

# Penentuan Trase Jalan Alternatif Bandar Udara Siboru Fakfak menggunakan *Least Cost Path Analysis*

\*Herdy Pratama Putra<sup>1</sup>, Ade Rifaldi Akatian<sup>1</sup>, Maikel Linggi<sup>1</sup>, Ismet Abdulchaliq Syarif<sup>1</sup>, Achmad Setiawan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Fakfak, Indonesia

<sup>2</sup>Pengelolaan Pelabuhan Perikanan, Politeknik Pertanian Negeri Pangkajene Kepulauan, Indonesia

Email: herdypratamaputra@polinef.id

\*Corresponding Author, Submitted: 27 Jan. 2026, Revised: 27 Feb. 2026, Accepted: 12 Mar. 2026

**ABSTRAK:** Aksesibilitas dari kawasan perkotaan Fakfak menuju Bandar Udara Siboru saat ini masih belum efisien, yang ditunjukkan oleh waktu tempuh sekitar dua jam untuk jarak 35,6 km. Kondisi ini terutama disebabkan oleh tingginya hambatan samping pada rute eksisting. Penelitian ini bertujuan merumuskan trase jalan alternatif melalui pendekatan spasial kuantitatif menggunakan metode *Least Cost Path Analysis (LCPA)* berbasis Geographic Information System (GIS). Penentuan jalur optimal dilakukan dengan mempertimbangkan tiga variabel pembatas utama, yaitu kemiringan lereng, tutupan lahan, dan status kawasan hutan. Hasil pemodelan spasial menunjukkan bahwa trase alternatif terpilih memiliki panjang 26,70 km dan secara komputasional mampu menghindari lereng sangat curam serta kawasan konservasi cagar alam (0%), sekaligus meminimalkan intervensi terhadap kawasan permukiman hingga 2,33%. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi algoritma LCPA dengan pembatas konservasi tidak hanya menghasilkan efisiensi dalam perencanaan biaya konstruksi, tetapi juga efektif dalam meminimalkan potensi konflik tata ruang dan dampak kerusakan ekologis. Secara operasional, trase usulan berpotensi menurunkan waktu tempuh menjadi sekitar 45–60 menit. Dengan demikian, penelitian ini memberikan dasar yang kuat bagi perencanaan infrastruktur transportasi yang efisien, berkelanjutan, dan adaptif dalam mendukung pengembangan konektivitas multimoda di Papua Barat.

**Kata kunci:** Aksesibilitas, Bandar Udara Siboru, konektivitas wilayah, *Least Cost Path Analysis*, Geographic Information System

**ABSTRACT:** Accessibility from the urban area of Fakfak to Siboru Airport is currently inefficient, as indicated by a travel time of approximately two hours for a distance of 35.6 km. This condition is primarily caused by high side friction along the existing route. This study aims to formulate an alternative road alignment using a quantitative spatial approach through the Geographic Information System (GIS)-based *Least Cost Path Analysis (LCPA)* method. The determination of the optimal route is based on three main constraint variables: slope, land cover, and forest area status. The spatial modeling results indicate that the selected alternative alignment has a total length of 26.70 km and is computationally capable of avoiding very steep slopes and protected nature reserve areas (0%), while minimizing intervention in residential areas to only 2.33%. These findings demonstrate that the integration of the LCPA algorithm with conservation constraints not only enhances efficiency in construction cost planning but also effectively reduces potential spatial conflicts and ecological degradation. Operationally, the proposed alignment has the potential to reduce travel time to approximately 45–60 minutes. Therefore, this study provides a robust foundation for planning efficient, sustainable, and adaptive transportation infrastructure to support the development of multimodal connectivity in West Papua.

**Keywords:** Accessibility, Siboru Airport, regional connectivity, *Least Cost Path Analysis*, Geographic Information System

## 1. PENDAHULUAN

Aksesibilitas transportasi merupakan salah satu prasyarat utama dalam mewujudkan pertumbuhan perkotaan yang berkelanjutan. Ketersediaan jaringan transportasi yang memadai tidak hanya memperlancar mobilitas penduduk dan distribusi barang, tetapi juga memperkuat konektivitas antarwilayah, membuka akses terhadap pusat-pusat pelayanan, dan mendukung pemerataan pembangunan. Dalam konteks perencanaan wilayah, konektivitas memiliki peran strategis karena menentukan intensitas interaksi spasial antarkawasan serta memengaruhi efisiensi sistem perkotaan secara keseluruhan. Oleh sebab itu, jaringan jalan yang terintegrasi dengan baik menjadi elemen fundamental dalam pembentukan struktur ruang kota dan dalam menunjang aktivitas sosial-ekonomi masyarakat [1, 2, 3, 4, 5].

Dalam perspektif transportasi, aksesibilitas merujuk pada tingkat kemudahan suatu lokasi untuk dicapai melalui sistem jaringan yang tersedia. Konsep ini menunjukkan keterkaitan yang erat antara tata guna lahan dan infrastruktur transportasi, karena kualitas akses akan menentukan tingkat keterhubungan antarlokasi. Namun demikian, fasilitas transportasi khusus seperti bandar udara umumnya dibangun di luar kawasan inti perkotaan dengan mempertimbangkan aspek keselamatan penerbangan, ketersediaan lahan, dan arah pengembangan wilayah. Konsekuensinya, akses awal menuju bandar udara sering kali kurang efisien apabila tidak didukung oleh jaringan jalan yang cepat, aman, dan andal. Dalam situasi demikian, peningkatan aksesibilitas menuju bandara menjadi kebutuhan penting, terutama untuk menjamin kelancaran konektivitas regional.

Kondisi tersebut tampak nyata pada Bandar Udara Siboru di Kabupaten Fakfak, Papua Barat, yang telah ditetapkan sebagai bagian dari Proyek Strategis Nasional melalui Peraturan Presiden Nomor 109 Tahun 2020 [6]. Sejak mulai beroperasi pada awal tahun 2024, bandar udara ini memegang peran penting dalam mendukung mobilitas orang dan barang serta dalam memperkuat keterhubungan wilayah Fakfak dengan kawasan lain. Akan tetapi, akses dari pusat perkotaan Fakfak menuju Bandar Udara Siboru hingga kini masih belum efisien. Untuk jarak sekitar 35,6 km, waktu tempuh melalui rute eksisting dapat mencapai kurang lebih dua jam. Durasi ini jauh lebih lama dibandingkan waktu tempuh ideal berdasarkan ketentuan kecepatan jalan antarkota sebagaimana diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2013, yaitu sekitar 45 menit hingga 1 jam untuk jarak tersebut [7]. Ketidakefisienan ini terutama disebabkan oleh kondisi rute eksisting yang melewati sejumlah kawasan permukiman dan perkampungan

padat, sehingga menimbulkan hambatan samping yang tinggi dan menurunkan kinerja perjalanan.

Permasalahan tersebut menunjukkan bahwa penyediaan akses menuju Bandar Udara Siboru tidak cukup hanya mengandalkan jaringan jalan yang telah ada, melainkan memerlukan perencanaan trase alternatif yang lebih efisien dan adaptif terhadap karakteristik wilayah. Tantangan utama dalam perencanaan trase di kawasan ini terletak pada kondisi geografis yang kompleks, khususnya variasi kemiringan lereng, keragaman tutupan lahan, serta keberadaan kawasan hutan dengan fungsi lindung maupun konservasi. Oleh karena itu, penentuan jalur jalan baru memerlukan pendekatan spasial yang mampu mengintegrasikan berbagai variabel pembatas secara sistematis agar jalur yang dihasilkan tidak hanya lebih singkat, tetapi juga layak secara teknis dan bertanggung jawab secara ekologis.

Salah satu pendekatan yang relevan untuk menjawab kebutuhan tersebut adalah *Least Cost Path Analysis* (LCPA) berbasis *Geographic Information System* (GIS). LCPA merupakan metode analisis spasial yang digunakan untuk menentukan jalur optimum antara dua titik berdasarkan akumulasi biaya atau hambatan paling rendah [8]. Dalam konteks perencanaan infrastruktur, “biaya” tidak semata-mata diartikan sebagai biaya ekonomi langsung, tetapi juga mencakup hambatan fisik, keterbatasan penggunaan lahan, serta potensi dampak lingkungan. Dengan memanfaatkan *cost surface* yang dibangun dari sejumlah variabel pembatas, LCPA memungkinkan identifikasi rute yang paling rasional untuk pembangunan jalan. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini efektif digunakan dalam berbagai bidang perencanaan infrastruktur, termasuk jalan, jaringan utilitas, dan sistem drainase, karena mampu menghasilkan jalur yang lebih efisien sekaligus mempertimbangkan aspek keberlanjutan [9, 10, 11, 12].

Walaupun demikian, penerapan LCPA dalam studi-studi sebelumnya masih lebih banyak difokuskan pada perencanaan jalan antarkota, jalan raya, atau koridor infrastruktur di wilayah dengan tekanan ekologis yang relatif lebih rendah. Penelitian oleh Januadi dan Nabila [13], misalnya, mengombinasikan LCPA dan *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) untuk menentukan rute jalan raya yang optimal pada wilayah dengan karakteristik kemiringan tertentu. Namun, kajian yang secara spesifik menempatkan akses bandar udara perintis sebagai objek analisis, terutama di kawasan dengan sensitivitas ekologis tinggi seperti Papua Barat, masih sangat terbatas. Padahal, pada konteks seperti ini, penentuan trase tidak dapat didasarkan semata-mata pada efisiensi

jarak, tetapi harus mempertimbangkan secara ketat keberadaan kawasan cagar alam, hutan produksi terbatas, serta bentuk-bentuk tutupan lahan yang berpotensi menimbulkan konflik ruang dan biaya lingkungan yang besar.

Berdasarkan kondisi tersebut, kesenjangan penelitian terletak pada masih terbatasnya model perencanaan trase jalan menuju bandar udara baru yang secara simultan mengintegrasikan hambatan topografi dan batasan konservasi dalam satu kerangka analisis spasial. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan LCPA berbasis GIS untuk merumuskan trase jalan alternatif menuju Bandar Udara Siboru dengan menggabungkan tiga variabel pembatas utama, yaitu kemiringan lereng, tutupan lahan, dan status kawasan hutan. Integrasi ketiga variabel ini penting untuk menghasilkan rute yang tidak hanya optimal dari segi jarak dan potensi waktu tempuh, tetapi juga mampu meminimalkan risiko teknis, konflik tata ruang, dan dampak ekologis.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merumuskan trase jalan alternatif yang optimal dalam meningkatkan aksesibilitas menuju Bandar Udara Siboru. Secara khusus, penelitian ini diarahkan untuk menjawab pertanyaan mengenai bagaimana jalur yang paling sesuai dapat ditentukan dengan meminimalkan hambatan yang berasal dari kemiringan lereng, tutupan lahan, dan kawasan hutan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi perencanaan infrastruktur transportasi udara yang lebih efisien, berkelanjutan, dan kontekstual, sekaligus memperkuat konektivitas wilayah di Papua Barat secara lebih komprehensif.

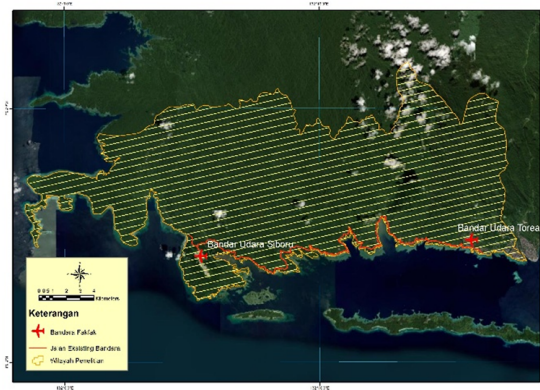
## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis spasial. Pendekatan tersebut dipilih karena permasalahan yang dikaji berkaitan langsung dengan fenomena geografis yang dapat direpresentasikan, diukur, dan dianalisis secara keruangan. Dalam penelitian spasial, data tidak hanya dipahami sebagai informasi atribut, tetapi juga sebagai representasi posisi, hubungan, dan distribusi objek dalam ruang. Oleh karena itu, penggunaan data spasial dan perangkat analisis kuantitatif menjadi penting untuk menjelaskan hubungan antarvariabel yang memengaruhi penentuan trase jalan alternatif. Melalui pendekatan ini, proses identifikasi jalur optimum dapat dilakukan secara lebih objektif, terukur, dan sistematis.

### 2.1. Wilayah Penelitian

Wilayah penelitian difokuskan pada koridor yang menghubungkan kawasan perkotaan Kabupaten Fakfak

dengan Bandar Udara Siboru beserta area sekitarnya. Secara administratif, deliniasi wilayah penelitian melintasi tiga distrik, yaitu Distrik Pariwari, Distrik Fakfak Barat, dan Distrik Wartutin, Gambar 1. Ketiga wilayah tersebut dipilih karena secara spasial berada pada koridor potensial pengembangan akses jalan menuju bandar udara. Total luas wilayah yang dianalisis dalam penelitian ini adalah 309,32 km<sup>2</sup>. Cakupan wilayah tersebut dinilai memadai untuk merepresentasikan variasi kondisi topografi, tutupan lahan, dan status kawasan hutan yang menjadi faktor pembatas utama dalam pemodelan trase.



Gambar 1. Deliniasi wilayah penelitian

### 2.2. Tahapan Penelitian

Secara umum, penelitian ini dilaksanakan melalui empat tahapan utama, yaitu tahap persiapan, tahap pengumpulan dan kompilasi data, tahap analisis, serta tahap perencanaan dan rekomendasi. Tahap persiapan mencakup identifikasi masalah, penelaahan literatur, penentuan batas wilayah penelitian, penyusunan jadwal penelitian, dan persiapan kebutuhan data. Tahap ini berfungsi untuk membangun kerangka konseptual sekaligus memastikan bahwa proses penelitian berjalan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Tahap berikutnya adalah pengumpulan dan kompilasi data. Pada tahap ini, data yang digunakan terdiri atas data sekunder yang diperoleh dari instansi terkait serta data primer yang dihimpun melalui survei lapangan. Seluruh data yang terkumpul kemudian diseleksi, disusun, dan disesuaikan ke dalam format spasial yang seragam agar dapat diolah lebih lanjut dalam sistem informasi geografis. Tahap ini sangat penting karena kualitas dan konsistensi data akan menentukan ketepatan hasil analisis. Selanjutnya, pada tahap analisis dilakukan pembobotan terhadap setiap variabel yang telah ditetapkan sebagai parameter dan pembatas trase. Hasil pembobotan tersebut menjadi dasar dalam pembentukan cost surface dan pelaksanaan *Least Cost Path Analysis* (LCPA). Tahap

terakhir adalah perencanaan dan rekomendasi, yaitu penyusunan keluaran berupa peta trase jalan alternatif berbasis GIS yang dapat digunakan sebagai dasar awal dalam perencanaan infrastruktur transportasi menuju Bandar Udara Siboru.

### 2.3. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas tiga parameter utama, yaitu kemiringan lereng, tutupan lahan, dan status kawasan hutan. Ketiga variabel tersebut dipilih karena memiliki pengaruh langsung terhadap kelayakan teknis, biaya pembangunan, serta risiko ekologis dalam pembangunan jalan. Dalam konteks perencanaan trase, kemiringan lereng merepresentasikan tingkat kesulitan teknis medan, tutupan lahan menunjukkan potensi hambatan penggunaan ruang dan pembebasan lahan, sedangkan status kawasan hutan berkaitan dengan batasan legal, administratif, dan konservasi. Masing-masing variabel kemudian diklasifikasikan lebih lanjut berdasarkan karakteristiknya dan diberikan skor sesuai tingkat hambatan yang ditimbulkan terhadap pembangunan jalan. Skoring disusun menggunakan pendekatan matriks hambatan (*cost surface*) dengan rentang nilai 1 sampai 5. Skor 1 menunjukkan tingkat hambatan terendah, sehingga area tersebut paling direkomendasikan untuk dilalui trase. Sebaliknya, skor 5 menunjukkan tingkat hambatan tertinggi, sehingga area tersebut sedapat mungkin dihindari. Pendekatan ini memungkinkan setiap satuan ruang pada wilayah penelitian memiliki nilai hambatan yang dapat dihitung secara komputasional dalam proses pencarian rute optimum.

Tabel 1. Skor klasifikasi setiap variabel pembatas

Variabel	Klasifikasi	Skor
Penutupan lahan	Bandara	5
	Hutan lahan kering primer	3
	Hutan lahan kering sekunder	3
	Hutan mangrove sekunder	3
	Permukiman	5
	Pertanian lahan kering	3
	campur semak	
	Semak belukar	2
	Tanah terbuka	4
	Tubuh air	4
Kemiringan lereng	Areal Penggunaan Lain	1
	8–15%	2
	15–25%	3
	25–45%	4
	>45%	5
Kawasan hutan	Areal Penggunaan Lain	1
	Cagar Alam	5
	Hutan Produksi Terbatas	4
	Laut/Air	4

(Sumber: Hasil analisis, 2026)

Berdasarkan kajian literatur, pemberian skor hambatan yang lebih tinggi pada kelas lereng curam didasarkan pada temuan Chakraborty dan Anbalagan [14], yang menegaskan bahwa lereng dengan kemiringan tinggi, khususnya di atas 25%, memiliki tingkat kerawanan yang lebih besar terhadap longsor dan ketidakstabilan lereng. Oleh karena itu, zona-zona tersebut perlu dihindari dalam perencanaan pembangunan jalan karena berpotensi meningkatkan risiko teknis sekaligus biaya penanganan konstruksi. Untuk variabel kawasan hutan, penetapan skor hambatan maksimum mengacu pada Wardatutthoyyibah [15], yang menunjukkan bahwa pembangunan infrastruktur yang melintasi kawasan hutan konservasi cenderung menghadapi kendala serius, terutama terkait kompleksitas administrasi, perizinan, dan perlindungan ekologis. Sementara itu, pada variabel tutupan lahan, justifikasi pembobotan merujuk pada Gunawan dan Winarno [16], yang menjelaskan bahwa kawasan konservasi berimplikasi langsung terhadap meningkatnya biaya pembebasan lahan dan beban administratif. Semakin dekat atau semakin besar intensitas pelintasan terhadap kawasan tersebut, semakin tinggi pula potensi kendala regulatif dan ekonomi yang harus dihadapi. Dengan demikian, preferensi rute secara rasional akan cenderung menghindari area-area dengan status konservasi tinggi. Rincian parameter dan skor pembobotan masing-masing variabel disajikan pada Tabel 1.

### 2.4. Metode Analisis

Teknik analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Least Cost Path Analysis* (LCPA). Menurut Etherington [17], proses analisis LCPA diawali dengan penyusunan bobot untuk setiap variabel yang telah ditetapkan sebagai faktor pembatas. Variabel-variabel tersebut kemudian diubah menjadi *layer constraint* dalam sistem GIS. Selanjutnya, seluruh *layer constraint* dioverlay untuk menghasilkan peta raster baru berupa *cost surface*. Pada peta ini, setiap sel raster memiliki nilai hambatan total ( $c$ ), yang merupakan hasil akumulasi dari seluruh variabel pembatas, yakni kemiringan lereng, tutupan lahan, dan status kawasan hutan. Secara matematis, nilai *cost surface* dinyatakan sebagai:

$$c = \sum_{i=1}^n V_i \quad (1)$$

Dengan  $V_i$  menunjukkan nilai hambatan dari variabel  $ke - i$ .

Tahap berikutnya adalah proses komputasi LCPA menggunakan perangkat lunak Global Mapper. Dalam proses ini, peta *cost surface* dikonversi menjadi struktur *weighted lattice graph* melalui evaluasi hubungan ketetanggaan antarsel raster, di mana titik pusat setiap

sel direpresentasikan sebagai simpul. Nilai bobot garis penghubung ( $e$ ), yang merepresentasikan biaya perpindahan antara dua simpul bertetangga ( $a$ ) dan ( $b$ ), dihitung sebagai hasil perkalian antara rata-rata nilai biaya dua sel tersebut dengan jarak Euclidean antarpusat sel. Formulasi matematisnya adalah sebagai berikut:

$$e_{a,b} = \frac{c_a + c_b}{2} \times d_{a,b} \quad (2)$$

Dengan  $c_a$  dan  $c_b$  masing-masing menyatakan nilai hambatan pada sel  $a$  dan  $b$ , sedangkan  $d_{a,b}$  adalah jarak Euclidean antara kedua simpul.

Setelah struktur *weighted lattice graph* terbentuk, nilai jarak least cost minimum ( $lcd$ ) antara titik asal ( $i$ ) di kawasan perkotaan Fakfak dan titik tujuan ( $j$ ) di Bandar Udara Siboru dihitung menggunakan algoritma shortest-path. Algoritma ini bekerja dengan mencari jalur yang memiliki total akumulasi biaya paling rendah sepanjang lintasan yang dilalui. Secara matematis, formulasi tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$lcd_{i,j} = \min \sum_{i=1}^{j-1} e_{i,i+1} \quad (3)$$

Melalui formulasi tersebut, seluruh *layer constraint* dievaluasi secara terintegrasi sehingga jalur yang dihasilkan akan cenderung menghindari area-area dengan hambatan sangat tinggi, seperti lereng sangat curam, kawasan hutan konservasi, dan tubuh air. Dengan demikian, trase alternatif yang dirumuskan bukan sekadar jalur terpendek secara geometris, melainkan jalur dengan akumulasi hambatan teknis dan ekologis paling minimum, sehingga lebih rasional untuk dikembangkan dalam konteks perencanaan infrastruktur jalan.

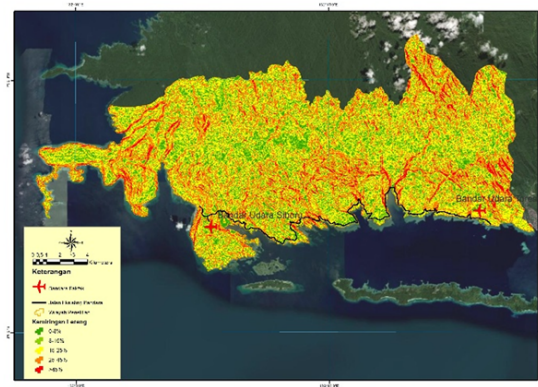
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Karakteristik Spasial Wilayah Penelitian

Wilayah penelitian mencakup koridor yang menghubungkan kawasan perkotaan Kabupaten Fakfak dengan Bandar Udara Siboru, yang secara administratif melintasi tiga distrik, yaitu Distrik Pariwari, Distrik Fakfak Barat, dan Distrik Wartutin. Luas total wilayah yang dianalisis mencapai 309,32 km<sup>2</sup>, dengan distribusi luasan terbesar berada di Distrik Wartutin (170,60 km<sup>2</sup>), diikuti Distrik Fakfak Barat (75,71 km<sup>2</sup>), dan Distrik Pariwari (63,01 km<sup>2</sup>). Distribusi spasial ini menunjukkan bahwa sebagian besar area studi berada pada wilayah dengan cakupan geografis yang luas dan relatif heterogen.

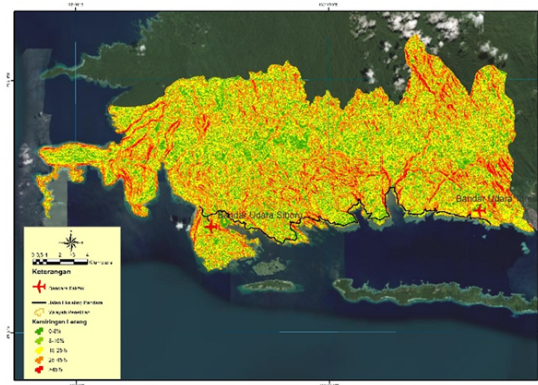
Dari aspek topografi, wilayah penelitian didominasi oleh kemiringan lereng 15–25% dengan luasan 106,95 km<sup>2</sup>. Kelas kemiringan berikutnya yang cukup dominan adalah 25–45% (91,32 km<sup>2</sup>), kemudian 8–15% (65,60 km<sup>2</sup>), serta 0–8% (30,95

km<sup>2</sup>). Sementara itu, lereng sangat curam (>45%) memiliki luasan paling kecil, yaitu 14,50 km<sup>2</sup>. Pola ini mengindikasikan bahwa wilayah penelitian memiliki karakteristik medan yang relatif bergelombang hingga curam, yang secara langsung berimplikasi terhadap kompleksitas perencanaan trase jalan, khususnya dalam kaitannya dengan stabilitas lereng dan kebutuhan pekerjaan tanah.



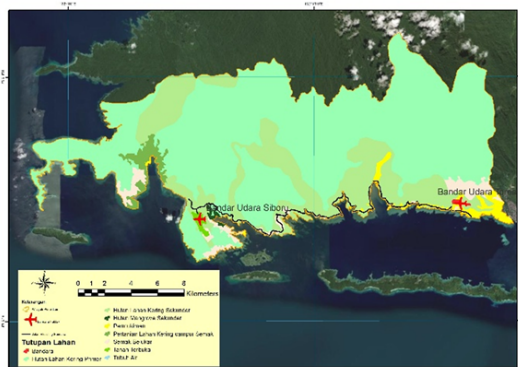
Gambar 2. Administrasi Wilayah Penelitian

Dari sisi tutupan lahan, wilayah penelitian menunjukkan keragaman yang cukup tinggi, meliputi hutan lahan kering primer dan sekunder, hutan mangrove sekunder, permukiman, pertanian lahan kering campur semak, semak belukar, tanah terbuka, tubuh air, serta area bandara. Hutan lahan kering primer mendominasi penggunaan lahan dengan luasan mencapai 219,54 km<sup>2</sup>, sedangkan tubuh air merupakan kelas dengan luasan terkecil, yaitu sekitar 0,001 km<sup>2</sup>. Dominasi kawasan hutan ini menegaskan bahwa wilayah studi memiliki sensitivitas ekologis yang tinggi, sehingga setiap intervensi pembangunan infrastruktur harus mempertimbangkan aspek keberlanjutan lingkungan.

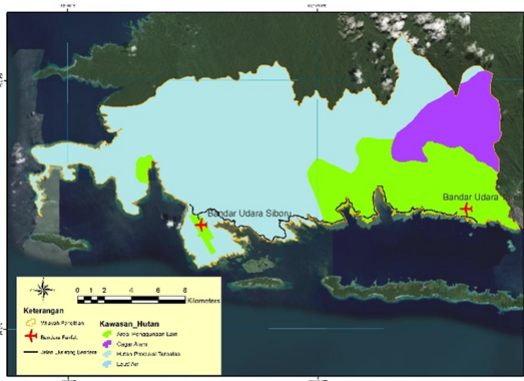


Gambar 3. Kondisi Kelerengan Wilayah Penelitian

Selain itu, keberadaan kawasan hutan berdasarkan Surat Keputusan Penunjukan Kawasan Hutan No. 783/Menhut-II/2014 menjadi faktor pembatas penting dalam perencanaan trase. Sebagian besar wilayah penelitian termasuk dalam kategori hutan produksi terbatas (208,80 km<sup>2</sup>), diikuti oleh areal penggunaan lain (67,29 km<sup>2</sup>), serta kawasan cagar alam seluas 33,15 km<sup>2</sup>. Distribusi ini menunjukkan bahwa sebagian wilayah memiliki fungsi lindung dan konservasi yang ketat, sehingga memerlukan pendekatan perencanaan yang mampu meminimalkan intervensi terhadap kawasan tersebut.



Gambar 4. Tutupan Lahan Wilayah Penelitian

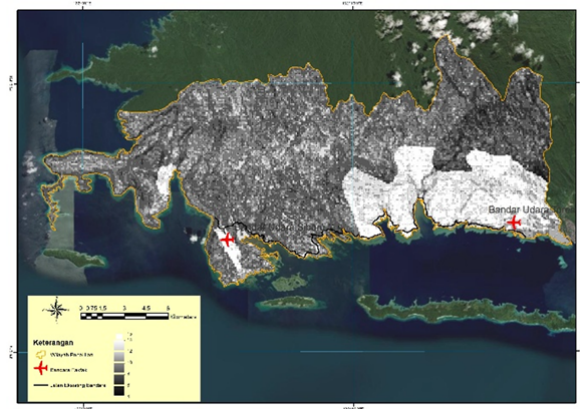


Gambar 5. Kawasan Hutan Wilayah Penelitian

### 3.2. Perencanaan Trase Jalan dengan LCPA

Proses perencanaan trase jalan diawali dengan integrasi seluruh variabel pembatas, yaitu kemiringan lereng, tutupan lahan, dan status kawasan hutan, melalui teknik overlay dalam sistem GIS. Setiap variabel diberikan bobot berdasarkan tingkat hambatan yang dihasilkan terhadap pembangunan jalan, sehingga membentuk peta cost surface. Peta ini merepresentasikan distribusi spasial nilai hambatan, di mana area dengan nilai tinggi menunjukkan tingkat kesulitan yang besar untuk dilalui, sedangkan area

dengan nilai rendah merepresentasikan kondisi yang lebih layak untuk pengembangan trase.



Gambar 6. Peta *Cost Surface*

Berdasarkan peta cost surface tersebut, algoritma LCPA kemudian digunakan untuk mengidentifikasi jalur dengan akumulasi biaya terendah yang menghubungkan titik asal di kawasan perkotaan Fakfak dengan titik tujuan di Bandar Udara Siboru. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa trase yang dihasilkan tidak mengikuti garis lurus secara geometris, melainkan beradaptasi terhadap kondisi medan dan batasan ekologis. Jalur yang terbentuk secara spasial menghindari area dengan hambatan tinggi, seperti lereng sangat curam dan kawasan konservasi, sehingga menghasilkan rute yang lebih rasional secara teknis dan lingkungan.



Gambar 7. Trase Jalan Hasil LCPA

Total panjang trase alternatif yang dihasilkan adalah 26,70 km. Nilai ini tidak hanya mencerminkan efisiensi jarak, tetapi juga merupakan representasi jalur

dengan akumulasi biaya konstruksi dan dampak sosial-lingkungan yang paling rendah. Dari aspek kemiringan lereng, sebesar 71,32% trase berada pada kondisi medan datar hingga landai (0–15%), dan tidak terdapat segmen yang melintasi lereng sangat curam (>45%). Kondisi ini sangat signifikan dalam menekan biaya konstruksi, terutama melalui pengurangan volume pekerjaan tanah (cut and fill), kebutuhan stabilisasi lereng, serta pembangunan struktur penahan tanah.

Dari aspek tutupan lahan, trase yang dihasilkan menunjukkan tingkat intervensi yang sangat rendah terhadap kawasan permukiman, yaitu hanya 0,62 km atau 2,33% dari total panjang rute. Minimnya penetrasi terhadap kawasan terbangun ini memiliki implikasi penting terhadap efisiensi biaya pembebasan lahan serta pengurangan potensi konflik sosial. Selain itu, rendahnya hambatan samping yang dihasilkan dari kondisi ini juga berpotensi meningkatkan kinerja operasional jalan pada masa mendatang.

Dari perspektif lingkungan, hasil pemodelan menunjukkan bahwa trase alternatif sepenuhnya menghindari kawasan cagar alam (0%), meskipun sebagian besar jalur masih melintasi hutan produksi terbatas (61,50%). Penghindaran kawasan konservasi ini memiliki implikasi strategis terhadap efisiensi proses perizinan lingkungan, termasuk dalam penyusunan dokumen AMDAL, serta mengurangi kebutuhan mitigasi ekologis yang kompleks dan berbiaya tinggi. Dengan demikian, pendekatan LCPA terbukti mampu menghasilkan rute yang tidak hanya optimal secara teknis, tetapi juga sensitif terhadap aspek keberlanjutan lingkungan.

Hasil penelitian ini konsisten dengan temuan-temuan sebelumnya yang menunjukkan efektivitas LCPA dalam perencanaan infrastruktur berbasis spasial. Studi Januadi dan Nabila [13] serta Amini et al. [12] menunjukkan bahwa LCPA mampu mengidentifikasi ruang solusi yang optimal dibandingkan pendekatan konvensional berbasis jarak terpendek. Selain itu, kemampuan LCPA dalam menghindari kawasan sensitif dan meminimalkan konflik tata ruang sejalan dengan temuan Kamarudin et al. [8], yang menegaskan bahwa metode ini efektif dalam menekan dampak ekologis sekaligus biaya lingkungan.

Secara konseptual, hasil ini menegaskan bahwa jalur infrastruktur yang optimal bukanlah jalur dengan jarak geometris terpendek, melainkan jalur dengan akumulasi hambatan total yang paling rendah, baik dari aspek fisik, sosial, maupun ekologis. Dalam konteks ini, trase alternatif menuju Bandar Udara Siboru tidak hanya meningkatkan efisiensi waktu tempuh, tetapi juga mencerminkan pendekatan perencanaan infrastruktur yang lebih adaptif dan berkelanjutan di

wilayah dengan kompleksitas geografis tinggi.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil merumuskan trase jalan alternatif yang menghubungkan kawasan perkotaan Fakfak dengan Bandar Udara Siboru menggunakan metode Least Cost Path Analysis (LCPA) berbasis GIS, dengan panjang total 26,70 km. Trase yang dihasilkan terbukti lebih efisien secara teknis dan ekonomis, sekaligus mempertimbangkan aspek keberlanjutan lingkungan. Dominasi jalur pada medan datar hingga landai (71,32%) serta ketiadaan lintasan pada lereng ekstrem menunjukkan potensi pengurangan signifikan terhadap biaya konstruksi. Selain itu, minimnya intervensi terhadap kawasan permukiman (2,33%) berkontribusi terhadap efisiensi biaya pembebasan lahan dan pengurangan potensi konflik sosial.

Dari perspektif lingkungan, trase alternatif ini sepenuhnya menghindari kawasan cagar alam, sehingga mampu meminimalkan risiko kerusakan ekologis dan mempercepat proses perizinan lingkungan. Dengan demikian, pendekatan LCPA yang digunakan dalam penelitian ini terbukti efektif dalam menghasilkan perencanaan trase yang tidak hanya optimal secara spasial, tetapi juga berorientasi pada keberlanjutan.

Berdasarkan hasil tersebut, disarankan kepada Pemerintah Kabupaten Fakfak dan Pemerintah Provinsi Papua Barat untuk mempertimbangkan trase alternatif ini sebagai acuan awal dalam pengembangan infrastruktur pendukung Bandar Udara Siboru. Tahapan lanjutan yang perlu dilakukan meliputi penyusunan Detailed Engineering Design (DED) serta kajian kelayakan lingkungan melalui dokumen AMDAL secara komprehensif. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan penambahan variabel teknis yang lebih detail, seperti karakteristik tanah (CBR), kondisi geologi teknik, dan analisis hidrologi, guna meningkatkan akurasi dan ketelitian model trase yang dihasilkan.

#### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada Pemerintah Kabupaten Fakfak dan Pemerintah Provinsi Papua Barat atas dukungan dalam penyediaan data dan informasi yang diperlukan dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Kementerian Perhubungan Republik Indonesia serta Badan Informasi Geospasial atas akses terhadap data spasial yang menjadi dasar analisis. Penulis turut menghargai dukungan institusional dari Politeknik Negeri Fakfak, baik dalam bentuk fasilitas maupun dukungan teknis selama penelitian berlangsung. Selain itu, terima kasih disampaikan kepada masyarakat

Fakfak atas kontribusi informasi lokal. Penelitian ini juga didukung oleh pendanaan dari Direktorat APTV, Direktorat Jenderal Pendidikan Vokasi, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.

## REFERENCES

- [1] R. Akuh, M. Zhong, A. Raza, and J. Sun, "Proposed new city development and public transport accessibility: A case study of yangtze river new city of the city of wuhan," in *2021 6th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. IEEE, 2021, pp. 52–58.
- [2] D. Dinanti and I. T. Pratama, "Tingkat konektivitas fasilitas wilayah pertumbuhan/kawasan potensial kabupaten mojokerto," *Tata Kota dan Daerah*, vol. 13, no. 1, pp. 23–34, 2021.
- [3] K. Ashritha and P. Deka, "Spatial mapping of travel information and assessment of road connectivity," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 48, pp. 21–26, 2023.
- [4] R. K. Upadhyay, S. K. Sharma, V. Kumar, and H. Valera, "Introduction to transportation systems technology and integrated management," in *Transportation Systems Technology and Integrated Management*. Springer, 2023, pp. 1–4.
- [5] R. A. D. Asrul, *Pengantar Sistem dan Perencanaan Transportasi*. Deepublish, 2018.
- [6] R. Indonesia, "Peraturan presiden nomor 109 tahun 2020 tentang perubahan ketiga atas peraturan presiden nomor 3 tahun 2016 tentang percepatan pelaksanaan proyek strategis nasional," *Lembaran Negara Tahun*, 2020.
- [7] A. Y. F. Nastan and S. Amri, "Implementasi peraturan pemerintah nomor 79 tahun 2013 tentang jaringan lalu lintas dan angkutan jalan mengenai batas kecepatan kendaraan di jalan tol perspektif fiqh siyasah," *As-Syar'i: Jurnal Bimbingan & Konseling Keluarga*, vol. 6, no. 1, pp. 890–903, 2024.
- [8] K. Norizah, I. Mohd Hasmadi, and J. Kamaruzaman, "Quantification of least cost path analysis for best forest road planning," *Malays. For.*, vol. 77, pp. 99–108, 2014.
- [9] S. Lin, S. Mathew, and A. R. A. Rasam, "Least cost path analysis for electrical transmission route suitability," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2881, no. 1. AIP Publishing LLC, 2023, p. 070005.
- [10] J. Diaz-Nieto, D. Lerner, and A. Saul, "Least-cost path analysis to identify retrofit surface-water conveyance solutions," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 21, no. 3, p. 04015071, 2016.
- [11] S. Lin, S. Mathew, and A. R. A. Rasam, "Transmission suitability route map using the least cost path analysis (lcpa)," *Planning Malaysia*, vol. 21, 2023.
- [12] M. Amini, B. Mirbagheri, A. A. Matkan, and A. Alimohammadi, "Enhanced least-cost path analysis for infrastructure planning: achieving a comprehensive search space with civil engineering structures," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 38, no. 6, pp. 1091–1108, 2024.
- [13] M. Januadi and D. Nabila, "Routing the highway development by using supermap least cost path analysis (lcpa) and multi-criteria decision analysis (mcda) and its assessment toward spatial planning," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 561, no. 1. IOP Publishing, 2020, p. 012019.
- [14] D. Chakraborty and R. Anbalagan, "Landslide hazard evaluation of road cut slopes along uttarkashi-bhatwari road, uttaranchal himalaya," *Journal of the Geological Society of India*, vol. 71, no. 1, pp. 115–124, 2008.
- [15] W. WARDATUTTHOYIBAH, S. Pudyatmoko, S. A. Subrata, and M. A. Imron, "The sufficiency of existed protected areas in conserving the habitat of proboscis monkey (*nasalis larvatus*)," 2018.
- [16] E. Winarno *et al.*, "Kondisi masyarakat kulon progo menuju era aerotropolis," *Jurnal Asia Pacific Studies*, vol. 5, no. 2, pp. 91–107, 2021.
- [17] T. R. Etherington, "Least-cost modelling and landscape ecology: concepts, applications, and opportunities," *Current Landscape Ecology Reports*, vol. 1, no. 1, pp. 40–53, 2016.



© 2026 by the authors. Licensee LINEARS, Indonesia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>).