

## Studi Performansi Algoritma Perencanaan Jalur Berbasis *Informed Rapidly-exploring Random Tree Star*

### *Performance Study of Informed Rapidly-exploring Random Tree Star-based Path Planning Algorithms*

Tri Rahajoeningroem<sup>1\*</sup>, Dwi Anie Gunastuti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitas Komputer Indonesia, <sup>2</sup>Universitas Pamulang

Email\* : tri.rahajoeningroem@email.unikom.ac.id

**Abstrak** - Perencanaan jalur merupakan aspek penting dalam robotika, memungkinkan robot untuk mencapai tujuannya dengan aman dan efisien. Algoritma *Informed Rapidly-exploring Random Tree Star* (*Informed RRT\**) telah menjadi salah satu metode perencanaan jalur yang populer karena efisiensinya dan kemampuannya menangani ruang kerja yang kompleks. Sejak diperkenalkan pada tahun 2014, berbagai varian *Informed RRT* telah dikembangkan untuk meningkatkan performanya. Namun, belum ada studi komprehensif yang membandingkan kinerja varian-varian ini. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi perbandingan kinerja beberapa varian *Informed RRT* dalam menyelesaikan masalah perencanaan jalur. Algoritma yang dibandingkan adalah APF-IRRT, BI-RRT, *Informed RRT\** + DWA, *Informed RRT\**-Connect, *Informed RRT\**-PSO, MI-RRT-Connect, dan *Informed RRT\** dengan prosedur wrapping. Kinerja algoritma dievaluasi berdasarkan metrik waktu komputasi dan panjang jalur. Eksperimen dilakukan pada berbagai skenario perencanaan jalur dengan kompleksitas yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa varian *Informed RRT* tertentu menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan yang lain dalam metrik yang berbeda. APF-IRRT dan *Informed RRT\*-Connect\** umumnya memiliki waktu komputasi yang lebih cepat, *Informed RRT\*-PSO\** dan *Informed RRT* dengan prosedur wrapping menghasilkan jalur yang lebih halus. Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang kekuatan dan kelemahan varian *Informed RRT*, sehingga memungkinkan pemilihan algoritma yang tepat untuk aplikasi perencanaan jalur yang spesifik.

**Kata kunci** : *Informed RRT\**, Algoritma perencanaan jalur, robotika, varian algoritma, perbandingan kinerja.

**Abstract** - Path planning is an important aspect in robotics, allowing a robot to reach its destination safely and efficiently. The *Informed Rapidly-exploring Random Tree Star* (*Informed RRT\**) algorithm has become one of the popular path planning methods due to its efficiency and ability to handle complex workspaces. Since its introduction in 2014, various variants of *Informed RRT* have been developed to improve its performance. However, there has been no comprehensive study comparing the performance of these variants. This research aims to conduct a comparative study of the performance of several *Informed RRT* variants in solving path planning problems. The algorithms compared are APF-IRRT, BI-RRT, *Informed RRT\** + DWA, *Informed RRT\*-Connect*, *Informed RRT\*-PSO*, MI-RRT-Connect, and *Informed RRT\** with wrapping\*\* procedure. Algorithm performance is evaluated based on computation time and path length metrics. Experiments were conducted on various path planning scenarios with different complexities. The results show that certain *Informed RRT* variants perform better than others in different metrics. APF-IRRT and *Informed RRT\*-Connect\** generally have faster computation time, *Informed RRT\*-PSO\** and *Informed RRT* with wrapping procedure produce smoother paths. This research provides a better understanding of the strengths and weaknesses of *Informed RRT* variants, enabling the selection of appropriate algorithms for specific path planning applications.

**Keywords** : *Informed RRT\**, Path planning algorithm, robotics, algorithm variants, performance comparison.

## I. PENDAHULUAN

Algoritma perencanaan jalur memegang peranan krusial dalam domain robotika dengan memberikan kerangka kerja untuk penentuan jalur yang aman dan efisien bagi robot mencapai tujuannya [1,2]. Proses ini melibatkan pertimbangan berbagai faktor, seperti kinematika robot yang berkaitan dengan kemampuan fisiknya untuk bergerak dan bermanuver, kondisi lingkungan sekitar yang mencakup posisi dan konfigurasi objek-objek serta adanya hambatan atau area yang dapat dilewati dengan aman, serta tujuan akhir yang ingin dicapai oleh robot. Algoritma perencanaan jalur yang efektif memungkinkan robot untuk mencapai tujuan mereka tanpa tabrakan dengan objek di sekitarnya, sambil mengoptimalkan penggunaan waktu dan energi, bahkan dalam lingkungan yang penuh kompleksitas [3-5].

Algoritma perencanaan jalur diperlukan di berbagai bidang, seperti robotika [6-9], kendaraan otonom [10-18], industri permainan video [19, 20], dan simulasi [21,22]. Di dalam robotika, algoritma ini menjadi tulang punggung pengendalian robot manipulator, mobile, dan jenis lainnya. Di ranah kendaraan otonom, algoritma perencanaan jalur penting untuk merencanakan rute kendaraan seperti mobil self-driving dan drone. Dalam industri permainan video, algoritma ini mendukung pembuatan karakter non-pemain (NPC) yang memiliki perilaku cerdas dan realistis. Sedangkan dalam konteks industri, algoritma perencanaan jalur digunakan untuk mengatur pergerakan robot industri yang melakukan tugas-tugas seperti pengelasan dan perakitan. Tak ketinggalan, di dunia simulasi, algoritma ini membantu dalam mensimulasikan pergerakan objek di lingkungan virtual.

Salah satu algoritma perencanaan jalur yang populer adalah Rapidly-exploring Random Tree Star (RRT\*) [23,24]. Konsep dasar dari RRT\* melibatkan pembangunan pohon acak yang secara iteratif menghubungkan titik awal dengan titik tujuan. Proses ini dilakukan dengan menambahkan node baru secara acak dan menghubungkannya dengan node terdekat di dalam pohon [25]. Keunggulan utama dari RRT\* adalah efisiensinya dalam menangani ruang kerja yang kompleks. Para peneliti telah mengusulkan berbagai cara untuk meningkatkan performansi dari algoritma RRT\*, diantaranya adalah dengan melakukan hibridisasi [26-29] atau peningkatan strategi sampling [30,

31].

Informed RRT\* [32] merupakan evolusi dari konsep dasar RRT\*. Algoritma ini memanfaatkan informasi heuristik untuk membimbing pembangunan pohon acak. Dengan menggunakan heuristik ini, algoritma dapat lebih fokus pada area yang berdekatan dengan tujuan, sehingga menghasilkan jalur yang lebih optimal dan efisien. Sejak diperkenalkan pada tahun 2014, berbagai varian dari algoritma Informed RRT telah dikembangkan untuk meningkatkan kinerjanya. Meskipun demikian, hingga saat ini belum ada studi komprehensif yang membandingkan kinerja berbagai varian ini. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan melakukan perbandingan kinerja beberapa varian Informed RRT dalam menyelesaikan masalah perencanaan jalur. Harapannya, penelitian ini dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai kelebihan dan kekurangan dari masing-masing varian Informed RRT, sehingga dapat membantu pemilihan algoritma yang tepat untuk aplikasi perencanaan jalur yang spesifik.

Sejumlah penelitian telah mengeksplorasi berbagai aspek dari algoritma perencanaan jalur. Elbanhawi dan Simic [33] melakukan tinjauan literatur komprehensif tentang algoritma perencanaan jalur berbasis sampling untuk perencanaan gerak robot. Artikel ini menguraikan berbagai perencana berbasis sampling dan aplikasinya, menyoroti arah penelitian kontemporer dalam bidang ini. Mereka mengkategorikan perencana berdasarkan primitif yang berbeda dan mengulas berbagai parameter yang digunakan. Meskipun artikel ini menyajikan analisis yang mendalam, kekurangan utamanya adalah kurangnya analisis komparatif strategi peningkatan performa dan evaluasi aplikasi di dunia nyata. Artikel ini tidak memberikan studi komparatif mendalam tentang strategi peningkatan performa seperti teknik sampling adaptif dan seleksi metrik. Claussmann dkk. [34] melakukan tinjauan literatur tentang algoritma perencanaan gerak khusus untuk skenario jalan raya pada kendaraan otonom. Artikel ini mengkategorikan algoritma berdasarkan keluaran, properti ruang-waktu, dan domain matematika. Penulis juga membahas validasi dan evaluasi algoritma perencanaan gerak serta isu-isu etika dalam pengambilan keputusan otonom. Meskipun artikel ini memberikan gambaran yang komprehensif, kekurangan utamanya adalah kurangnya analisis

komparatif yang mendalam tentang performa RRT dengan algoritma perencanaan jalur lainnya serta implementasi di dunia nyata dalam skenario yang dinamis. González dkk. [35] meninjau literatur algoritma perencanaan jalur untuk kendaraan otomatis, mengkategorikan teknik-teknik perencanaan menjadi empat algoritma utama: pencarian graf, sampling, interpolasi, dan optimasi numerik. Artikel ini mengulas implementasi teknik perencanaan gerak oleh kelompok penelitian di seluruh dunia serta tantangan dalam skenario perkotaan. Kekurangan utama dari artikel ini adalah kurangnya analisis komparatif mendalam tentang performa algoritma RRT\* dengan algoritma lain, serta tantangan implementasi di dunia nyata dalam menghadapi ketidakpastian persepsi dan kendala kontrol.

Salah dkk. [36] meninjau literatur terbaru tentang algoritma optimasi berbasis populasi terinspirasi dari alam (BPO) yang diterapkan pada perencanaan jalur robot mobil. Artikel ini menyajikan analisis komprehensif tentang penerapan metode BPO dan melakukan metodologi eksperimental untuk membandingkan berbagai metode BPO. Meskipun artikel ini menyajikan analisis yang mendalam, kekurangan utamanya adalah kurangnya analisis komparatif dengan algoritma perencanaan jalur lain seperti RRT, serta kurangnya pembahasan tentang aplikasi dunia nyata dan tantangan yang dihadapi dalam implementasi praktis. Teng dkk. [37] melakukan tinjauan literatur tentang algoritma perencanaan gerak untuk mengemudi otonom, mencakup metode perencanaan pipeline dan end-to-end. Artikel ini membandingkan kelebihan dan kekurangan kedua metode tersebut dan membahas tantangan serta perspektif masa depan dalam mengemudi otonom. Kekurangan utama dari artikel ini adalah kurangnya analisis komparatif mendalam tentang performa algoritma perencanaan jalur yang berbeda termasuk RRT, serta kurangnya pembahasan tentang implementasi dunia nyata dan metrik performa yang digunakan untuk evaluasi efektivitas algoritma. Noreen dkk. [38] meninjau literatur tentang pendekatan perencanaan jalur optimal menggunakan RRT\*, mengkategorikan dan mengulas pendekatan terbaru berdasarkan algoritma RRT\*. Artikel ini menyoroti tantangan terkait perencanaan jalur optimal dan berbagai strategi peningkatan performa. Meskipun artikel ini komprehensif, kekurangan utamanya adalah kurangnya analisis

komparatif tentang strategi peningkatan performa RRT\* dengan algoritma lain, serta kurangnya pembahasan tentang aplikasi praktis dan optimasi teknik yang digunakan. Zafar dan Mohanta [39] melakukan tinjauan literatur tentang algoritma perencanaan jalur untuk robot mobil dalam lingkungan statis dan dinamis. Artikel ini mengkategorikan strategi perencanaan jalur menjadi metode klasik dan heuristik, serta membahas kelebihan dan kekurangannya. Kekurangan utama dari artikel ini adalah kurangnya studi komparatif mendalam tentang performa RRT dengan algoritma perencanaan jalur lainnya, serta evaluasi strategi peningkatan performa RRT dalam lingkungan dinamis dan aplikasinya di dunia nyata.

Luo dkk. [40] melakukan tinjauan literatur tentang algoritma perencanaan jalur untuk robot industri, dengan fokus khusus pada algoritma RRT. Artikel ini membahas perkembangan dan berbagai strategi peningkatan RRT, serta membagi algoritma RRT menjadi empat langkah: sampling, pengukuran koneksi, deteksi tabrakan, dan pencarian jalur. Meskipun artikel ini memberikan analisis yang komprehensif, kekurangan utamanya adalah kurangnya analisis komparatif mendalam tentang strategi peningkatan performa, serta kurangnya pembahasan tentang implementasi dunia nyata dan penanganan hambatan dinamis. Smith dan Johnson [41] mengulas algoritma perencanaan jalur dan penghindaran tabrakan untuk robot mobile otonom (AMR) dengan melakukan simulasi dan komputasi matematika menggunakan MATLAB 2018a. Studi ini mencakup berbagai algoritma seperti Probabilistic Roadmap (PRM), Artificial Potential Field (APF), Rapidly Exploring Random Trees (RRT), dan lainnya, serta membahas implementasi, hasil simulasi, dan peran sensor dalam pengumpulan data waktu nyata. Kesimpulan dari studi ini adalah bahwa setiap algoritma memiliki efisiensi yang bervariasi dalam hal waktu, ruang, dan upaya yang diperlukan, serta menyoroti tantangan dalam perencanaan jalur dan penghindaran tabrakan. Namun, studi ini tidak secara mendalam membahas varian terbaru dari algoritma RRT, pendekatan hybrid, lingkungan dinamis, teknik optimasi, dan akselerasi perangkat keras. Juga, tidak ada analisis teoretis yang mendalam atau benchmarking standar terhadap algoritma lain. Studi ini juga kurang membahas aplikasi dunia nyata dan integrasi sensor.

Brown dan Miller [42] membandingkan metode perencanaan jalur klasik dan meta-heuristik untuk navigasi robot mobile, seperti Potential Field (PF), Dijkstra's Algorithm (DA), Rapidly-explore Random Tree (RRT), dan Probabilistic Road Map (PRM), serta algoritma meta-heuristik seperti Genetic Algorithm (GA) dan Particle Swarm Optimization (PSO). Studi ini menyoroti kelebihan dan kekurangan masing-masing metode, terutama dalam menangani lingkungan yang tidak diketahui atau dinamis. Namun, artikel ini tidak membahas varian RRT secara mendalam, adaptasi RRT dalam lingkungan dinamis, atau teknik optimasi dan benchmarking. Selain itu, tidak ada penjelasan mendetail tentang aplikasi dunia nyata atau integrasi sensor yang dapat meningkatkan kinerja perencanaan jalur. Garcia dan Lee [43] mengulas algoritma perencanaan jalur global dan lokal untuk robot mobile, termasuk metode optimasi seperti genetic algorithm (GA), particle swarm optimization (PSO), dan ant colony optimization (ACO). Artikel ini juga membahas arah penelitian masa depan seperti integrasi informasi multi-sensor dan perencanaan jalur di lingkungan dimensi tinggi. Namun, artikel ini kurang membahas strategi peningkatan kinerja untuk RRT, keterbatasan algoritma yang ada, integrasi multi-sensor yang efektif, dan perencanaan jalur di lingkungan kompleks. Chen dan Wang [44] mengklasifikasikan algoritma perencanaan jalur menjadi empat kategori utama dan memberikan analisis mendetail mengenai metode yang digunakan. Studi ini juga membahas pentingnya pemodelan lingkungan dan mobilitas robot. Namun, artikel ini tidak membahas analisis komparatif strategi peningkatan kinerja RRT, aplikasi dunia nyata, pendekatan terbaru, metrik evaluasi, atau tantangan implementasi praktis.

Patel dan Gupta [45] membahas metode pemodelan lingkungan dan sensor yang digunakan dalam deteksi lingkungan, serta mengklasifikasikan algoritma perencanaan jalur menjadi tiga kategori utama. Artikel ini juga memberikan analisis statistik dan prospek perkembangan teknologi perencanaan jalur. Namun, artikel ini kurang menekankan pada eksperimen dunia nyata, analisis komparatif dengan algoritma lain, metrik kinerja spesifik, dan perencanaan jalur waktu nyata. Nguyen dan Kim [46] memberikan tinjauan menyeluruh tentang algoritma perencanaan jalur, mengklasifikasikannya menjadi tiga kategori

utama, dan menyoroti pentingnya perencanaan waktu nyata di lingkungan dinamis. Namun, artikel ini tidak membahas metrik kinerja spesifik, strategi untuk lingkungan dinamis, modifikasi algoritma RRT secara mendalam, atau analisis komparatif. Wilson dan Clark [47] mengulas strategi perencanaan jalur konvensional, terinspirasi dari alam, dan hibrida, serta membahas kekuatan dan tantangan masing-masing metode. Namun, artikel ini tidak membahas perbandingan kinerja mendalam, implementasi dunia nyata, strategi untuk lingkungan dinamis, atau keterbatasan praktis dari algoritma RRT.

Abdulsahab dan Kadhim [48] melakukan tinjauan literatur komprehensif tentang teknik perencanaan jalur robot yang meliputi pendekatan klasik dan heuristik. Mereka menyoroti keunggulan pendekatan heuristik dalam menangani ketidakpastian lingkungan dan navigasi waktu nyata, serta potensi integrasi algoritma heuristik dengan algoritma klasik untuk meningkatkan kinerja, terutama dalam skenario multi-objektif. Namun, penelitian ini kurang mendalam dalam analisis komparatif kinerja berbagai algoritma perencanaan jalur, metrik spesifik untuk evaluasi, dan aplikasi nyata serta studi kasus dari algoritma RRT. Yang dkk. [49] melakukan tinjauan literatur mendalam tentang algoritma perencanaan jalur robot, mencakup evaluasi dan metodologi perencanaan jalur terbaru. Artikel ini membahas perbedaan SAPF dan MAPF, serta metodologi AI dan konvensional. Meskipun demikian, artikel ini tidak secara mendalam membahas varian RRT dan metrik evaluasi spesifik untuk RRT. Sun dkk. [50] melakukan tinjauan sistematis tentang penggunaan deep reinforcement learning (DRL) dalam perencanaan jalur robot. Mereka mengategorikan metode DRL dan mengidentifikasi tantangan dalam aplikasi DRL, seperti kebutuhan sampel pelatihan yang besar dan kesulitan transfer kebijakan yang dipelajari ke skenario dunia nyata. Namun, artikel ini tidak membahas secara rinci varian RRT yang lebih maju dan hibridisasi RRT dengan teknik lain.

Garrido dan Resende [51] mengklasifikasikan dan meninjau algoritma perencanaan jalur dalam konteks pengemudian otomatis. Mereka membahas algoritma exact dan approximate serta pendekatan hibrida. Namun, penelitian ini kurang mendalam dalam membahas teknik sampling canggih untuk RRT dan optimasi kinerja RRT untuk aplikasi waktu nyata.

Rumlaklak dkk. [52] membandingkan performa algoritma PRM, RRT, RRT\*, dan Informed-RRT\* melalui eksperimen simulasi pada beberapa kasus benchmark. Hasilnya menunjukkan bahwa RRT memiliki waktu komputasi tercepat namun kualitas jalur yang kurang optimal. PRM memiliki waktu komputasi tertinggi namun kualitas jalur yang baik. Kekurangan penelitian ini adalah tidak menyertakan analisis komparatif mendalam dan aplikasi nyata dari algoritma-algoritma tersebut. Rahajoeningroem dan Ferida [53] menganalisis performa metode sampling goal biasing dan gaussian pada algoritma RRT\*. Hasil menunjukkan bahwa metode goal biasing lebih cepat mencapai goal namun kurang optimal dalam biaya jarak. Metode gaussian lebih optimal dalam jarak namun membutuhkan lebih banyak node. Penelitian ini kurang dalam pengembangan metode sampling yang lebih baik dari goal biasing dan gaussian.

Sopa dkk. [54] merancang metode sampling integrasi dengan menggabungkan goal biasing, Gaussian, dan Boundary pada algoritma RRT\*. Hasil pengujian menunjukkan metode integrasi menghasilkan jalur yang lebih pendek dan waktu komputasi lebih cepat dibandingkan metode Gaussian dan Boundary. Namun, penelitian ini kurang dalam eksplorasi optimasi metode sampling untuk skenario dunia nyata dan aplikasi luas dari metode integrasi ini. Aditiya dan Herdiana [55] membandingkan membandingkan antara algoritma Breadth First Search (BFS) dan algoritma A\* dalam melakukan path planning pada lima lingkungan pengujian yang berbeda. Meskipun demikian, penelitian ini tidak mendalam dalam mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi perbedaan performa antara kedua algoritma.

Dari tinjauan literatur tersebut, dapat disimpulkan bahwa perbandingan kinerja varian Informed RRT\* dengan varian-varian lainnya belum mendapat perhatian yang memadai dalam penelitian sebelumnya. Selain itu, integrasi Informed RRT\* dengan teknik-teknik kecerdasan buatan atau strategi peningkatan kinerja lainnya masih perlu diteliti lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan yang ada dalam literatur dengan melakukan studi perbandingan kinerja beberapa varian Informed RRT\*, yaitu APF-IRRT [56], BI-RRT [57], Informed RRT\* + DWA [58], Informed RRT\*-Connect [59], Informed RRT\*-PSO [26], MI-RRT-Connect [60], dan Informed RRT\* dengan

prosedur wrapping [61]. Penelitian ini akan mengevaluasi kinerja algoritma-algoritma tersebut berdasarkan metrik waktu komputasi dan panjang jalur dalam berbagai skenario perencanaan jalur dengan kompleksitas yang berbeda.

## II. METODOLOGI

Metodologi penelitian ini berfokus pada evaluasi komparatif performansi beberapa varian algoritma Informed RRT\* dalam konteks perencanaan jalur. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengukur dan membandingkan kinerja setiap varian berdasarkan metrik waktu komputasi dan panjang jalur pada berbagai skenario perencanaan jalur dengan tingkat kompleksitas yang berbeda.

Penelitian ini melibatkan tujuh varian algoritma Informed RRT\*, yaitu APF-IRRT [56], BI-RRT [57], Informed RRT\* + DWA [58], Informed RRT\*-Connect [59], Informed RRT\*-PSO [26], MI-RRT-Connect [60], dan Informed RRT\* dengan prosedur wrapping [61]. Eksperimen dilakukan pada berbagai skenario perencanaan jalur yang memiliki tingkat kompleksitas berbeda. Setiap skenario dirancang untuk mengevaluasi kemampuan algoritma dalam menangani berbagai kondisi lingkungan, yaitu lingkungan labirin, lingkungan dengan hambatan statis acak sederhana, dan lingkungan dengan hambatan acak medium dan lingkungan dengan hambatan acak kompleks.

Penelitian ini mencakup empat lingkungan percobaan, yaitu lingkungan labirin, lingkungan dengan 50 hambatan, lingkungan dengan 100 hambatan, dan lingkungan dengan 200 hambatan. Pada setiap lingkungan percobaan tersebut, dilakukan lima konfigurasi di mana posisi start dan tujuan diubah secara acak, sehingga ada lima konfigurasi berisi posisi start dan tujuan yang berbeda. Pada setiap konfigurasi dilakukan 30 kali percobaan untuk membandingkan keenam algoritma yang diujikan.

Kinerja algoritma dievaluasi menggunakan dua metrik utama: waktu komputasi, yaitu waktu yang dibutuhkan oleh algoritma untuk menemukan jalur dari titik awal ke titik tujuan, dan panjang jalur, yaitu panjang total jalur yang dihasilkan oleh algoritma dari titik awal ke titik tujuan. Setiap varian algoritma diimplementasikan dalam bahasa pemrograman LabVIEW menggunakan pustaka perencanaan jalur [9]. Parameter dan konfigurasi algoritma diatur sesuai dengan nilai yang direkomendasikan dalam literatur atau hasil tuning eksperimen pendahuluan.

Untuk setiap skenario perencanaan jalur, eksperimen dilakukan sebanyak 30 kali untuk setiap varian algoritma guna mendapatkan hasil yang representatif. Parameter lingkungan dan titik awal serta tujuan diatur secara acak tetapi dikontrol untuk memastikan konsistensi dan kesetaraan dalam perbandingan. Data yang dikumpulkan dari setiap eksperimen meliputi waktu komputasi dan panjang jalur yang dihasilkan. Data dikumpulkan dan dicatat secara otomatis menggunakan skrip yang telah diprogram.

Data hasil eksperimen dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk mendapatkan rata-rata, median, dan standar deviasi dari waktu komputasi dan panjang jalur untuk setiap varian algoritma pada setiap skenario. Uji statistik dilakukan untuk menguji perbedaan signifikan antara performansi varian algoritma.

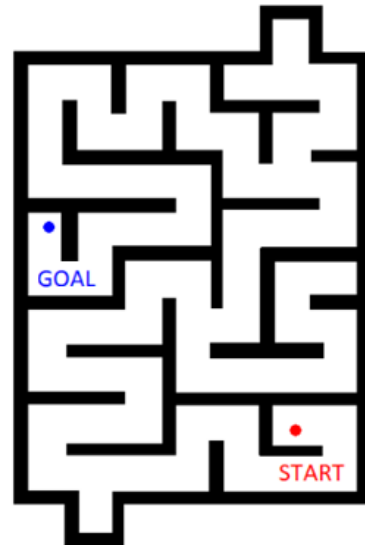
Bab ini telah menguraikan metodologi penelitian yang digunakan dalam studi ini, mulai dari algoritma yang digunakan, skenario eksperimen, metrik evaluasi, prosedur eksperimen, hingga analisis data. Metodologi yang terstruktur ini diharapkan dapat memberikan hasil yang akurat dan dapat diandalkan dalam mengevaluasi performansi varian algoritma Informed RRT\* dalam perencanaan jalur.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

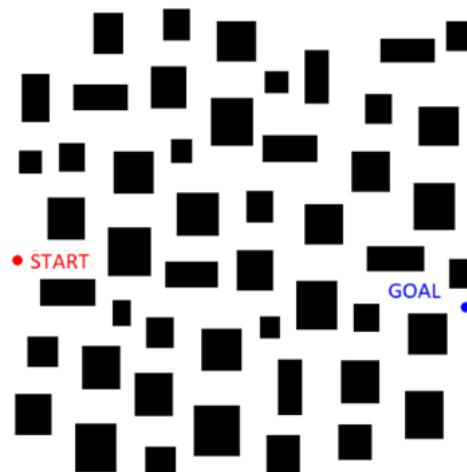
Bab ini membahas hasil dari eksperimen simulasi yang telah dilakukan untuk mengevaluasi performansi tujuh varian algoritma Informed RRT\* dalam perencanaan jalur. Analisis dilakukan berdasarkan dua metrik utama: waktu komputasi dan panjang jalur yang dihasilkan. Setiap algoritma diuji dalam berbagai skenario dengan tingkat kompleksitas yang berbeda untuk memastikan hasil yang komprehensif dan representatif.

Untuk skenario navigasi yang kompleks, kami menggunakan kasus yang diusulkan oleh Nasir dkk. [62]. Lingkungan kompleks yang digunakan meliputi labirin dan lingkungan dengan hambatan statik acak padat dengan kepadatan hambatan yang semakin meningkat. **Gambar 1 - 4** menampilkan contoh dari salah satu pasangan awal-tujuan atau salah satu konfigurasi yang diterapkan pada labirin dan lingkungan dengan hambatan statik acak dengan kepadatan hambatan yang meningkat. Hasilnya kemudian dirangkum dalam **Tabel I-VIII**. Pengukuran performansi pada **Tabel I-IV** adalah waktu komputasi terbaik, waktu komputasi terburuk, waktu komputasi rata-rata, dan deviasi standar. Adapun pengukuran performansi pada **Tabel V-III** adalah panjang jalur terbaik, panjang

jalur terburuk, panjang jalur rata-rata, serta deviasi standar dari panjang jalur.

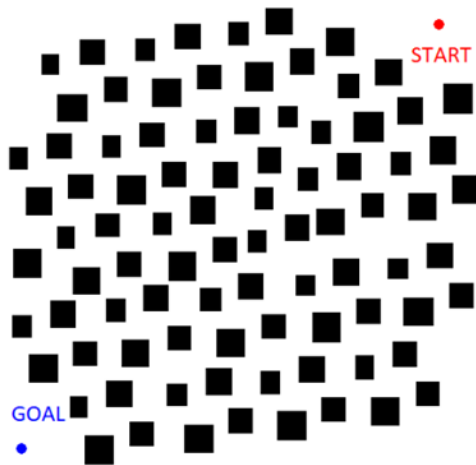


**Gambar 1.** Contoh salah satu pasangan awal-tujuan yang diterapkan pada lingkungan labirin.



**Gambar 2.** Contoh salah satu pasangan awal-tujuan yang diterapkan pada lingkungan dengan 50 hambatan (lingkungan dengan hambatan statik sederhana).

Dalam pengukuran waktu komputasi, APF-IRRT dan Informed RRT\*-Connect umumnya menunjukkan performansi terbaik di sebagian besar skenario. Hasil simulasi menunjukkan APF-IRRT memiliki waktu komputasi yang lebih cepat pada lingkungan hambatan statis acak sederhana. Informed RRT\*-Connect juga menunjukkan performa yang baik, terutama pada lingkungan dengan hambatan acak tingkat medium dan kompleks. Rata-rata waktu komputasi untuk setiap algoritma dalam berbagai skenario dirangkum dalam **Tabel I-IV**.



Gambar 3. Contoh salah satu pasangan awal-tujuan yang diterapkan pada lingkungan dengan 100 hambatan (lingkungan dengan hambatan statik medium).



Gambar 4. Contoh salah satu pasangan awal-tujuan yang diterapkan pada lingkungan dengan 200 hambatan (lingkungan dengan hambatan statik kompleks)..

Untuk metrik panjang jalur, Informed RRT\*-PSO dan Informed RRT\* dengan prosedur wrapping menghasilkan jalur yang lebih halus dan efisien. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa panjang jalur yang dihasilkan oleh Informed RRT\*-PSO cenderung lebih pendek dan lebih halus dibandingkan dengan algoritma lainnya dalam semua skenario. Informed RRT\* dengan prosedur wrapping juga menunjukkan hasil yang baik, terutama pada lingkungan dengan hambatan acak medium dan kompleks. Rata-rata panjang jalur untuk setiap algoritma dalam berbagai skenario dirangkum dalam **Tabel V-VIII**.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak ada satu varian algoritma yang unggul dalam semua metrik dan skenario. APF-IRRT dan Informed RRT\*-Connect menunjukkan keunggulan dalam hal waktu komputasi, yang menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi yang membutuhkan respon cepat. Di sisi lain, Informed RRT\*-PSO dan Informed RRT\* dengan prosedur wrapping

menghasilkan jalur yang lebih halus, yang penting untuk aplikasi yang membutuhkan jalur yang lebih optimal dan halus. Keberagaman dalam performansi ini menunjukkan bahwa pemilihan algoritma yang tepat harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dari aplikasi perencanaan jalur yang dihadapi.

Penelitian ini memberikan wawasan penting tentang kekuatan dan kelemahan masing-masing varian Informed RRT\*. Hasil ini dapat membantu praktisi dan peneliti dalam memilih algoritma yang paling sesuai untuk kebutuhan spesifik mereka. Sebagai contoh, untuk aplikasi yang memerlukan waktu komputasi minimal, APF-IRRT dan Informed RRT\*-Connect dapat menjadi pilihan yang tepat. Sementara itu, untuk aplikasi yang memerlukan jalur yang lebih halus, Informed RRT\*-PSO dan Informed RRT\* dengan prosedur wrapping lebih disarankan.

Meskipun penelitian ini telah memberikan hasil yang signifikan, terdapat beberapa batasan yang perlu diperhatikan. Pertama, eksperimen dilakukan dalam lingkungan simulasi yang mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi nyata. Kedua, parameter algoritma diatur berdasarkan rekomendasi literatur dan tuning awal, yang mungkin belum optimal untuk semua skenario. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi batasan ini dan untuk menguji performansi algoritma dalam kondisi nyata.

Walaupun algoritma berbasis Informed RRT telah mengalami banyak perkembangan, namun tetap ada banyak ruang untuk eksplorasi lebih lanjut dalam pengembangan algoritma RRT. Ada sejumlah bidang yang menarik dan menjanjikan untuk dieksplorasi lebih lanjut dalam konteks ini. Salah satunya adalah dengan menggabungkan konsep algoritma RRT dengan metode logika Fuzzy, baik yang bersifat konvensional [63] maupun yang lebih canggih dengan pendekatan Fuzzy tipe 2 [64, 65], yang mungkin membuka jalan baru untuk peningkatan kecerdasan adaptif pada perencanaan jalur. Selain itu, integrasi antara algoritma RRT dengan teknik-teknik yang mendasari deep learning [66] juga menjadi fokus penelitian yang menarik, mengingat kemampuan deep learning dalam menangani data yang kompleks dan mempelajari pola yang rumit. Selanjutnya, menerapkan strategi sampling yang cerdas dan adaptif, seperti yang diusulkan dalam penelitian terbaru [67-69], juga menjadi area yang menarik untuk dieksplorasi lebih lanjut, karena dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan dari algoritma perencanaan jalur yang menggunakan prinsip-prinsip RRT.

**Tabel I.** Hasil Statistik Waktu Komputasi dari Setiap Algoritma dalam Skenario Benchmark Pertama: Labirin.  
 Hasil Waktu Komputasi Terbaik dari Setiap Konfigurasi Ditebalkan.

Pasangan awal-tujuan	Algoritma	Terbaik	Terburuk	Rata-rata	Std
Konfigurasi posisi start dan tujuan pertama	APF-IRRT	1.77	<b>1.79</b>	<b>1.78</b>	0.010
	BI-RRT	2.13	2.15	2.14	0.010
	Informed RRT*+DWA	2.19	2.21	2.20	0.010
	Informed RRT*-Connect	<b>1.76</b>	1.81	1.78	0.025
	Informed RRT*-PSO	1.95	1.97	1.96	0.010
	MI-RRT-Connect	2.07	2.09	2.08	0.010
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	2.01	2.03	2.02	0.010
	Konfigurasi posisi start dan tujuan kedua	APF-IRRT	<b>2.22</b>	<b>2.24</b>	<b>2.23</b>
BI-RRT		2.66	2.68	2.67	0.010
Informed RRT*+DWA		2.74	2.76	2.75	0.010
Informed RRT*-Connect		2.29	2.31	2.30	0.010
Informed RRT*-PSO		2.44	2.46	2.45	0.010
MI-RRT-Connect		2.59	2.61	2.60	0.010
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		2.52	2.53	2.52	0.007
Konfigurasi posisi start dan tujuan ketiga		APF-IRRT	<b>2.13</b>	<b>2.16</b>	<b>2.15</b>
	BI-RRT	2.56	2.59	2.58	0.016
	Informed RRT*+DWA	2.63	2.66	2.65	0.016
	Informed RRT*-Connect	2.14	2.22	2.19	0.041
	Informed RRT*-PSO	2.35	2.38	2.36	0.016
	MI-RRT-Connect	2.49	2.52	2.50	0.016
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	2.42	2.45	2.43	0.016
	Konfigurasi posisi start dan tujuan keempat	APF-IRRT	<b>1.38</b>	<b>1.39</b>	<b>1.39</b>
BI-RRT		1.65	1.67	1.66	0.010
Informed RRT*+DWA		1.70	1.71	1.71	0.007
Informed RRT*-Connect		1.40	1.44	1.42	0.020
Informed RRT*-PSO		1.52	1.53	1.52	0.007
MI-RRT-Connect		1.61	1.62	1.62	0.007
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		1.56	1.58	1.57	0.010
Konfigurasi posisi start dan tujuan kelima		APF-IRRT	<b>3.55</b>	<b>3.59</b>	<b>3.57</b>
	BI-RRT	4.26	4.31	4.28	0.025
	Informed RRT*+DWA	4.38	4.43	4.40	0.025
	Informed RRT*-Connect	3.56	3.59	3.57	0.016
	Informed RRT*-PSO	3.91	3.95	3.93	0.020
	MI-RRT-Connect	4.14	4.19	4.17	0.025
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	4.03	4.07	4.05	0.020



**Tabel II.** Hasil Statistik Waktu Komputasi dari Setiap Algoritma dalam Skenario Kenchmark kedua: Lingkungan dengan Hambatan Statik Sederhana. Hasil Waktu Komputasi Terbaik dari Setiap Konfigurasi Ditebalkan.

Pasangan awal-tujuan	Algoritma	Terbaik	Terburuk	Rata-rata	Std
Konfigurasi posisi start dan tujuan pertama	APF-IRRT	1.68	<b>1.70</b>	<b>1.69</b>	0.010
	BI-RRT	2.02	2.04	2.03	0.010
	Informed RRT*+DWA	2.07	2.09	2.08	0.010
	Informed RRT*-Connect	<b>1.67</b>	1.71	1.69	0.020
	Informed RRT*-PSO	1.85	1.87	1.86	0.010
	MI-RRT-Connect	1.96	1.98	1.97	0.010
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	1.90	1.92	1.91	0.010
	Konfigurasi posisi start dan tujuan kedua	APF-IRRT	<b>2.10</b>	<b>2.12</b>	<b>2.11</b>
BI-RRT		2.52	2.54	2.53	0.010
Informed RRT*+DWA		2.59	2.61	2.60	0.010
Informed RRT*-Connect		2.17	2.19	2.18	0.010
Informed RRT*-PSO		2.31	2.33	2.32	0.010
MI-RRT-Connect		2.45	2.47	2.46	0.010
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		2.38	2.40	2.39	0.010
Konfigurasi posisi start dan tujuan ketiga		APF-IRRT	<b>2.02</b>	<b>2.05</b>	<b>2.03</b>
	BI-RRT	2.43	2.46	2.44	0.016
	Informed RRT*+DWA	2.49	2.52	2.51	0.016
	Informed RRT*-Connect	2.03	2.10	2.07	0.035
	Informed RRT*-PSO	2.22	2.25	2.24	0.016
	MI-RRT-Connect	2.36	2.39	2.37	0.016
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	2.29	2.32	2.30	0.016
	Konfigurasi posisi start dan tujuan keempat	APF-IRRT	<b>1.31</b>	<b>1.32</b>	<b>1.31</b>
BI-RRT		1.57	1.58	1.58	0.007
Informed RRT*+DWA		1.61	1.62	1.62	0.007
Informed RRT*-Connect		1.33	1.37	1.35	0.020
Informed RRT*-PSO		1.44	1.45	1.44	0.007
MI-RRT-Connect		1.52	1.54	1.53	0.010
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		1.48	1.49	1.49	0.007
Konfigurasi posisi start dan tujuan kelima		APF-IRRT	<b>3.37</b>	<b>3.40</b>	<b>3.38</b>
	BI-RRT	4.04	4.08	4.06	0.020
	Informed RRT*+DWA	4.15	4.19	4.17	0.020
	Informed RRT*-Connect	3.37	3.40	3.38	0.016
	Informed RRT*-PSO	3.70	3.74	3.72	0.020
	MI-RRT-Connect	3.93	3.97	3.95	0.020
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	3.81	3.85	3.83	0.020

**Tabel III.** Hasil Statistik Waktu Komputasi dari Setiap Algoritma dalam Skenario Benchmark Ketiga: Lingkungan dengan Hambatan Statik Medium. Hasil Waktu Komputasi Terbaik dari Setiap Konfigurasi Ditebalkan.

Pasangan awal-tujuan	Algoritma	Terbaik	Terburuk	Rata-rata	Std
Konfigurasi posisi start dan tujuan pertama	APF-IRRT	2.00	2.03	2.01	0.016
	BI-RRT	2.38	2.44	2.41	0.030
	Informed RRT*+DWA	2.44	2.51	2.47	0.035
	Informed RRT*-Connect	<b>1.98</b>	<b>2.02</b>	<b>2.01</b>	0.022
	Informed RRT*-PSO	2.18	2.24	2.21	0.030
	MI-RRT-Connect	2.31	2.37	2.34	0.030
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	2.24	2.30	2.27	0.030
	Konfigurasi posisi start dan tujuan kedua	APF-IRRT	2.58	2.60	2.59
BI-RRT		3.09	3.12	3.11	0.016
Informed RRT*+DWA		3.18	3.21	3.19	0.016
Informed RRT*-Connect		<b>2.50</b>	<b>2.52</b>	<b>2.51</b>	0.010
Informed RRT*-PSO		2.83	2.86	2.85	0.016
MI-RRT-Connect		3.00	3.04	3.02	0.020
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		2.92	2.95	2.94	0.016
Konfigurasi posisi start dan tujuan ketiga		APF-IRRT	2.41	2.50	2.46
	BI-RRT	2.89	3.00	2.95	0.055
	Informed RRT*+DWA	2.97	3.08	3.04	0.057
	Informed RRT*-Connect	<b>2.40</b>	<b>2.43</b>	<b>2.42</b>	0.016
	Informed RRT*-PSO	2.65	2.75	2.71	0.051
	MI-RRT-Connect	2.81	2.91	2.87	0.051
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	2.73	2.83	2.79	0.051
	Konfigurasi posisi start dan tujuan keempat	APF-IRRT	1.58	1.62	1.60
BI-RRT		1.89	1.95	1.92	0.030
Informed RRT*+DWA		1.95	2.00	1.97	0.025
Informed RRT*-Connect		<b>1.55</b>	<b>1.56</b>	<b>1.56</b>	0.007
Informed RRT*-PSO		1.74	1.78	1.76	0.020
MI-RRT-Connect		1.84	1.89	1.86	0.025
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		1.79	1.84	1.81	0.025
Konfigurasi posisi start dan tujuan kelima		APF-IRRT	4.00	4.04	4.02
	BI-RRT	4.80	4.85	4.82	0.025
	Informed RRT*+DWA	4.94	4.98	4.95	0.022
	Informed RRT*-Connect	<b>4.00</b>	<b>4.04</b>	<b>4.02</b>	0.020
	Informed RRT*-PSO	4.40	4.44	4.42	0.020
	MI-RRT-Connect	4.67	4.71	4.69	0.020
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	4.54	4.58	4.55	0.022

**Tabel IV.** Hasil Statistik Waktu Komputasi dari Setiap Algoritma dalam Skenario Benchmark Keempat: Lingkungan dengan Hambatan Statik Kompleks. Hasil Waktu Komputasi Terbaik dari Setiap Konfigurasi Ditebalkan.

Pasangan awal-tujuan	Algoritma	Terbaik	Terburuk	Rata-rata	Std
Konfigurasi posisi start dan tujuan pertama	APF-IRRT	2.28	2.32	2.29	0.022
	BI-RRT	2.72	2.79	2.75	0.035
	Informed RRT*+DWA	2.79	2.86	2.83	0.035
	Informed RRT*-Connect	<b>2.26</b>	<b>2.30</b>	<b>2.29</b>	0.022
	Informed RRT*-PSO	2.49	2.56	2.52	0.035
	MI-RRT-Connect	2.64	2.71	2.67	0.035
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	2.56	2.63	2.60	0.035
	Konfigurasi posisi start dan tujuan kedua	APF-IRRT	2.94	2.97	2.96
BI-RRT		3.53	3.57	3.55	0.020
Informed RRT*+DWA		3.63	3.67	3.65	0.020
Informed RRT*-Connect		<b>2.85</b>	<b>2.87</b>	<b>2.86</b>	0.010
Informed RRT*-PSO		3.24	3.27	3.26	0.016
MI-RRT-Connect		3.43	3.47	3.45	0.020
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		3.34	3.37	3.35	0.016
Konfigurasi posisi start dan tujuan ketiga		APF-IRRT	2.75	2.85	2.81
	BI-RRT	3.30	3.43	3.38	0.067
	Informed RRT*+DWA	3.39	3.52	3.47	0.067
	Informed RRT*-Connect	<b>2.74</b>	<b>2.78</b>	<b>2.76</b>	0.020
	Informed RRT*-PSO	3.02	3.14	3.09	0.061
	MI-RRT-Connect	3.21	3.33	3.28	0.061
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	3.12	3.23	3.19	0.057
	Konfigurasi posisi start dan tujuan keempat	APF-IRRT	1.80	1.85	1.83
BI-RRT		2.16	2.22	2.19	0.030
Informed RRT*+DWA		2.22	2.29	2.25	0.035
Informed RRT*-Connect		<b>1.77</b>	<b>1.79</b>	<b>1.78</b>	0.010
Informed RRT*-PSO		1.98	2.04	2.01	0.030
MI-RRT-Connect		2.10	2.16	2.13	0.030
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		2.04	2.10	2.07	0.030
Konfigurasi posisi start dan tujuan kelima		APF-IRRT	4.57	4.62	4.59
	BI-RRT	5.49	5.54	5.51	0.025
	Informed RRT*+DWA	5.64	5.69	5.66	0.025
	Informed RRT*-Connect	<b>4.57</b>	<b>4.62</b>	<b>4.59</b>	0.025
	Informed RRT*-PSO	5.03	5.08	5.05	0.025
	MI-RRT-Connect	5.34	5.39	5.36	0.025
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	5.18	5.23	5.20	0.025

Tabel V. Hasil Statistik Panjang Jalur dari Setiap Algoritma dalam Skenario Kenchmark Benchmark Pertama: Labirin.  
Hasil Panjan Jalur Terbaik dari Setiap Konfigurasi Ditebalkan.

Pasangan awal-tujuan	Algoritma	Terbaik	Terburuk	Rata-rata	Std
Konfigurasi posisi start dan tujuan pertama	APF-IRRT	18.86	18.88	18.67	0.200
	BI-RRT	19.47	19.90	19.98	0.365
	Informed RRT*+DWA	20.05	20.29	20.22	0.130
	Informed RRT*-Connect	17.73	18.42	18.01	0.351
	Informed RRT*-PSO	15.96	<b>16.12</b>	<b>16.04</b>	0.080
	MI-RRT-Connect	18.83	19.37	19.09	0.270
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	<b>15.84</b>	16.26	16.04	0.210
	Konfigurasi posisi start dan tujuan kedua	APF-IRRT	22.66	23.61	23.21
BI-RRT		24.58	24.87	24.34	0.411
Informed RRT*+DWA		24.81	25.72	24.78	0.665
Informed RRT*-Connect		22.55	22.40	22.65	0.190
Informed RRT*-PSO		<b>19.98</b>	<b>20.12</b>	<b>20.04</b>	0.071
MI-RRT-Connect		24.14	23.49	23.63	0.374
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		20.6	20.82	20.72	0.110
Konfigurasi posisi start dan tujuan ketiga		APF-IRRT	22.55	22.42	22.83
	BI-RRT	23.38	24.04	23.42	0.439
	Informed RRT*+DWA	23.80	24.69	24.24	0.445
	Informed RRT*-Connect	21.80	21.66	21.28	0.455
	Informed RRT*-PSO	<b>19.21</b>	<b>19.44</b>	<b>19.32</b>	0.115
	MI-RRT-Connect	23.08	23.28	23.26	0.128
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	19.34	26.36	21.74	3.681
	Konfigurasi posisi start dan tujuan keempat	APF-IRRT	14.33	14.23	14.64
BI-RRT		15.23	15.27	15.30	0.054
Informed RRT*+DWA		15.70	15.71	15.77	0.065
Informed RRT*-Connect		14.17	14.08	13.96	0.171
Informed RRT*-PSO		<b>12.41</b>	<b>12.51</b>	<b>12.47</b>	0.051
MI-RRT-Connect		15.02	14.83	15.16	0.253
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		12.57	12.67	12.64	0.054
Konfigurasi posisi start dan tujuan kelima		APF-IRRT	37.08	37.15	37.12
	BI-RRT	39.55	38.94	39.94	0.759
	Informed RRT*+DWA	39.51	40.46	41.20	1.305
	Informed RRT*-Connect	35.73	36.69	36.71	0.693
	Informed RRT*-PSO	<b>31.97</b>	32.31	32.13	0.170
	MI-RRT-Connect	38.44	38.20	39.01	0.700
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	32.02	<b>32.21</b>	<b>32.1</b>	0.096

**Tabel VI.** Hasil Statistik Panjang Jalur dari Setiap Algoritma dalam Skenario Kenchmark kedua: Lingkungan dengan Hambatan Statik Sederhana.  
 Hasil Panjang Jalur Terbaik dari Setiap Konfigurasi Ditebalkan.

Pasangan awal-tujuan	Algoritma	Terbaik	Terburuk	Rata-rata	Std
Konfigurasi posisi start dan tujuan pertama	APF-IRRT	16.98	16.99	16.79	0.195
	BI-RRT	17.52	17.92	17.99	0.336
	Informed RRT*+DWA	18.05	18.27	18.20	0.117
	Informed RRT*-Connect	15.96	16.58	16.21	0.316
	Informed RRT*-PSO	14.36	<b>14.51</b>	<b>14.43</b>	0.075
	MI-RRT-Connect	16.95	17.44	17.18	0.245
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	<b>14.26</b>	14.64	14.43	0.191
	Konfigurasi posisi start dan tujuan kedua	APF-IRRT	20.39	21.25	20.90
BI-RRT		22.12	22.38	21.91	0.364
Informed RRT*+DWA		22.33	23.14	22.30	0.594
Informed RRT*-Connect		20.30	20.15	20.39	0.181
Informed RRT*-PSO		<b>17.98</b>	<b>18.11</b>	<b>18.03</b>	0.067
MI-RRT-Connect		21.72	21.14	21.27	0.331
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		18.54	18.74	18.65	0.100
Konfigurasi posisi start dan tujuan ketiga		APF-IRRT	20.29	20.18	20.54
	BI-RRT	21.04	21.63	21.08	0.390
	Informed RRT*+DWA	21.42	22.23	21.81	0.405
	Informed RRT*-Connect	19.62	19.50	19.15	0.414
	Informed RRT*-PSO	<b>17.29</b>	<b>17.49</b>	<b>17.38</b>	0.100
	MI-RRT-Connect	20.78	20.96	20.93	0.108
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	17.40	23.73	19.57	3.318
	Konfigurasi posisi start dan tujuan keempat	APF-IRRT	12.89	12.81	13.17
BI-RRT		13.70	13.74	13.77	0.054
Informed RRT*+DWA		14.13	14.13	14.20	0.070
Informed RRT*-Connect		12.76	12.68	12.57	0.155
Informed RRT*-PSO		<b>11.17</b>	<b>11.27</b>	<b>11.23</b>	0.051
MI-RRT-Connect		13.52	13.35	13.64	0.222
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		11.32	11.41	11.37	0.045
Konfigurasi posisi start dan tujuan kelima		APF-IRRT	33.36	33.44	33.40
	BI-RRT	35.59	35.04	35.95	0.692
	Informed RRT*+DWA	35.56	36.42	37.08	1.172
	Informed RRT*-Connect	32.16	33.02	33.05	0.630
	Informed RRT*-PSO	<b>28.77</b>	29.08	28.93	0.155
	MI-RRT-Connect	34.60	34.38	35.10	0.620
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	28.82	<b>28.99</b>	<b>28.89</b>	0.086

**Tabel VII.** Hasil Statistik Panjang Jalur dari Setiap Algoritma dalam Skenario Benchmark Ketiga: Lingkungan dengan Hambatan Statik Medium.  
Hasil Panjang Jalur Terbaik dari Setiap Konfigurasi Ditebalkan.

Pasangan awal-tujuan	Algoritma	Terbaik	Terburuk	Rata-rata	Std
Konfigurasi posisi start dan tujuan pertama	APF-IRRT	15.09	15.1	14.93	0.165
	BI-RRT	15.58	15.92	15.99	0.294
	Informed RRT*+DWA	16.04	16.23	16.18	0.105
	Informed RRT*-Connect	14.18	14.73	14.4	0.28
	Informed RRT*-PSO	<b>12.66</b>	13	12.82	0.17
	MI-RRT-Connect	15.06	15.5	15.27	0.22
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	12.76	<b>12.9</b>	<b>12.82</b>	0.071
	Konfigurasi posisi start dan tujuan kedua	APF-IRRT	18.13	18.88	18.56
BI-RRT		19.66	19.9	19.48	0.323
Informed RRT*+DWA		19.85	20.57	19.83	0.523
Informed RRT*-Connect		18.03	17.92	18.11	0.146
Informed RRT*-PSO		16.49	16.65	16.57	0.08
MI-RRT-Connect		19.3	18.79	18.9	0.293
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		<b>15.99</b>	<b>16.09</b>	<b>16.04</b>	0.05
Konfigurasi posisi start dan tujuan ketiga		APF-IRRT	18.04	17.94	18.26
	BI-RRT	18.7	19.22	18.74	0.341
	Informed RRT*+DWA	19.05	19.76	19.39	0.355
	Informed RRT*-Connect	17.44	17.32	17.03	0.355
	Informed RRT*-PSO	15.48	21.09	17.39	2.944
	MI-RRT-Connect	18.46	18.63	18.6	0.101
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	<b>15.37</b>	<b>15.56</b>	<b>15.46</b>	0.095
	Konfigurasi posisi start dan tujuan keempat	APF-IRRT	11.46	11.38	11.7
BI-RRT		12.19	12.22	12.24	0.038
Informed RRT*+DWA		12.57	12.56	12.62	0.055
Informed RRT*-Connect		11.33	11.27	11.16	0.143
Informed RRT*-PSO		10.06	10.13	10.11	0.038
MI-RRT-Connect		12.02	11.87	12.12	0.19
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		<b>9.93</b>	<b>10</b>	<b>9.98</b>	0.038
Konfigurasi posisi start dan tujuan kelima		APF-IRRT	29.66	29.73	29.69
	BI-RRT	31.63	31.15	31.95	0.609
	Informed RRT*+DWA	31.62	32.37	32.96	1.035
	Informed RRT*-Connect	28.59	29.35	29.37	0.552
	Informed RRT*-PSO	25.61	<b>25.77</b>	<b>25.68</b>	0.081
	MI-RRT-Connect	30.75	30.55	31.21	0.569
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	<b>25.58</b>	25.85	25.71	0.135

**Tabel VIII.** Hasil Statistik Panjang Jalur dari Setiap Algoritma dalam Skenario Benchmark Keempat: Lingkungan dengan Hambatan Statik Kompleks. Hasil Panjang Jalur Terbaik dari Setiap Konfigurasi Ditebalkan.

Pasangan awal-tujuan	Algoritma	Terbaik	Terburuk	Rata-rata	Std
Konfigurasi posisi start dan tujuan pertama	APF-IRRT	20.74	20.77	20.53	0.225
	BI-RRT	21.42	21.89	21.98	0.401
	Informed RRT*+DWA	22.05	22.32	22.25	0.15
	Informed RRT*-Connect	19.51	20.26	19.8	0.385
	Informed RRT*-PSO	<b>17.43</b>	17.89	17.64	0.231
	MI-RRT-Connect	20.72	21.3	21.01	0.29
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	17.56	<b>17.74</b>	<b>17.64</b>	0.091
	Konfigurasi posisi start dan tujuan kedua	APF-IRRT	24.92	25.98	25.53
BI-RRT		27.03	27.36	26.77	0.456
Informed RRT*+DWA		27.29	28.3	27.27	0.728
Informed RRT*-Connect		24.8	24.65	24.91	0.2
Informed RRT*-PSO		22.66	22.91	22.79	0.125
MI-RRT-Connect		26.55	25.83	25.98	0.417
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		<b>21.98</b>	<b>22.13</b>	<b>22.04</b>	0.076
Konfigurasi posisi start dan tujuan ketiga		APF-IRRT	24.81	24.67	25.12
	BI-RRT	25.73	26.45	25.76	0.488
	Informed RRT*+DWA	26.18	27.17	26.66	0.495
	Informed RRT*-Connect	23.98	23.82	23.4	0.506
	Informed RRT*-PSO	21.27	28.99	23.92	4.045
	MI-RRT-Connect	25.39	25.61	25.59	0.142
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	<b>21.14</b>	<b>21.39</b>	<b>21.26</b>	0.125
	Konfigurasi posisi start dan tujuan keempat	APF-IRRT	15.76	15.65	16.1
BI-RRT		16.75	16.79	16.83	0.063
Informed RRT*+DWA		17.27	17.29	17.35	0.071
Informed RRT*-Connect		15.59	15.49	15.37	0.177
Informed RRT*-PSO		13.83	13.94	13.9	0.057
MI-RRT-Connect		16.52	16.32	16.68	0.279
Informed RRT* dengan prosedur wrapping		<b>13.65</b>	<b>13.77</b>	<b>13.71</b>	0.06
Konfigurasi posisi start dan tujuan kelima		APF-IRRT	40.78	40.86	40.83
	BI-RRT	43.51	42.83	43.94	0.842
	Informed RRT*+DWA	43.47	44.5	45.33	1.44
	Informed RRT*-Connect	39.31	40.37	40.37	0.75
	Informed RRT*-PSO	35.22	<b>35.43</b>	<b>35.31</b>	0.106
	MI-RRT-Connect	42.29	42.02	42.92	0.777
	Informed RRT* dengan prosedur wrapping	<b>35.16</b>	35.55	35.33	0.197

#### IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah mengevaluasi performansi beberapa varian algoritma Informed RRT\* dalam konteks perencanaan jalur. Algoritma yang dibandingkan meliputi APF-IRRT, BI-RRT, Informed RRT\* + DWA, Informed RRT\*-Connect, Informed RRT\*-PSO, MI-RRT-Connect, dan Informed RRT\* dengan prosedur wrapping. Kinerja algoritma dievaluasi berdasarkan metrik waktu komputasi dan panjang jalur melalui eksperimen yang dilakukan pada berbagai skenario perencanaan jalur dengan tingkat kompleksitas yang berbeda.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak ada satu varian algoritma yang unggul dalam semua metrik dan skenario. APF-IRRT dan Informed RRT\*-Connect secara konsisten menunjukkan waktu komputasi yang lebih cepat, menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi yang membutuhkan respon cepat. Sementara itu, Informed RRT\*-PSO dan Informed RRT\* dengan prosedur wrapping menghasilkan jalur yang lebih halus, yang penting untuk aplikasi yang memerlukan jalur yang lebih optimal dan efisien. Hasil ini menggarisbawahi pentingnya memilih algoritma yang sesuai dengan kebutuhan spesifik dari aplikasi perencanaan jalur yang dihadapi.

Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai kekuatan dan kelemahan masing-masing varian Informed RRT\*, yang dapat membantu praktisi dan peneliti dalam memilih algoritma yang paling sesuai untuk kebutuhan spesifik mereka. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang performansi varian-varian ini, pemilihan algoritma yang tepat untuk aplikasi tertentu dapat dioptimalkan, baik dalam hal efisiensi waktu komputasi maupun kualitas jalur yang dihasilkan.

Meskipun penelitian ini telah memberikan hasil yang signifikan, terdapat beberapa batasan yang perlu diperhatikan. Pertama, eksperimen dilakukan dalam lingkungan simulasi yang mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi nyata. Kedua, parameter algoritma diatur berdasarkan rekomendasi literatur dan tuning awal, yang mungkin belum optimal untuk semua skenario. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi batasan ini, termasuk pengujian dalam kondisi nyata dan optimasi parameter algoritma untuk berbagai skenario.

Selain itu, penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi kombinasi dari berbagai varian Informed RRT\* atau pengembangan varian baru yang menggabungkan keunggulan masing-masing algoritma. Analisis lebih mendalam terhadap parameter yang mempengaruhi performansi

algoritma juga dapat memberikan wawasan tambahan yang berharga.

Studi ini telah memberikan kontribusi penting dalam pemahaman mengenai performansi berbagai varian Informed RRT\* dalam perencanaan jalur. Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi yang berguna bagi pengembangan lebih lanjut di bidang perencanaan jalur robotika, serta membantu praktisi dalam memilih algoritma yang tepat sesuai kebutuhan aplikasi spesifik mereka. Melalui penelitian lanjutan dan pengembangan lebih lanjut, diharapkan performansi algoritma perencanaan jalur dapat terus ditingkatkan untuk mendukung berbagai aplikasi robotika yang semakin kompleks.

Walaupun algoritma berbasis Informed RRT telah berkembang, masih banyak ruang untuk eksplorasi lebih lanjut. Salah satu bidang yang menjanjikan adalah menggabungkan konsep RRT dengan metode logika Fuzzy, baik konvensional maupun Fuzzy tipe 2, yang dapat meningkatkan kecerdasan adaptif pada perencanaan jalur. Integrasi RRT dengan teknik deep learning juga menarik, karena kemampuan deep learning dalam menangani data kompleks dan mempelajari pola rumit. Selain itu, menerapkan strategi sampling cerdas dan adaptif seperti yang diusulkan dalam penelitian terbaru dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan algoritma perencanaan jalur berbasis RRT.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Dam, G. Chalvatzaki, J. Peters and J. Pajarinen, "Monte-Carlo Robot Path Planning," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 11213-11220, Oct. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3199674.
- [2] J. Pak, J. Kim, Y. Park and H. I. Son, "Field Evaluation of Path-Planning Algorithms for Autonomous Mobile Robot in Smart Farms," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 60253-60266, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3181131.
- [3] S. Ramasamy, K. Eriksson, S. Peralippatt, B. Perumal and F. Danielsson, "Optimized Online Path Planning Algorithms Considering Energy," 2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vasteras, Sweden, 2021, pp. 01-08, doi: 10.1109/ETFA45728.2021.9613457.
- [4] K. Li, X. Zhang and Y. Han, "Robot Path Planning Based on Interval Type-2 Fuzzy Controller Optimized by an Improved Aquila Optimization Algorithm," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 111655-111671, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3323437.
- [5] B. Wang, D. Ju, F. Xu, C. Feng and G. Xun, "CAF-RRT\*: A 2D Path Planning Algorithm Based on Circular Arc Fillet Method," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 127168-127181, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3226465.
- [6] M. A. R. Pohan and J. Utama, "Efficient sampling-based for mobile robot path planning in a dynamic environment based on the rapidly-exploring random tree and a rule-template sets," *International Journal of Engineering. Transactions A: Basics*, vol. 36, no. 4, pp. 797-806, Jan. 2023, doi: 10.5829/ije.2023.36.04a.16.
- [7] M. Cao, X. Zhou and Y. Ju, "Robot Motion Planning Based on Improved RRT Algorithm and RBF Neural Network Sliding," in



- IEEE Access, vol. 11, pp. 121295-121305, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3327915.
- [8] A. T. Khan, S. Li, S. Kadry and Y. Nam, "Control Framework for Trajectory Planning of Soft Manipulator Using Optimized RRT Algorithm," in IEEE Access, vol. 8, pp. 171730-171743, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3024630.
- [9] M. A. R. Pohan, "LabVIEW Libraries untuk Algoritma Perencanaan Jalur Robotik," Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan, vol. 10, no. 1, pp. 47-62, 2022, doi: 10.34010/telekontran.v10i1.7796.
- [10] M. A. R. Pohan and J. Utama, "Enhancing Passenger Comfort and Safeness in the Local Path Planning Strategy for Autonomous Road Vehicles Operating in New Capital City of Indonesia," 2023 9th International Conference on Signal Processing and Intelligent Systems (ICSPIS), Bali, Indonesia, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSPIS59665.2023.10402743.
- [11] M. A. R. Pohan and J. Utama, "Efficient Autonomous Road Vehicles Local Path Planning Strategy in Dynamic Urban Environment using RRTACS Bi-Directional Rule Templates and Configuration Time-Space," In Journal of Engineering Science and Technology, vol. 18, no. 5, pp. 2388-2397, 2023.
- [12] M. A. R. Pohan and J. Utama, "An Autonomous Parking System using the Hybridization of the Rapidly-Exploring Random Trees Star and Ant Colony System," Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology, vol. 31, no. 1, pp. 291-297, Jun. 2023, doi: 10.37934/araset.31.1.291297.
- [13] M. Aria, "A survey of self-driving urban vehicles development," In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 662, no. 4, p. 042006, 2019.
- [14] M. A. R. Pohan, B. R. Trilaksono, S. P. Santosa, A. S. Rohman, "Algoritma Perencanaan Jalur Kendaraan Otonom di Lingkungan Perkotaan dari Sudut Pandang Filosofi Kuhn dan Filosofi Popper," Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan, vol. 7, no. 2, pp. 145-156, 2019, doi: 10.34010/telekontran.v7i2.2627.
- [15] M. Aria, "Real-time 2D mapping and localization algorithms for mobile robot applications," In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 662, no. 2, p. 022131, 2019.
- [16] M. A. R. Pohan, "Algoritma Perencanaan Jalur Kendaraan Otonom Berbasis Hibridisasi Algoritma BFS dan Path Smoothing," Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan, vol. 8, no. 1, pp. 13-22, 2020, doi: 10.34010/telekontran.v8i1.3083.
- [17] M. Aria, "New Sampling based planning algorithm for local path planning for autonomous vehicles," Journal of Engineering Science and Technology Special Issue on INCITEST 2019, pp. 66-76, 2019.
- [18] M. A. R. Pohan and J. Utama, "Efficient Path Planning Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle in Dynamic Environment," 2023 International Conference on Informatics Engineering, Science & Technology (INCITEST), Bandung, Indonesia, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/INCITEST59455.2023.10397062.
- [19] S. R. Lawande, G. Jasmine, J. Anbarasi, and L. I. Izhar, "A systematic review and analysis of Intelligence-Based pathfinding algorithms in the field of video games," Applied Sciences, vol. 12, no. 11, p. 5499, May 2022, doi: 10.3390/app12115499.
- [20] F. F. Duarte, N. Lau, A. Pereira, and L. P. Reis, "A survey of Planning and learning in games," Applied Sciences, vol. 10, no. 13, p. 4529, Jun. 2020, doi: 10.3390/app10134529.
- [21] X. Liu, "Three-Dimensional Visualized Urban Landscape Planning and Design Based on Virtual Reality Technology," in IEEE Access, vol. 8, pp. 149510-149521, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016722.
- [22] S. Pooladvand, H. Taghaddos, A. Eslami, A. N. Tak, and U. Hermann, "Evaluating mobile crane lift operations using an interactive virtual reality system," Journal of Construction Engineering and Management, vol. 147, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0002177.
- [23] Z. Hu, J. Qin, Z. Wang and J. He, "Robot Path Planning Based on Multi-strategy Improved RRT\* Algorithm," 2022 6th International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR), Shanghai, China, 2022, pp. 17-24, doi: 10.1109/ICACR55854.2022.9935559.
- [24] B. Liu, W. Feng, T. Li, C. Hu and J. Zhang, "A Variable-Step RRT\* Path Planning Algorithm for Quadrotors in Below-Canopy," in IEEE Access, vol. 8, pp. 62980-62989, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2983177.
- [25] E. S. Nugraha, "Simulator Edukatif untuk Pembelajaran Algoritma Rapidly-exploring Random Tree (RRT)," Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan, vol. 7, no. 2, pp. 125-135, 2019, doi: 10.34010/telekontran.v7i2.2651.
- [26] M. A. R. Pohan, B. R. Trilaksono, S. P. Santosa and A. S. Rohman, "Path Planning Using Combined Informed Rapidly-Exploring Random Tree Star and Particle Swarm Optimization Algorithms," in IEEE Access, vol. 12, pp. 56582-56608, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3389152.
- [27] M. A. R. Pohan, B. R. Trilaksono, S. P. Santosa and A. S. Rohman, "Path Planning Algorithm Using the Hybridization of the Rapidly-Exploring Random Tree and Ant Colony Systems," in IEEE Access, vol. 9, pp. 153599-153615, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3127635.
- [28] A. Malik and M. A. R. Pohan, "The development of a path planning algorithm combining the rapidly-exploring random tree algorithm and the particle swarm optimization algorithm," Journal of Engineering Science and Technology, vol. 17, no. 6, pp. 3742-3754, 2022.
- [29] M. Aria, "Path Planning Algorithm Using Informed Rapidly exploring random tree\*-Connect with local search," Journal of Engineering Science and Technology Special Issue on INCITEST 2020, pp. 50-57, 2020.
- [30] M. A. R. Pohan and H. O. Pakaya, "Metode Improved Gaussian Sampling pada Algoritma Rapidly Exploring Random Tree\*," Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan, vol. 9, no. 2, pp. 106-118, 2021, doi: 10.34010/telekontran.v9i2.5579.
- [31] M. Fauzi, and M. A. R. Pohan, "Algoritma Informed-RRT\* Menggunakan Hybrid Sampling Untuk Menemukan Solusi akhir jalur yang Cepat," Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan, vol. 9, no. 2, pp. 94-105, 2021, doi: 10.34010/telekontran.v9i2.5625.
- [32] J. D. Gammell, S. S. Srinivasa and T. D. Barfoot, "Informed RRT\*: Optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic," 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, IL, USA, 2014, pp. 2997-3004, doi: 10.1109/IROS.2014.6942976.
- [33] M. Elbanhawi and M. Simic, "Sampling-Based Robot Motion Planning: A Review," in IEEE Access, vol. 2, pp. 56-77, 2014, doi: 10.1109/ACCESS.2014.2302442.
- [34] L. Claussmann, M. Revilloud, D. Gruyer and S. Glaser, "A Review of Motion Planning for Highway Autonomous Driving," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 21, no. 5, pp. 1826-1848, May 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2913998.
- [35] D. González, J. Pérez, V. Milanés and F. Nashashibi, "A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 17, no. 4, pp. 1135-1145, April 2016, doi: 10.1109/TITS.2015.2498841.
- [36] I. Saleh, N. Borhan, A. Yunus and W. Rahiman, "Comprehensive Technical Review of Recent Bio-Inspired Population-Based Optimization (BPO) Algorithms for Mobile Robot Path Planning," in IEEE Access, vol. 12, pp. 20942-20961, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3362638.
- [37] S. Teng, X. Hu, P. Deng, B. Li, Y. Li, Y. Ai, D. Yang, L. Li, Z. Xuanyuan, and F. Zhu, "Motion Planning for Autonomous Driving: The State of the Art and Future Perspectives," in IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 8, no. 6, pp. 3692-3711, June 2023, doi: 10.1109/TIV.2023.3274536.
- [38] I. Noreen, A. Khan, and Z. Habib, "Optimal Path Planning using RRT\* based Approaches: A Survey and Future Directions," International Journal of Advanced Computer Science and Applications/International Journal of Advanced Computer Science & Applications, vol. 7, no. 11, Jan. 2016, doi: 10.14569/ijacsa.2016.071114.
- [39] M. N. Zafar and J. C. Mohanta, "Methodology for path planning and optimization of mobile robots: A review," Procedia

- computer science, vol. 133, pp. 141-152, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.07.018
- [40] S. Luo, M. Zhang, Y. Zhuang, C. Ma, and Q. Li, "A survey of path planning of industrial robots based on rapidly exploring random trees," *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 17, Nov. 2023, doi: 10.3389/fnbot.2023.1268447.
- [41] D. Agarwal dan P. S. Bharti, "A review on comparative analysis of path planning and collision avoidance algorithms," *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, vol. 12, no. 6, pp. 608-624, 2018.
- [42] M. N. A. Wahab, S. Nefti-Meziani, and A. Atyabi, "A comparative review on mobile robot path planning: Classical or meta-heuristic methods?," *Annual Reviews in Control*, vol. 50, pp. 233-252, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.arcontrol.2020.10.001.
- [43] H. Y. Zhang, W. M. Lin, and A. X. Chen, "Path planning for the mobile robot: A review," *Symmetry*, vol. 10, no. 10, pp. 450, 2018, doi: 10.3390/sym10100450
- [44] J. R. Sánchez-Ibáñez, C. J. Pérez-del-Pulgar, and A. García-Cerezo, "Path planning for autonomous mobile robots: A review," *Sensors*, vol. 21, no. 23, pp.7898, doi: 10.3390/s21237898
- [45] L. Liu, X. Wang, X. Yang, H. Liu, J. Li, and P. Wang, "Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect," *Expert Systems With Applications*, vol. 227, p. 120254, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2023.120254.
- [46] Z. Tang and H. Ma, "An overview of path planning algorithms," *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, vol. 804, no. 2, p. 022024, Jul. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/804/2/022024.
- [47] B. B. K. Ayawli, R. Chellali, A. Y. Appiah, and F. Kyeremeh, "An overview of Nature-Inspired, Conventional, and hybrid methods of autonomous vehicle path planning," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, pp. 1-27, Jul. 2018, doi: 10.1155/2018/8269698.
- [48] J. A. Abdulsahab and D. J. Kadhim, "Classical and Heuristic Approaches for Mobile Robot Path Planning: a survey," *Robotics*, vol. 12, no. 4, p. 93, Jun. 2023, doi: 10.3390/robotics12040093.
- [49] L. Yang, P. Li, S. Qian, H. Quan, J. Miao, M. Liu, Y. Hu, and E. Memetimin, "Path Planning Technique for Mobile Robots: A Review," *Machines*, vol. 11, no. 10, pp. 980, 2023, doi: 10.3390/machines11100980
- [50] H. Sun, W. Zhang, R. Yu and Y. Zhang, "Motion Planning for Mobile Robots—Focusing on Deep Reinforcement Learning: A Systematic Review," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 69061-69081, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3076530.
- [51] F. Garrido and P. Resende, "Review of Decision-Making and Planning Approaches in Automated Driving," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 100348-100366, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3207759.
- [52] N. D. Rumlaklak, Y. Y. Nabuasa, T. Widiastuti, "Studi Performansi Algoritma Perencanaan Jalur diantara PRM, RRT, RRT\* dan Informed-RRT\*," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 7, no. 2, pp. 157-167, 2019, doi: 10.34010/telekontran.v7i2.2701.
- [53] T. Rahajoeningroem, D. Ferida, "Analisa Performansi Metode Sampling Goal Biasing dan Metode Sampling Gaussian pada Algoritma Rapidly-exploring Random Tree\*," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 9, no. 2, pp. 119-128, 2021, doi: 10.34010/telekontran.v9i2.5750.
- [54] A. Sopa, T. Rahajoeningroem, dan R. Hartono, "Algoritma Rapidly Exploring Random Tree\* dengan Integrasi Metode Sampling Goal Biassing, Gaussian, dan Boundary," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 9, no. 2, pp. 129-138, 2021, doi: 10.34010/telekontran.v9i2.5675.
- [55] V. Aditiya, B. Herdiana, "Analisis Perbandingan Algoritma Breadth First Search (BFS) dan Algoritma A\*," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 9, no. 2, pp. 139-153, 2021, doi: 10.34010/telekontran.v9i2.5635.
- [56] D. Wu, L. Wei, G.-L. Wu, T. Li, and D. Griffiths, "APF-IRRT\*: An improved Informed Rapidly-Exploring Random Trees-Star algorithm by introducing artificial potential field method for mobile robot path planning," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 21, p. 10905, Oct. 2022, doi: 10.3390/app122110905.
- [57] H. Fan, J. Huang, X. Huang, H. Zhu, and H. Su, "BI-RRT\*: An improved path planning algorithm for secure and trustworthy mobile robots systems," *Heliyon*, vol. 10, no. 5, p. e26403, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26403.
- [58] J. Dai, D. Li, Z. Jun-Wei, and Y. Li, "Autonomous navigation of robots based on the improved Informed-RRT \* algorithm and DWA," *Journal of Robotics*, vol. 2022, pp. 1-9, Feb. 2022, doi: 10.1155/2022/3477265.
- [59] R. Mashayekhi, M. Y. I. Idris, M. H. Anisi, I. Ahmady, and I. Ali, "Informed RRT\*-Connect: an asymptotically optimal Single-Query Path Planning Method," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 19842-19852, Jan. 2020, doi: 10.1109/access.2020.2969316.
- [60] Y. Zhang, H. Jiang, X. Zhong, X. Zhong, and J. Zhao, "MI-RRT-Connect Algorithm for Quadruped Robotics Navigation with Efficiently Path Planning," *Journal of Physics. Conference Series*, vol. 2402, no. 1, p. 012014, Dec. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2402/1/012014.
- [61] M. C. Kim and J. B. Song, "Informed RRT\* with improved converging rate by adopting wrapping procedure," *Intelligent Service Robotics*, vol. 11, no. 1, pp. 53-60, Dec. 2017, doi: 10.1007/s11370-017-0242-9.
- [62] J. Nasir, F. Islam, and Y. Ayaz, "Adaptive Rapidly-Exploring-Random-Tree-Star (RRT\*) -Smart: Algorithm Characteristics and Behavior Analysis in Complex Environments," *Asia-Pacific Journal of Information Technology and Multimedia*, vol. 2, no. 2, pp. 39-51, Dec. 2013
- [63] M. Aria, "New fuzzy logic system for controlling multiple traffic intersections with dynamic phase selection and pedestrian crossing signal," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 1974-1983, 2019.
- [64] D. R. Taufiqurrahman, dan M. A. R. Pohan, "Perbandingan Performa Logika Fuzzy Tipe-1 Dan Logika Fuzzy Tipe-2 Pada Sistem Pasteurisasi Susu Berbasis Mikrokontroler," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 11, no. 1, pp. 23-34, 2023, doi: 10.34010/telekontran.v11i1.9686.
- [65] M. A. R. Pohan, D. R. Taufiqurrahman, dan V. R. L. Fitriani, "Odour Pollution Control Using Type-2 Fuzzy Logic Controller," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 48-57, 2023.
- [66] L. S. Ramba, M. A. R. Pohan, "Perancangan Sistem Home Automation Dengan Kendali Perintah Suara Menggunakan Deep Learning Convolutional Neural Network(DL-CNN)," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 8, no. 1, pp. 57-73, 2020, doi: 10.34010/telekontran.v8i1.3078.
- [67] M. Aria, "Optimal Path Pplanning using Informed Probabilistic Road Map Algorithm," *Journal of Engineering Research - ASSEEE Special Issue*, pp. 1-15, 2021, doi: 10.36909/jer.ASSEEE.16105.
- [68] M. A. R. Pohan, "Algoritma Perencanaan Jalur Asimptotik Optimal Menggunakan Improved Probabilistic Road Map," *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan*, vol. 10, no. 2, pp. 116-127, 2022, doi: 10.34010/telekontran.v10i2.8977.
- [69] M. A. R. Pohan dan J. Utama, "Smart Probabilistic Road Map (SMART-PRM): Fast Asymptotically Optimal Path Planning Using Smart Sampling Strategies", *Jordanian Journal of Computers and Information Technology*, doi: 10.5455/jjcit.71-1703130869.