

Model Graf Spasial Adaptif untuk Optimasi Jalur UAV pada Sistem Mitigasi Kebakaran Hutan

Adinda Salsa Leviona¹, Triyanna Widiyaningtyas^{1,*}

¹ Program Studi Teknik Informatika, Universitas Negeri Malang, Indonesia

* Correspondence: triyannaw.ft@um.ac.id

Copyright: © 2025 by the authors

Received: 11 Oktober 2025 | Revised: 26 Oktober 2025 | Accepted: 29 November 2025 | Published: 8 Desember 2025

Abstrak

Kebakaran hutan yang dinamis menuntut sistem mitigasi yang adaptif dan responsif secara *real-time*. Optimasi jalur *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menjadi komponen penting dalam mitigasi kebakaran. Penelitian ini bertujuan membandingkan efisiensi algoritma pencarian jalur Dijkstra, A* (*Star*), dan Bidirectional Dijkstra pada graf spasial titik api untuk menilai kinerja pencarian jalur. Penelitian menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif melalui simulasi data. Data berasal dari dataset *Forest Fire Area* (Kaggle), yang berisi 517 kejadian dengan koordinat (X, Y) titik kebakaran hutan di Taman Alam Montesinho, Portugal. *Preprocessing* mencakup analisis pola spasial menggunakan *scatter plot* dan deduplikasi koordinat. Koordinat digunakan sebagai simpul graf menggunakan *Triangulasi Delaunay*. Algoritma diimplementasikan secara *custom-coded*. Evaluasi kinerja dilakukan melalui pengujian berulang berdasarkan metrik waktu eksekusi, penggunaan memori, jumlah simpul yang dieksplorasi, dan panjang lintasan. Hasil temuan kami menunjukkan ketiga algoritma menghasilkan lintasan optimal yang sama, namun A* memberikan efisiensi komputasi tertinggi melalui keseimbangan antara waktu dan memori. Integrasi graf spasial Delaunay dan A* secara signifikan meningkatkan efisiensi algoritma pencarian jalur dengan mengurangi kompleksitas penelusuran, relevan untuk navigasi UAV yang responsif. Penelitian ini secara empiris membandingkan tiga algoritma pada graf spasial titik api menggunakan *Triangulasi Delaunay*. Pendekatan ini jarang diterapkan untuk menganalisis efisiensi algoritma pencarian jalur UAV dalam kondisi spasial riil.

Kata kunci: algoritma a*; algoritma Dijkstra; algoritma *bidirectional search*; *unmanned aerial vehicle* (UAV)

Abstract

Dynamic wildfires require adaptive mitigation systems capable of responding in real time. Optimizing Unmanned Aerial Vehicle (UAV) routes is critical for effective fire mitigation. This study compares the efficiency of the Dijkstra, A*(star), and Bidirectional Dijkstra algorithms on spatial hotspots graph. The quantitative experimental design used data-driven simulation. Data were obtained from the Forest Fire Area dataset (Kaggle), containing 517 wildfires with (X, Y) coordinates in the Montesinho Natural Park, Portugal. Preprocessing involved analyzing spatial patterns using scatter plots and de-duplication of coordinates. These coordinates were then utilized as nodes to construct a graph using Triangulasi Delaunay. The algorithms were implemented using custom-coded. Performance was evaluated through repeated tests based on the metrics of execution time, memory usage, nodes explored, and path length. The results show that all three algorithms achieved identical optimal paths, however A* achieved the highest computational efficiency by balancing time and memory usage. The combination of the Delaunay spatial graph and the A* algorithm effectively reduces search complexity, it suitable for adaptive UAV navigation. This study provides an empirical comparison of algorithms on a spatial hot-spots graph using Triangulation Delaunay, a method rarely used to evaluate the efficiency of UAV path tracing in real spatial conditions.



Keywords: *a* algorithm; bidirectional search algorithm; dijkstra algorithm; unmanned aerial vehicle (UAV)*

PENDAHULUAN

Kebakaran hutan dan lahan (karhutla) merupakan fenomena ekologis yang meluas, cepat berubah, dan berdampak besar terhadap lingkungan, ekonomi, serta kesehatan manusia (Ferreira et al., 2024; Mohapatra & Trinh, 2022). Berdasarkan analisis citra satelit Landsat oleh Potapov et al. (2025) dari *Global Forest Change*, kehilangan tutupan pohon akibat kebakaran hutan pada 2023–2024 meningkat 2,2 kali lipat dibandingkan rata-rata dua dekade sebelumnya. Kondisi ini menunjukkan eskalasi signifikan dalam frekuensi dan intensitas kebakaran global. Keterlambatan pengambilan keputusan pada sistem pemantauan manual serta perubahan lingkungan yang dinamis dan sulit diprediksi memperburuk efektivitas mitigasi kebakaran (Alizadeh et al., 2025; O'Mara et al., 2024; Thomaz & Pereira, 2021). Fenomena ini mencerminkan dinamika spasial-temporal kebakaran hutan yang kompleks, sehingga menuntut pengembangan sistem mitigasi yang adaptif, cepat, dan efisien untuk meminimalkan kerugian ekologis maupun ekonomi (Carta et al., 2023). Dalam konteks tersebut, *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) memiliki potensi strategis karena mampu beroperasi secara *real-time*, melakukan navigasi di area berisiko tinggi, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data (Liu et al., 2022; Xu et al., 2022). Kecepatan dan ketepatan UAV dalam menjangkau titik api menjadi faktor krusial bagi efektivitas operasi mitigasi (Oliveras Menor et al., 2025; Zhou & Zhang, 2023). Namun, efisiensi algoritma *path planning* masih menjadi tantangan utama, terutama pada kondisi spasial yang dinamis dan sulit diprediksi. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan model graf spasial adaptif dan algoritma pencarian jalur yang mampu menyesuaikan diri dengan perubahan lingkungan secara *real-time*.

Pendekatan klasik dalam pencarian jalur algoritma seperti Dijkstra, A*, dan *Bidirectional Dijkstra* memiliki kompleksitas waktu yang terukur serta dasar teoritis yang stabil, sehingga sering dibandingkan berdasarkan efisiensi dan optimalitasnya dalam menentukan rute terpendek (Wayahdi et al., 2021). Algoritma Dijkstra merupakan metode *single-source shortest path* yang mampu menjamin optimalitas jalur pada graf berbobot non-negatif dengan mengekskansi simpul berdasarkan bobot kumulatif terkecil secara bertahap (Pinandito et al., 2024). Algoritma A* adalah gabungan prinsip Dijkstra dengan heuristik *admissible* berbasis jarak Euclidean untuk mengarahkan proses pencarian secara efisien menuju tujuan tanpa mengorbankan optimalitas (Wang et al., 2022). Sementara itu, *Bidirectional Dijkstra* menjalankan pencarian dari titik awal dan tujuan secara bersamaan sehingga mampu mengurangi jumlah ekspansi simpul secara signifikan (Rahayuda & Santiari, 2021). Ketiga algoritma ini banyak digunakan karena deterministik, stabil, dan dapat dianalisis secara matematis (Milin et al., 2025; Sriyanto et al., 2024; Sunardi et al., 2025).

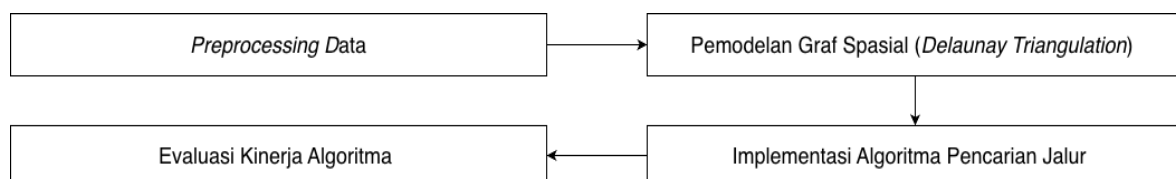
Berbagai penelitian modern telah mencoba meningkatkan efisiensi navigasi UAV dengan pendekatan yang lebih kompleks. Misalnya, *Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) (Chen et al., 2024) digunakan untuk optimasi multi-kriteria, sementara algoritma berbasis *sampling* seperti *Rapidly-exploring Random Tree* (RRT) dan *Probabilistic Road Map* (PRM) efektif pada lingkungan tak terstruktur (Sapundzhi et al., 2025). Namun, metode berbasis *sampling* memiliki kelemahan pada kondisi yang sangat dinamis karena memerlukan *re-planning* berulang yang meningkatkan beban komputasi dan waktu pemrosesan (Boroujeni et al., 2024; Meng et al., 2025). Selain itu, beberapa algoritma terbaru yang dikembangkan seperti RFA-Star dilaporkan memiliki waktu pemrosesan hingga 84–94% lebih tinggi dibandingkan A* konvensional Zhang et al. (2024). Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan modern belum sepenuhnya optimal untuk skenario kebakaran hutan yang bersifat cepat berubah.

Meskipun banyak model perencanaan jalur UAV telah dikembangkan, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada integrasi spasial, penilaian risiko kebakaran, atau simulasi berbasis grid statis. Evaluasi efisiensi algoritma pencarian jalur umumnya dilakukan pada simulasi dua dimensi atau peta statis (Ilba, 2025; Tholo et al., 2025), sehingga belum mencerminkan dinamika persebaran titik api di lapangan. Selain itu, belum terdapat penelitian yang secara komparatif menguji Dijkstra, A*, dan *Bidirectional Dijkstra* pada model graf spasial adaptif yang terbentuk berdasarkan persebaran titik api kebakaran hutan nyata. Kondisi ini menunjukkan adanya *research gap* terkait perlunya evaluasi algoritma klasik pada lingkungan spasial yang lebih realistis dan dinamis.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan membangun model graf spasial adaptif menggunakan Triangulasi Delaunay berdasarkan persebaran titik api riil, serta melakukan evaluasi komparatif terhadap kinerja tiga algoritma yaitu Dijkstra, A*, dan *Bidirectional Dijkstra*. Analisis empiris komprehensif yang dilakukan meliputi panjang lintasan, jumlah simpul yang dieksplorasi, dan waktu eksekusi. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi efisiensi algoritma pencarian jalur secara lebih realistis pada kondisi spasial dinamis, serta memberikan dasar empiris bagi penerapan sistem navigasi UAV dalam skenario kebakaran sesungguhnya. Secara teoretis, penelitian ini memperluas pemahaman empiris tentang performa algoritma pencarian jalur klasik pada graf spasial dinamis, sedangkan secara praktis, hasilnya diharapkan menjadi dasar pengembangan sistem perencanaan jalur UAV yang lebih cepat, adaptif, dan efisien untuk mitigasi kebakaran hutan berbasis data spasial riil.

METODE

Penelitian menggunakan pendekatan eksperimen berbasis simulasi kuantitatif dengan bahasa pemrograman *Python* pada *platform Google Colab*. Pustaka utama menggunakan *pandas* untuk pengolahan data, *numpy* untuk komputasi numerik, dan *scipy.spatial.Delaunay* untuk pembentukan model graf spasial. Visualisasi Triangulasi dan lintasan pencarian dilakukan menggunakan *Matplotlib* dan *Seaborn*. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, terdiri dari empat tahap utama, yaitu *preprocessing* data, pembentukan graf spasial, implementasi algoritma pencarian jalur, dan evaluasi kinerja algoritma.



Gambar 1. Tahapan proses penelitian

Data penelitian berasal dari *Forest Fire Area* dataset (Kaggle), mencakup 517 catatan kejadian kebakaran hutan di Taman Alam Montesinho, Portugal. Dari dataset tersebut, hanya koordinat geografis (X, Y) yang digunakan sebagai simpul graf karena relevansinya terhadap variasi sebaran titik api, mendukung konstruksi graf spasial yang representatif untuk navigasi UAV dalam konteks mitigasi kebakaran. *Preprocessing* mencakup visualisasi persebaran titik menggunakan *scatter plot* untuk memeriksa pola spasial, serta deduplikasi koordinat *drop_duplicates()*. Proses ini menghasilkan 36 simpul unik yang digunakan sebagai dasar pembentukan graf. Graf spasial dibangun menggunakan Triangulasi Delaunay, menghasilkan jaringan planar stabil yang memenuhi prinsip *Empty Circle Condition*. Setiap sisi diberi bobot berupa jarak Euclidean antar dua simpul, dihitung menggunakan Persamaan (1), di mana $w(u, v)$ menyatakan jarak antar *node* u dan v , sedangkan (x_u, y_u) dan (x_v, y_v) merupakan koordinat spasial kedua *node*. Bobot ini digunakan algoritma untuk menentukan biaya lintasan total.

$$w(u, v) = \sqrt{(x_u - x_v)^2 + (y_u - y_v)^2} \quad (1)$$

Pada persamaan tersebut, $w(u, v)$ merepresentasikan bobot atau jarak antara simpul u dan v . Variabel x_u, y_u serta x_v, y_v masing-masing menunjukkan koordinat spasial dua titik kebakaran. Nilai bobot ini menjadi dasar proses perhitungan total panjang jalur dan menjadi acuan dalam evaluasi jalur terpendek. Algoritma Dijkstra, A*, dan *Bidirectional Dijkstra* diimplementasikan secara *custom-coded* tanpa pustaka eksternal agar mekanisme perhitungan biaya lintasan dan ekspansi simpul dapat dikontrol serta diverifikasi secara transparan. Algoritma Dijkstra digunakan sebagai *baseline* dengan kompleksitas waktu teoretik $O(E + V \log V)$. Untuk algoritma A*, fungsi evaluasi didefinisikan pada Persamaan (2) dengan memasukkan komponen heuristik.

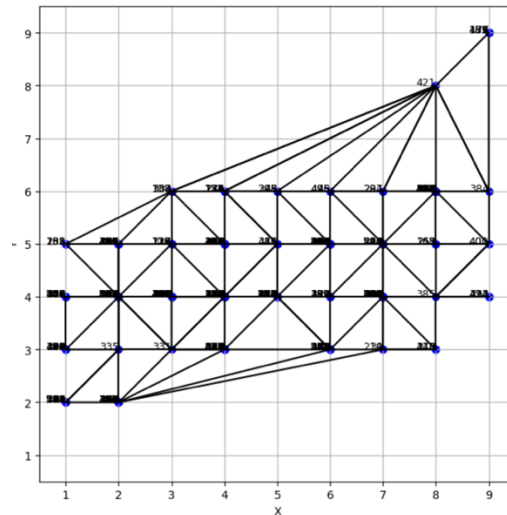
$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (2)$$

Fungsi $g(n)$ menunjukkan biaya kumulatif dari simpul awal hingga simpul n , sedangkan $h(n)$ merupakan estimasi jarak (heuristik Euclidean) menuju tujuan. Kombinasi keduanya memungkinkan A* memprioritaskan jalur paling menjanjikan dan mempercepat pencarian tanpa mengurangi optimalitas hasil. *Bidirectional Dijkstra* bekerja dengan melakukan pencarian dari arah *start* dan *goal* secara simultan, kemudian menghentikan proses saat kedua *frontier* bertemu pada suatu simpul perantara. Pendekatan dua arah ini dimanfaatkan untuk mengurangi ruang pencarian dan meningkatkan efisiensi eksplorasi, khususnya pada graf dengan struktur distribusi *node* nya relatif seimbang. Evaluasi performa meliputi waktu eksekusi (ms, diukur dengan *time.perf_counter()*), penggunaan memori puncak (MB, menggunakan *tracemalloc*), jumlah simpul yang dieksplorasi, dan panjang jalur akhir (total bobot sisi). Keempat metrik ini dipilih untuk menilai kinerja algoritma secara komprehensif antara teoritis dan praktis. Setiap eksperimen diulang 30 kali dengan ditambah 3 *pilot run* untuk mengurangi variabilitas *runtime*. Hasil dievaluasi melalui perbandingan kinerja empiris algoritma dengan ekspektasi kompleksitas waktu teoretis. Pendekatan ini memungkinkan penilaian yang lebih objektif mengenai efisiensi waktu, konsumsi memori, dan kualitas jalur optimal, khususnya dalam konteks optimasi rute UAV untuk mendukung strategi mitigasi kebakaran hutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

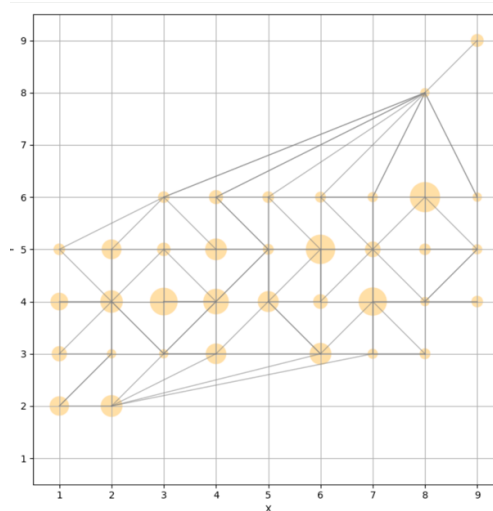
Hasil

Pemodelan graf spasial menggunakan Triangulasi Delaunay berhasil membentuk struktur graf planar yang merepresentasikan hubungan geometris antar titik kebakaran pada wilayah studi. Dari total 517 titik kebakaran mentah, *preprocessing* dilakukan untuk mengelompokkan titik-titik berdasarkan kedekatan spasial, menghasilkan 36 simpul utama yang merepresentasikan pusat kelompok persebaran *hotspot*. Struktur graf, divisualisasikan pada Gambar 2, menunjukkan keterhubungan antar simpul melalui *edge* berbobot Jarak Euclidean. Pola konektivitas memperlihatkan perbedaan yang jelas. Area dengan konsentrasi *hotspot* tinggi ditunjukkan oleh simpul yang saling terhubung rapat, membentuk jaringan triangulasi yang stabil. Jarak antar *node* di area ini lebih pendek, sehingga berpotensi menjadi jalur prioritas navigasi UAV karena efisiensi perpindahan titik observasi. Sebaliknya, simpul-simpul di area tepi menunjukkan konektivitas yang renggang dengan *edge* yang lebih panjang. Kondisi ini mengindikasikan sebaran *hotspot* yang lebih jarang dan potensi rute yang lebih panjang bila digunakan sebagai jalur navigasi.



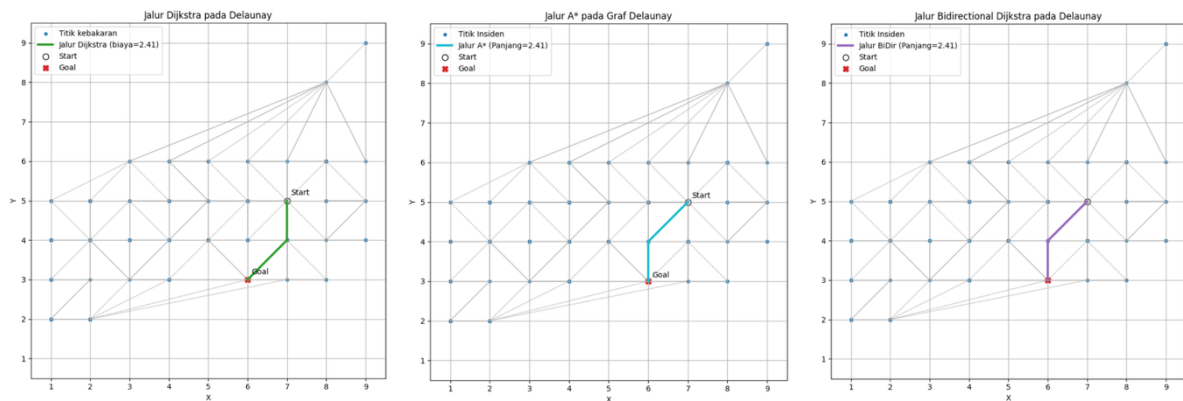
Gambar 2. Graf delaunay berbobot

Pola konektivitas yang terlihat pada graf menunjukkan adanya konsentrasi hubungan di area tengah peta, yang mengindikasikan bahwa wilayah tersebut memiliki kepadatan titik api lebih tinggi dibandingkan area lain. Fenomena ini penting karena area dengan konektivitas tinggi berpotensi menjadi rute prioritas navigasi UAV dalam konteks mitigasi kebakaran hutan. Visualisasi rinci persebaran titik setelah *preprocessing* ditampilkan pada Gambar 3, yang memperlihatkan susunan simpul dan hubungan spasialnya secara jelas.



Gambar 3. Titik kebakaran setelah *preprocessing*

Setelah graf terbentuk, hasil pencarian jalur kemudian divisualisasikan pada Gambar 4, ketiga algoritma yaitu, Dijkstra, A*, dan *Bidirectional Dijkstra* diimplementasikan pada struktur graf yang sama untuk menentukan jalur terpendek antara titik awal (*start node*) dan titik tujuan (*goal node*). Sehingga mampu menemukan lintasan optimal dengan panjang yang identik, yaitu 2,414 unit. Konsistensi nilai ini menegaskan bahwa struktur graf Delaunay memiliki representasi spasial yang baik dan tidak menghasilkan distorsi jarak yang memengaruhi optimalitas jalur. Kesamaan panjang lintasan ini mengindikasikan seluruh metode mampu menemukan rute optimal pada graf hasil Triangulasi Delaunay. Oleh karena itu, perbedaan utama tidak terletak pada hasil akhir, melainkan pada strategi eksplorasi simpul yang ditempuh oleh masing-masing algoritma.



Gambar 4. Perbandingan hasil pencarian jalur pada graf delaunay menggunakan tiga algoritma yaitu, dijkstra, a*, dan *bidirectional dijkstra*

Algoritma Dijkstra memperluas pencarian tanpa arah panduan heuristik, sehingga eksplorasi simpul cenderung lebih luas dan memiliki pola visual yang lebih menyebar. Sebaliknya, A* bergerak lebih terarah karena didukung fungsi heuristik jarak Euclidean yang bersifat *admissible* dan *consistent*. Hal ini memungkinkan A* membatasi ruang pencarian secara signifikan dan mencapai tujuan dengan ekspansi simpul yang minimal. Sementara itu, *Bidirectional Dijkstra* menunjukkan pola pergerakan dua sisi secara simultan, meskipun berpotensi mempercepat pencarian pada graf berukuran besar atau jarak *start-goal* jauh, efisiensinya belum terlihat signifikan pada graf kecil seperti kasus ini. Temuan ini memperjelas bahwa meskipun menghasilkan jalur optimal yang sama, biaya komputasi dan pola pencarian ketiga algoritma berbeda, yang berimplikasi pada pemilihan algoritma untuk skenario nyata. Pada operasi UAV *real-time* di area kebakaran, A* lebih ideal karena mampu mencapai solusi cepat dengan eksplorasi minimal. *Bidirectional Dijkstra* berpotensi digunakan pada peta besar atau *multi-target*. Sementara itu, Dijkstra tetap relevan sebagai *baseline* metode optimal, namun kurang efisien untuk lingkungan dinamis.

Tabel 1. Perbandingan kinerja algoritma pada graf delaunay

Algoritma	Average Time (ms)	Memori (MB)	Node Expanded	Cost Identical
A*	$0,08 \pm 0,01$	0,002	3	True
Dijkstra	$0,53 \pm 0,12$	0,004	15	True
Bidirectional Dijkstra	$0,63 \pm 0,01$	0,003	9	True

Setelah dilakukan, pengujian performa dilakukan sebanyak 30 iterasi dan tiga *pilot run*, dengan variasi waktu eksekusi di bawah 10%, sehingga hasil dianggap stabil. Nilai rata-rata waktu eksekusi, penggunaan memori, dan jumlah simpul yang dieksplorasi ditampilkan pada tabel 1 memperlihatkan perbandingan kinerja ketiga algoritma dalam proses pencarian jalur pada graf Delaunay. A* merupakan algoritma yang paling efisien dengan waktu eksekusi terendah ($0,08 \pm 0,01$ ms), penggunaan memori terkecil (0,002 MB), dan hanya mengekskansi 3 simpul. Hal ini menunjukkan bahwa A* mampu mengarahkan pencarian secara lebih terfokus menuju tujuan sehingga ruang eksplorasi diminimalkan sejak awal. Dijkstra memiliki waktu eksekusi terbesar ($0,53 \pm 0,12$ ms) dan jumlah ekspansi simpul tertinggi, yaitu 15 simpul. Kondisi ini muncul karena Dijkstra melakukan eksplorasi menyeluruh terhadap graf tanpa bantuan heuristik, sehingga proses pencarian menjadi lebih panjang. Sementara itu, *Bidirectional Dijkstra* berada di posisi tengah dengan waktu $0,63 \pm 0,01$ ms dan eksplorasi 9

simpul, menunjukkan bahwa pencarian dua arah membantu mengurangi eksplorasi namun belum mampu melampaui efisiensi A*.

Hasil pada tabel 1 mengindikasikan perbedaan performa ketiga algoritma terutama dipengaruhi oleh strategi perluasan node, bukan hasil jarak akhir lintasan yang semuanya identik. A* menjadi pilihan paling efektif untuk navigasi UAV karena memberikan kecepatan komputasi tertinggi dan eksplorasi node paling minimal, sementara *Bidirectional Dijkstra* dapat menjadi alternatif untuk graf berukuran besar, dan Dijkstra lebih tepat digunakan sebagai baseline acuan performa.

Secara kuantitatif, algoritma A* tercatat 85% lebih cepat dibandingkan Dijkstra dan 87% lebih cepat dibandingkan *Bidirectional Dijkstra*. Pada eksplorasi simpul, A* mengeksplorasi 80% lebih sedikit dibandingkan Dijkstra dan 67% lebih sedikit dibandingkan *Bidirectional Dijkstra*. Pada penggunaan memori, A* juga paling ringan, sekitar 50% lebih hemat dibandingkan Dijkstra dan 33% lebih hemat dibandingkan *Bidirectional Dijkstra*. Temuan ini menunjukkan bahwa perbedaan performa ketiga algoritma sepenuhnya disebabkan oleh efisiensi proses pencarian, bukan kualitas lintasan akhir. Secara keseluruhan, hasil eksperimen menegaskan bahwa A* merupakan algoritma paling efisien pada struktur graf hasil Triangulasi Delaunay, terutama untuk kebutuhan navigasi UAV yang memerlukan kecepatan dan eksplorasi minimal. *Bidirectional Dijkstra* memberikan efisiensi lebih baik daripada Dijkstra standar, namun belum dapat menyamai kestabilan dan kecepatan A*.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Triangulasi Delaunay* berhasil membentuk graf spasial planar yang merepresentasikan hubungan geometris titik kebakaran yang akurat tanpa memunculkan distorsi jarak. Dari 517 titik api awal, proses preprocessing berhasil mereduksi data menjadi 36 simpul inti yang memetakan pusat persebaran hotspot secara lebih terstruktur. Distribusi simpul pada Gambar 2 dan Gambar 3 memperlihatkan variasi densitas dengan kluster padat mengindikasikan intensitas kebakaran yang lebih tinggi dan konektivitas graf yang kuat, menjadikannya lokasi prioritas operasional bagi navigasi UAV untuk penentuan jalur optimal. Validitas struktur graf ini diperkuat oleh hasil uji pencarian jalur pada tiga algoritma yaitu Dijkstra, A*, dan *Bidirectional Dijkstra* secara konsisten menghasilkan panjang lintasan identik sebesar 2,414 unit.

Meskipun ketiga algoritma tersebut mencapai jalur optimal yang sama, perbedaan kinerja utama terlihat pada performa dalam pencarian simpul secara signifikan. A* menunjukkan kinerja paling efisien dengan waktu eksekusi $0,08 \pm 0,01$ ms, eksplorasi hanya 3 simpul, dan konsumsi memori rendah (0,002 MB). Secara kuantitatif, A* tercatat 85% lebih cepat dibandingkan Dijkstra dan 87% lebih cepat dibandingkan *Bidirectional Dijkstra*, sekaligus mengurangi eksplorasi node sebesar 80% dan 67%. Keunggulan tersebut diperoleh dari heuristik Euclidean yang bersifat *admissible* dan *consistent*, yang memungkinkan algoritma bergerak lebih terarah tanpa kehilangan optimalitas jalur. Hal ini menegaskan bahwa peningkatan efisiensi A* terletak pada kompleksitas eksplorasi ruang pencarian, sejalan dengan teori heuristik *admissible* (Amine & Mohammed, 2023).

Efisiensi Algoritma A* tersebut semakin diperkuat oleh penggunaan graf *Delaunay* yang adaptif terhadap persebaran titik api. Pendekatan ini menghasilkan struktur yang lebih realistis. Banyak penelitian sebelumnya yang menggunakan pemetaan berbasis grid cenderung menghasilkan *edge* redundan dan belum mencerminkan pola spasial *hotspot* di area kebakaran. Selain itu, kompleksitas algoritma modern tidak selalu diikuti oleh efisiensi yang lebih baik. Zhang et al. (2024) melaporkan bahwa RFA-Star memiliki waktu pemrosesan 84–94% lebih tinggi dari A*. Demikian pula, Sapundzhi et al. (2025) menunjukkan bahwa metode sampling seperti RRT dan PRM memerlukan *re-planning* berulang pada kondisi dinamis. Sebaliknya, algoritma klasik seperti Dijkstra mampu memperluas pencarian secara menyeluruh, sedangkan

Bidirectional Dijkstra belum memberikan peningkatan signifikan pada skala graf kecil studi ini.

Hasil penelitian kami berkontribusi melalui integrasi graf *Delaunay* dan evaluasi komparatif tiga algoritma *klasik* secara empiris pada skenario kondisi kebakaran yang nyata, yang merupakan ruang lingkup yang sebelumnya belum banyak dieksplorasi. Serta dapat berimplikasi pada efisiensi algoritma *A** menjadi rekomendasi utama untuk implementasi navigasi UAV yang memerlukan respons cepat. Walaupun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada ukuran graf yang relatif kecil dan belum mempertimbangkan variabel lingkungan dinamis seperti angin, elevasi. Hal ini membuka peluang studi lanjutan untuk mengembangkan graf berskala besar, di mana potensi *Bidirectional Dijkstra* dapat diuji lebih lanjut, serta memasukkan pembobotan variabel dinamis seperti angin dan elevasi.

SIMPULAN

Penelitian ini *menunjukkan* bahwa model graf spasial adaptif berbasis Triangulasi *Delaunay* berhasil menyediakan representasi yang akurat dan stabil untuk optimasi jalur UAV. Evaluasi komparatif menegaskan Algoritma *A** sebagai metode paling optimal, dengan waktu eksekusi 85–87% lebih cepat dan eksplorasi simpul 67–80% lebih sedikit dibandingkan *Dijkstra* dan *Bidirectional Dijkstra*. Temuan ini memberikan kontribusi metodologis dengan mengintegrasikan model graf adaptif *Delaunay* dan analisis empiris komparatif algoritma klasik dalam konteks mitigasi kebakaran. Implikasinya, integrasi model ini dan Algoritma *A** menawarkan solusi paling efektif untuk navigasi UAV *real-time* yang memerlukan respons cepat dan akurasi jalur tinggi. Meskipun demikian, studi ini terbatas pada graf skala kecil, sehingga penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji performa pada graf berskala besar dengan heuristik adaptif.

REFERENSI

- Alizadeh, N., Mahdianpari, M., Hemmati, E., & Marjani, M. (2025). FusionFireNet: A CNN-LSTM model for short-term wildfire hotspot prediction utilizing spatio-temporal datasets. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 37, 101436. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101436>
- Amine, O., & Mohammed, M. (2023). Generating A-Star Algorithm Admissible Heuristics Using a Dynamic Dataloader on Neural Networks, Enhanced With Genetic Algorithms, on a Distributed Architecture. *IEEE Access*, 11, 18356–18373. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3247773>
- Boroujeni, S. P. H., Razi, A., Khoshdel, S., Afghah, F., Coen, J. L., O'Neill, L., Fule, P., Watts, A., Kokolakis, N. M. T., & Vamvoudakis, K. G. (2024). A comprehensive survey of research toward AI-enabled unmanned aerial systems in pre-, active-, and post-wildfire management. *Information Fusion*, 108, 102369. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102369>
- Carta, F., Zidda, C., Putzu, M., Loru, D., Anedda, M., & Giusto, D. (2023). Advancements in forest fire prevention: A comprehensive survey. *Sensors*, 23(14), 6635. <https://doi.org/10.3390/s23146635>
- Chen, X., Fang, J., & Zhai, Y. (2024). UAV path planning method considering safety and signal shielding risk. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(6), 415–424. <http://www.ijacsa.thesai.org>
- Ferreira, C., Pinto, L. C., & Valente, M. (2024). Forest fire causes and prevention strategies in Portugal: Insights from stakeholder focus groups. *Forest Policy and Economics*, 169, 103330. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103330>

- Ilba, M. (2025). Spatial network in SQL databases for real-time multimodal emergency routing in wildland fires. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(3), 110. <https://doi.org/10.3390/ijgi14030110>
- Liu, H., Li, X., Fan, M., Wu, G., Pedrycz, W., & Suganthan, P. N. (2022). An autonomous path planning method for UAV based on tangent intersection and target guidance strategy. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23, 3061–3073. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3030444>
- Meng, W., Zhang, X., Zhou, L., Guo, H., & Hu, X. (2025). Advances in UAV path planning: A comprehensive review of methods, challenges, and future directions. *Drones*, 9(5), 376. <https://doi.org/10.3390/drones9050376>
- Milin, V., Stanivuk, T., Skoko, I., & Bulić, T. (2025). Dijkstra and A* algorithms for algorithmic optimization of maritime routes and logistics of offshore wind farms. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(10), 1863. <https://doi.org/10.3390/jmse13101863>
- Mohapatra, A., & Trinh, T. (2022). Early wildfire detection technologies in practice A review. *Sustainability*, 14(19), 12270. <https://doi.org/10.3390/su141912270>
- Oliveras Menor, I., Prat-Guitart, N., Spadoni, G. L., Hsu, A., Fernandes, P. M., et al. (2025). Integrated fire management as an adaptation and mitigation strategy to altered fire regimes. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 271. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02165-9>
- O'Mara, T., Meador, A. S., Colavito, M., Waltz, A., & Barton, E. (2024). Navigating the evolving landscape of wildfire management: A systematic review of decision support tools. *Trees, Forests and People*, 16, 100575. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100575>
- Pinandito, A., Kharisma, A. P., Akbar, M. A., & Saputra, M. C. (2024). Peningkatan performa komputasi sistem navigasi transportasi publik melalui kompresi data dan penyederhanaan graf. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 11(6), 1185–1196. <https://doi.org/10.25126/jtiik.2024118054>
- Potapov, P., Tyukavina, A., Turubanova, S., Hansen, M. C., Giglio, L., et al. (2025). Unprecedentedly high global forest disturbance due to fire in 2023–2024. *PNAS*, 122(30), e2505418122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2505418122>
- Rahayuda, I. G. S., & Santiari, N. P. L. (2021). Dijkstra and bidirectional Dijkstra on determining evacuation routes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1803(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1803/1/012018>
- Sriyanto, N. I., Maulana, F. A., Aprilian, R., Christian, E., & Pranatawijaya, V. H. (2024). Utilisation of A* algorithm in determining tourism routes in Palangka Raya City. *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, 12(1), 23–37. <https://doi.org/10.34010/telekontran.v12i1.12645>
- Sunardi, S., Azwar, M., Sofian, M. Z. D., Samsudin, A. R., & Rahman, F. (2025). Implementasi algoritma Dijkstra dan Bellman-Ford untuk optimasi rute pemadam kebakaran di Kota Praya. *JTIM: Jurnal Teknologi Informasi dan Multimedia*, 7(2), 398–407. <https://doi.org/10.35746/jtim.v7i2.744>
- Tholo, H. M., Kadewa, W., Chisenga, C., Gondwe, S., Zuza, E., et al. (2025). Web-based spatial decision support system for optimum route to forest fires: A case of Viphya plantations. *Trees, Forests and People*, 19, 100740. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100740>
- Thomaz, E. L., & Pereira, P. (2021). Fire prevention, management and challenges. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 23, 100301. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100301>

- Wang, R., Lu, Z., Jin, Y., & Liang, C. (2022). Application of A* algorithm in intelligent vehicle path planning. *Mathematical Models in Engineering*, 8(3), 82–90. <https://doi.org/10.21595/mme.2022.22828>
- Wayahdi, M. R., Ginting, S. H. N., & Syahputra, D. (2021). Greedy, A-Star, and Dijkstra's algorithms in finding shortest path. *International Journal of Advances in Data and Information Systems*, 2(1), 45–52. <https://doi.org/10.25008/ijadis.v2i1.1206>
- Xu, Y., Li, J., & Zhang, F. (2022). A UAV-based forest fire patrol path planning strategy. *Forests*, 13(11), 1912. <https://doi.org/10.3390/f13111952>
- Zhang, W., Li, J., Yu, W., Ding, P., Wang, J., & Zhang, X. (2024). Algorithm for UAV path planning in high obstacle density environments: RFA-star. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1391628. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1391628>
- Zhou, K., & Zhang, F. (2023). An event-response tree-based resource scheduling method for wildfire fighting. *Forests*, 14(1), 102. <https://doi.org/10.3390/f14010102>