tercantum pada tangkapan layar sehingga tidak dilaporkan. Pengukuran penggunaan memori peramban sempat dilakukan melalui *tooltip* bawaan peramban pada akhir sesi skenario tiga titik api, namun pembacaan tersebut tidak digunakan sebagai data kinerja karena *tooltip* tumpang tindih dengan pratinjau tab peramban lain yang tidak terkait dengan aplikasi yang diuji, sehingga nilainya tidak dapat diverifikasi sebagai representasi murni memori aplikasi. Keterbatasan ini dilaporkan secara transparan pada bagian Pembahasan dan dijadikan dasar rekomendasi protokol pengukuran kinerja yang lebih andal pada bagian Saran.

Tabel 2 Ringkasan Dua Skenario Pengujian *Rendering* dengan Beban Berbeda

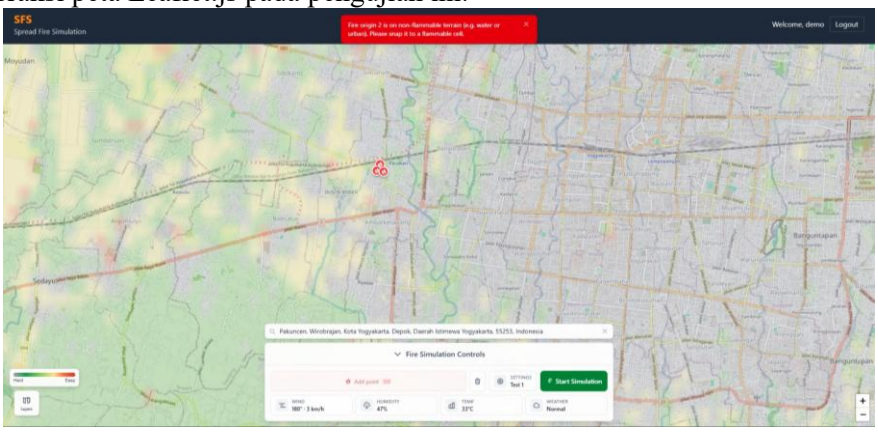
Parameter	Skenario A	Skenario B
Jumlah titik ignisi	3	Tidak tercatat
Durasi simulasi	20 jam	24 jam
Jumlah langkah waktu	240 (interval 5 menit)	288 (interval 5 menit)

Parameter	Skenario A	Skenario B
Luas area terbakar akhir	109 ha	628 ha
Status *rendering* GeoJSON	Berhasil, tanpa *flicker* teramati	Tidak diamati

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Validasi Cakupan Wilayah dan Interaksi Peta

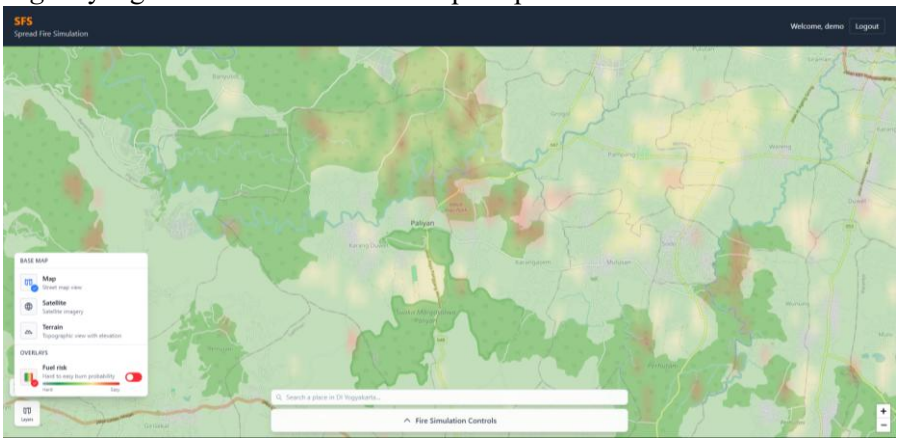
Pengujian pada sistem produksi mengonfirmasi bahwa lapisan interaksi Leaflet.js berhasil menangkap klik pengguna pada peta untuk penempatan titik api, sekaligus menampilkan validasi cakupan wilayah secara langsung di atas peta. Pada percobaan penempatan tiga titik api di sekitar Yogyakarta, sistem menampilkan pesan galat "*Fire origin 2 is on non-flammable terrain (e.g. water or urban). Please snap it to a flammable cell.*" ketika salah satu titik ditempatkan pada sel *non-flammable* (Gambar 2), menunjukkan bahwa validasi logika aplikasi berfungsi bersama lapisan interaksi peta Leaflet.js pada pengujian ini.



Gambar 2. Antarmuka peta Leaflet.js pada SFS (Spread Fire Simulation), menampilkan validasi penempatan titik api dan pesan galat interaktif

3.2 Rendering Lapisan Overlay Risiko Bahan Bakar

Lapisan *overlay Fuel Risk* berhasil dirender oleh Leaflet.js sebagai gradasi warna hijau, kuning, hingga merah (*hard-to-easy burn probability*) di atas peta dasar topografi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Panel kontrol *layer* (L.control.layers) memungkinkan pengguna beralih antara mode peta jalan, satelit, dan topografi, serta mengaktifkan/menonaktifkan *overlay Fuel Risk* secara independen tanpa memuat ulang halaman. Pada pengamatan visual selama pengujian, *overlay* tampil tanpa kegagalan pada tampilan yang diuji; kinerja pada cakupan area dan resolusi *grid* yang lebih besar belum diukur pada penelitian ini.

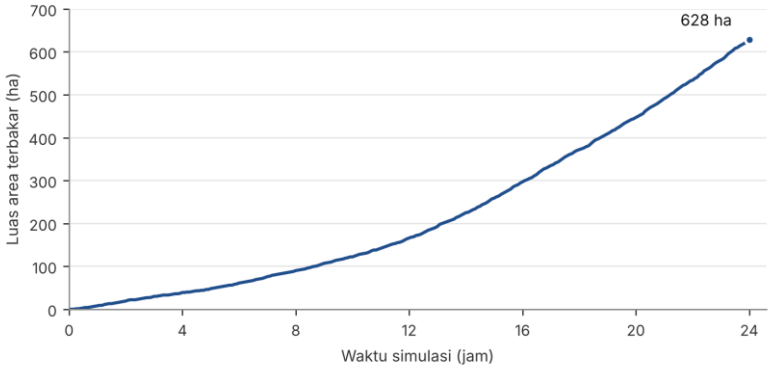


Gambar 3 Lapisan *overlay Fuel Risk* pada kawasan Paliyan/Girisuko, DI Yogyakarta, menampilkan gradasi probabilitas mudah terbakar hasil klasifikasi model bahan bakar

3.3 Rendering Hasil Simulasi pada Beberapa Skenario

Pada pengujian skenario tiga titik api (Skenario A), Leaflet.js berhasil merender poligon perimeter area terbakar secara dinamis mengikuti progres simulasi, menghasilkan luas area terbakar 109 ha setelah 20 jam waktu simulasi atau 240 langkah waktu (Gambar 4). Sebagai skenario uji kedua dengan beban *rendering* yang lebih besar (Skenario B), pengujian berdurasi 24 jam (288 langkah waktu) menghasilkan luas area terbakar akhir 628 ha, dengan pertumbuhan luas yang meningkat bertahap sepanjang simulasi (Gambar 5; data pada berkas Lampiran). Pada Skenario A, poligon dirender menggunakan lapisan L.geoJSON yang diperbarui setiap langkah waktu tanpa menyebabkan *flicker* atau jeda visual yang mengganggu pada pengamatan selama pengujian; pada Skenario B pengamatan visual *rendering* tidak tercatat sehingga data yang tersedia hanya mendukung hasil luas area terbakar (Tabel 2). Pembacaan memori peramban yang sempat diperoleh pada Skenario A tidak disajikan sebagai data kinerja karena tidak dapat diverifikasi (lihat Metode).

Gambar 4 Poligon perimeter area terbakar hasil *rendering* Leaflet.js pada skenario tiga titik ignisi setelah 20 jam simulasi (luas akhir 109 ha), kondisi angin 180°/3 km/h, kelembapan 45%, suhu 33°C



Gambar 5. Pertumbuhan luas area terbakar pada Skenario B (24 jam, 288 langkah waktu, luas akhir 628 ha)

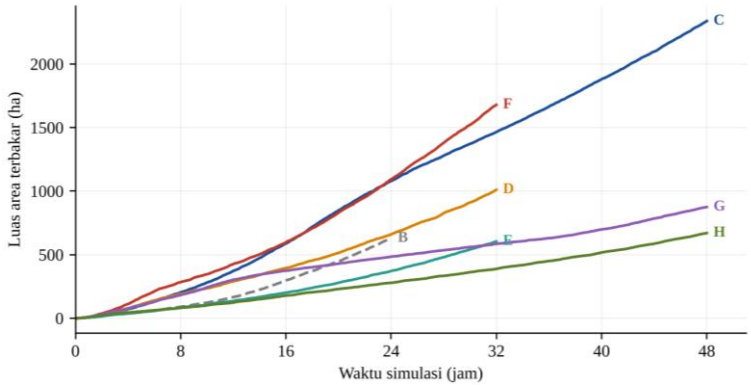
Untuk menguji perilaku visualisasi pada durasi yang lebih panjang, enam skenario tambahan (Skenario C sampai H) dijalankan dengan tiga titik ignisi pada kawasan berbeda di DI Yogyakarta, berdurasi 32 jam (Skenario D, E, dan F; 384 langkah waktu) dan 48 jam (Skenario C, G, dan H; 576 langkah waktu). Tabel 3 merangkum hasil berkas metrik simulasi, Gambar 6 menampilkan tangkapan layar akhir tiap skenario, dan Gambar 7 menunjukkan pertumbuhan luas area terbakar pada seluruh skenario yang memiliki berkas metrik (Skenario B sampai H). Luas area terbakar akhir berkisar 604 ha (Skenario E) hingga 2.338 ha (Skenario C). Pada seluruh skenario, Leaflet.js menampilkan poligon perimeter api bersama penanda titik ignisi, *overlay Fuel Risk*, dan peta dasar secara bersamaan tanpa kegagalan *rendering* yang terlihat pada tangkapan layar akhir. Api pada Skenario D dan E dirender sebagai tiga poligon terpisah, pada Skenario F

sebagai dua poligon, dan pada Skenario C, G, dan H seluruh titik ignisi menyatu menjadi satu perimeter. Tangkapan layar hanya merekam keadaan akhir sehingga kelancaran transisi antarlangkah waktu pada skenario ini belum diamati secara terukur.

Tabel 3 Ringkasan Skenario Tambahan C sampai H berdasarkan Berkas Metrik Simulasi

Skenario	Durasi (langkah)	Luas akhir	Laju rambat rata-rata (m/menit)	Intensitas rata-rata (0 sampai 100)	Kawasan pada peta
C	48 jam (576)	2.338 ha	1,01	92,4	Paliyan/Girisuko
D	32 jam (384)	1.011 ha	1,06	86,8	Pucanganom/Dadapayu/Rongkop
E	32 jam (384)	604 ha	0,78	66,6	Ngedirejo/Banjarejo/Sumber Wungu
F	32 jam (384)	1.679 ha	1,24	93,9	Bedoyo/Pucanganom/Rongkop
G	48 jam (576)	875 ha	0,42	56,2	Parangtritis, Bantul
H	48 jam (576)	670 ha	0,38	52,4	Girisuko, Gunungkidul

Gambar 6 Tangkapan layar akhir simulasi pada Skenario C sampai H (tiga titik ignisi per skenario): (C) 48 jam, 2.338 ha; (D) 32 jam, 1.011 ha; (E) 32 jam, 604 ha; (F) 32 jam, 1.679 ha; (G) 48 jam, 875 ha; (H) 48 jam, 670 ha



Gambar 7 Pertumbuhan luas area terbakar pada Skenario B sampai H berdasarkan berkas metrik simulasi (garis putus-putus: Skenario B)

Berkas metrik menunjukkan bahwa luas area terbakar tidak pernah menurun pada ketujuh skenario (B sampai H) dan bertambah paling banyak 9 ha per langkah waktu 5 menit, sehingga poligon yang dirender pada tiap pembaruan hanya berubah secara bertahap. Skenario dengan luas akhir terbesar (C, D, dan F) memiliki intensitas rata-rata 86,8 hingga 93,9 dan mencapai indeks 100 pada 219 hingga 470 langkah waktu, sedangkan Skenario G dan H tidak pernah mencapai indeks 100 dan menghasilkan luas akhir lebih kecil (875 dan 670 ha) meskipun berdurasi 48 jam. Pola ini menunjukkan bahwa durasi simulasi saja tidak menentukan luas area terbakar; faktor penyebabnya (misalnya bahan bakar atau kondisi cuaca tiap kawasan) belum diisolasi dalam penelitian ini.

3.4 Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa Leaflet.js dapat menampilkan visualisasi WebGIS multilapisan (*basemap*, *overlay* raster, dan poligon vektor dinamis) pada skenario yang diuji tanpa memerlukan infrastruktur server tambahan maupun lisensi berbayar, karena Leaflet merupakan pustaka sumber terbuka [4]. Hasil ini konsisten dengan evaluasi kinerja pustaka pemetaan web sumber terbuka yang melaporkan keunggulan Leaflet pada jumlah fitur vektor kecil hingga menengah (sekitar 10.000 fitur) [5], meskipun evaluasi tersebut juga mencatat penurunan kinerja pada jumlah fitur yang sangat besar, sehingga skalabilitas sistem ini pada *grid* yang jauh lebih besar masih perlu diuji. Enam skenario tambahan berdurasi 32 dan 48 jam dengan luas area terbakar hingga 2.338 ha (Tabel 3) tetap menampilkan poligon perimeter, *overlay*, dan peta dasar secara bersamaan, sehingga mendukung kelayakan fungsional pada beban poligon yang lebih besar, meskipun tanpa pengukuran kinerja kuantitatif. Kajian komparatif pustaka pemetaan web gratis [6] dapat dijadikan dasar untuk pembandingan lanjutan.

Berbagai pendekatan lain untuk pemodelan dan prediksi rambatan kebakaran telah dikembangkan, misalnya Cell2Fire yang mengintegrasikan model Rothermel dengan platform perencanaan pengelolaan lanskap strategis [11], model pembelajaran mendalam FireCast [12], sistem informasi geospasial *near real-time* untuk deteksi dan respons kebakaran [13], analisis model propagasi FARSITE untuk kebakaran berkepanjangan [14], serta peningkatan akurasi simulasi menggunakan data titik api aktif satelit [15]. Pendekatan kecerdasan buatan generatif [16] dan CA probabilistik berbasis peta terklaster [17] menawarkan variasi skema pemodelan, sedangkan tinjauan simulator empiris dan dinamis [18] merangkum perkembangannya. Sepanjang penelusuran penulis, studi tersebut menitikberatkan pada model dan prediksi, bukan pada evaluasi arsitektur visualisasi WebGIS sisi klien, sehingga dokumentasi seperti yang disajikan pada penelitian ini dapat berfungsi sebagai pelengkap.

Implikasi praktisnya bagi tim pemadam kebakaran/BPBD adalah kemudahan akses melalui peramban pada perangkat standar tanpa instalasi perangkat lunak SIG khusus. Karena simulasi dijalankan dan riwayatnya disimpan di sisi klien, arsitektur ini berpotensi mengurangi ketergantungan pada server; namun, *tile* peta dasar tetap memerlukan koneksi jaringan kecuali didukung penyimpanan *tile* luring, yang belum diuji pada penelitian ini.

Meskipun demikian, beberapa keterbatasan perlu dicatat. Pertama, pengujian *rendering* saat ini bersifat fungsional (*black-box*) dan belum mencakup pengukuran kuantitatif kecepatan *rendering* (*frame rate*) pada variasi ukuran *grid* dan perangkat keras yang berbeda, sehingga performa Leaflet.js pada skenario *grid* yang jauh lebih besar belum dapat dipastikan. Kedua, satu-satunya pembacaan memori peramban yang sempat diperoleh tidak dapat diverifikasi sebagai representasi murni memori aplikasi sehingga tidak disertakan; klaim efisiensi memori karenanya belum didukung metrik yang tervalidasi dan hanya didukung pengamatan tidak adanya kegagalan *rendering* pada Skenario A. Ketiga, pengujian ini hanya mencakup satu wilayah kajian (DI Yogyakarta) dengan delapan skenario simulasi; pengujian pada wilayah lain dan sesi berulang akan memperkuat generalisasi temuan. Keempat, penelitian ini tidak membandingkan Leaflet.js secara *head-to-head* dengan pustaka alternatif (misalnya MapLibre GL JS) pada studi kasus yang

identik, sehingga klaim keunggulan relatif masih bersifat kualitatif berdasarkan tinjauan pustaka [6], bukan hasil pengujian komparatif langsung.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan dan mengevaluasi lapisan visualisasi interaktif berbasis Leaflet.js pada sistem simulasi penyebaran kebakaran hutan dan lahan berbasis web. Beberapa simpulan utama yang dapat ditarik adalah sebagai berikut.

1. Tiga jenis lapisan utama (peta dasar, *overlay* risiko bahan bakar, dan poligon perimeter api dinamis) berhasil dirender secara fungsional oleh Leaflet.js pada peramban standar dalam pengujian ini.
2. Arsitektur visualisasi tidak memerlukan server *backend* maupun lisensi pustaka berbayar, sehingga dapat diakses langsung melalui perangkat standar tanpa instalasi perangkat lunak SIG khusus.
3. Pada delapan skenario (20, 24, 32, dan 48 jam), poligon dirender tanpa kegagalan yang teramati pada skenario tiga titik api 20 jam (109 ha) dan pada tangkapan layar akhir Skenario C sampai H (604 hingga 2.338 ha), sedangkan skenario 24 jam mencapai 628 ha berdasarkan data metrik simulasi tanpa pengamatan visual; klaim efisiensi memori belum didukung metrik yang tervalidasi.
4. Berdasarkan pengujian awal ini, Leaflet.js menunjukkan potensi sebagai pustaka visualisasi WebGIS yang layak dipertimbangkan bagi pengembangan aplikasi mitigasi bencana kebakaran berbasis web dengan sumber daya komputasi terbatas, dengan catatan bahwa klaim tersebut masih perlu diperkuat melalui pengukuran kinerja kuantitatif dan pengujian pada cakupan skenario yang lebih luas.

5. SARAN

Berdasarkan keterbatasan yang telah diuraikan pada bagian pembahasan, beberapa saran diajukan untuk penelitian lanjutan.

1. Melakukan pengukuran kuantitatif kecepatan *rendering* (*frame rate*), latensi, dan penggunaan memori peramban menggunakan instrumentasi terprogram (misalnya *Performance API/Memory API* peramban) yang tidak bergantung pada *tooltip* bawaan peramban yang rentan tertimpa konten tab lain, pada variasi ukuran *grid* dan spesifikasi perangkat keras yang berbeda.
2. Memperluas pengujian pada wilayah kajian yang lebih beragam untuk memperkuat generalisasi temuan arsitektur visualisasi.
3. Melakukan pengujian komparatif langsung antara Leaflet.js dan pustaka pemetaan web alternatif (misalnya MapLibre GL JS atau OpenLayers) pada studi kasus yang identik.
4. Mengeksplorasi dukungan mode luring (*offline tile caching*) pada Leaflet.js untuk meningkatkan keandalan penggunaan di lokasi bencana dengan konektivitas jaringan terbatas.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Puspitadewi, C. H., Dhini, A., Laoh, E., dan Sudiana, D., "GIS-based wildfire prediction model in Indonesia using stacking ensemble learning," *Artificial Intelligence in Geosciences*, vol. 7, no. 2, hal. 100228, 2026, https://doi.org/10.1016/j.aiig.2026.100228.

[2] Ghosh, R., Adhikary, J., dan Chemlal, R., "Fire Spread Modeling using Probabilistic Cellular Automata," arXiv:2403.08817 (pracetak), 2024, https://arxiv.org/abs/2403.08817.

[3] Freire, J. G., dan DaCamara, C. C., "Using cellular automata to simulate wildfire propagation and to assist in fire management," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 19, no. 1, hal. 169–179, 2019, https://doi.org/10.5194/nhess-19-169-2019.

[4] Agafonkin, V., "Leaflet — an open-source JavaScript library for interactive maps," 2024, https://leafletjs.com/.

[5] Balla, D., dan Gede, M., "Comparative performance analysis of open source web mapping libraries for rendering large amounts of vector data," *Abstracts of the ICA*, vol. 10, hal. 14, 2025, https://doi.org/10.5194/ica-abs-10-14-2025.

[6] Ott, N., dan Mäs, S., "Analysis of free web mapping libraries: As decision support tool for the World Heat Flow Database Project," Zenodo, 2023, https://doi.org/10.5281/zenodo.8139086.

[7] Puttinaovarat, S., Saeliw, A., Pruitikanee, S., Kongcharoen, J., Seksan, J., Wangpoonsarp, A., Anucharn, T., dan Iamchuen, N., "WildfireGO: A Multi-Source Wildfire Detection and Validation System Integrating Crowdsourcing, Satellite Hotspots, and Deep Learning," *Applied System Innovation*, vol. 9, no. 7, hal. 136, 2026, https://doi.org/10.3390/asi9070136.

[8] Mutthulakshmi, K., Wee, M. R. E., Wong, Y. C. K., Lai, J. W., Koh, J. M., Acharya, U. R., dan Cheong, K. H., "Simulating forest fire spread and fire-fighting using cellular automata," *Chinese Journal of Physics*, 2020, https://doi.org/10.1016/j.cjph.2020.04.001.

[9] Zhuang, H., Liu, N., Xie, X., Xu, X., Li, M., Zhang, Y., dan Wang, R., "Simulating wildfire spread based on continuous time series remote sensing images and cellular automata," *International Journal of Wildland Fire*, vol. 34, no. 1, hal. WF24130, 2025, https://doi.org/10.1071/WF24130.

[10] Anderson, H. E., "Aids to determining fuel models for estimating fire behavior," USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, USA, Gen. Tech. Rep. INT-122, 1982.

[11] Pais, C., Carrasco, J., Martell, D. L., Weintraub, A., dan Woodruff, D. L., "Cell2Fire: A Cell-Based Forest Fire Growth Model to Support Strategic Landscape Management Planning," *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 4, hal. 692706, 2021, https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.692706.

[12] Radke, D., Hessler, A., dan Ellsworth, D., "FireCast: Leveraging Deep Learning to Predict Wildfire Spread," dalam *Proc. 28th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-19)*, Macao, Tiongkok, 2019, hal. 4575–4581, https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/636.

[13] Gonçalves, J., Barroso, G. M., dan Barata, C. S., "PROTEGE: A Near Real-Time Geospatial Information System for Wildfire Detection and Response in the Brazilian Amazon," dalam *Anais do Seminário Integrado de Software e Hardware (SEMISH)*, Porto Alegre: SBC, 2026, hal. 542–553, https://doi.org/10.5753/semish.2026.22629.

[14] Martins, L., Almeida, R. V. de, Maia, A., dan Vieira, P., "Analysing *Fire* Propagation Models: A Case Study on FARSITE for Prolonged Wildfires," Fire, vol. 8, no. 5, hal. 166, 2025, https://doi.org/10.3390/fire8050166.

[15] Beyki, S. M., Lopes, A. M. G., Santiago, A., dan Laím, L., "Improving wildfire simulation accuracy using satellite active fire data for interval reinitialization and rate of spread adjustment," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, hal. 101648, 2025, https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101648.

[16] Xu, H., Zlatanova, S., Liang, R., dan Canbulat, I., "Generative AI as a Pillar for Predicting 2D and 3D Wildfire Spread: Beyond Physics-Based Models and Traditional Deep Learning," *Fire*, vol. 8, no. 8, hal. 293, 2025, https://doi.org/10.3390/fire8080293.

[17] Brasiel, H. C., dan Lima, D. A., "Clustered-map probabilistic cellular automata for fire propagation in the Brazilian Cerrado with heterogeneous vegetation and wind interference," *Urban Resilience and Sustainability*, vol. 2, no. 1, hal. 45–75, 2024, https://doi.org/10.3934/urs.2024004.

[18] Singh, H., Ang, L.-M., Paudyal, D., Acuna, M., Srivastava, P. K., dan Srivastava, S. K., "A Comprehensive Review of Empirical and Dynamic Wildfire Simulators and Machine Learning Techniques used for the Prediction of Wildfire in Australia," *Technology, Knowledge and Learning*, 2025, https://doi.org/10.1007/s10758-025-09839-5.