

Aplikasi LiDAR untuk Inventarisasi Jalan Tol Bogor – Sukabumi Seksi II Cigombong – Cibadak

Willy Widyatmaka Ardi¹, Rian Nurtyawan², Moh. Abdul Basyid³

^{1,3}Institut Teknologi Nasional Bandung

²Universitas Pakuan Bogor

E-mail: ardywilly@gmail.com

Abstrak

Light Detection and Ranging (LiDAR) menjadi teknologi yang berkembang pesat dalam pengaplikasiannya, salah satunya ialah inventarisasi sebuah aset. Teknologi LiDAR dipilih karena keunggulannya dalam menghasilkan data topografi yang akurat dan detail. Akuisisi data dilakukan menggunakan sensor yang dipasang pada wahana udara, yang kemudian menghasilkan data point cloud. Data ini diproses untuk menghasilkan data Digital Terrain Model (DTM) yang menjadi dasar dalam analisis lebih lanjut. Lokasi penelitian di Jalan Tol Bogor – Sukabumi Seksi II Cigombong – Cibadak. Ruang lingkup penelitian akan melakukan analisis yang mencakup perhitungan nilai International Roughness Index (IRI) untuk menilai kualitas permukaan jalan dengan mengklasifikasikan hasil nilai tersebut dan melakukan hipotesis beberapa faktor yang mempengaruhi kualitas data LiDAR, seperti kerapatan titik, keakuratan sensor, kondisi medan, metode pengolahan data, resolusi grid, serta penghapusan objek non-terrain, juga dianalisis untuk memastikan reliabilitas hasil. Penelitian ini menyimpulkan bahwa aplikasi LiDAR efektif dalam inventarisasi jalan tol dan dapat digunakan sebagai alat yang handal dalam melakukan monitoring kelayakan jalan secara cepat.

Kata Kunci: LiDAR, inventarisasi, jalan tol, *Digital Terrain Model (DTM)*, *International Roughness Index (IRI)*.

1. PENDAHULUAN

Jalan merupakan sarana transportasi yang paling penting untuk menunjang kehidupan masyarakat dan menjadi tolak ukur dalam pembangunan suatu daerah bahkan negara. Menurut Undang Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan (2004), jalan adalah prasarana transportasi darat yang meliputi segala bagian jalan, termasuk bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukkan bagi lalu lintas, yang berada pada permukaan tanah, di atas permukaan tanah, di bawah permukaan tanah dan/atau air, serta di atas permukaan air, kecuali jalan kereta api, jalan lori, dan jalan kabel.

Salah satu yang termasuk dalam jalan ialah jalan tol. Jalan tol adalah jalan umum yang merupakan bagian sistem jaringan jalan dan sebagai jalan nasional yang penggunaannya diwajibkan membayar tol (PP Nomor 15 Pasal 1 Ayat 2 Tahun 2005 Tentang Jalan Tol, 2005).

Jalan tol merupakan infrastruktur transportasi modern di Indonesia karena menjadi jalur utama untuk mobilitas antar kota untuk mendukung pertumbuhan ekonomi, pariwisata, dan konektivitas regional. Jalan tol memiliki karakteristik khusus seperti jalurnya yang luas, konstruksi yang tinggi, dan penggunaan material yang tahan lama. Namun, faktor-faktor seperti cuaca ekstrem, beban lalu lintas yang tinggi, serta penggunaan lalu lintas yang berulang membuat jalan tol rentan terhadap kerusakan. Oleh karena itu, inventarisasi yang berkala dan akurat perlu dilakukan untuk memastikan infrastruktur jalan tol tetap aman dan fungsional. Data lengkap dan terperinci mengenai jalan tol sangat diperlukan dalam perencanaan, pemeliharaan, perbaikan, dan pengembangan jalan tol.

Salah satu metode untuk inventarisasi jalan tol seperti survei lapangan manual seringkali memakan waktu, biaya, dan sumber daya yang besar. Namun, seiring dengan perkembangan teknologi, metode menggunakan sensor Light Detection and Ranging (LiDAR) semakin dibuat lebih kecil sehingga dapat dimuat di dalam pesawat tanpa awak atau *drone* dan pengukuran dapat dilakukan dengan lebih efisien (Arrofiqoh dkk., 2022)

Dalam penelitian kali ini, peneliti melihat bahwa penggunaan teknologi LiDAR akan menawarkan solusi yang lebih baik untuk melakukan inventarisasi jalan tol karena kemampuannya untuk mengumpulkan data secara cepat, akurat, dan detail walaupun dalam kondisi yang sulit dijangkau dan berbahaya. LiDAR merupakan sistem penginderaan jauh aktif menggunakan sinar laser yang dapat menghasilkan informasi mengenai karakteristik topografi permukaan tanah dalam posisi horizontal dan vertikal (Soetaat dalam Nugroho & Puspasari, 2018).

Akuisisi LiDAR ini mendapatkan data profil memanjang dari jalan tol tersebut yang merupakan bagian dari inventarisasi jalan tol. Dari data ini dihitung *International Roughness Index* (IRI) sebagai nilai indeks kerataan suatu jalan. Nilai indeks inilah yang menjadi salah satu evaluasi kelayakan jalan tol tersebut. Peneliti merasa bahwa ada beberapa bagian jalan tol di Indonesia ini yang terasa tidak rata ketika melewati jalan tol tersebut. Oleh karena itu, peneliti sebagai bakal lulusan engineer ingin mencari tahu kelayakan jalan tol ditinjau dari sisi *engineeringnya*. Dalam penelitian kali ini, peneliti melihat bahwa penggunaan teknologi LiDAR akan menawarkan solusi yang lebih baik untuk melakukan inventarisasi jalan tol karena kemampuannya untuk mengumpulkan data secara cepat, akurat, dan detail walaupun dalam kondisi yang sulit dijangkau dan berbahaya. LiDAR merupakan sistem penginderaan jauh aktif menggunakan sinar laser yang dapat menghasilkan informasi mengenai karakteristik topografi permukaan tanah dalam posisi horizontal dan vertikal (Soetaat dalam Nugroho & Puspasari, 2018). Light Detection and Ranging (LiDAR) semakin dibuat lebih kecil sehingga dapat dimuat di dalam pesawat tanpa awak atau drone dan pengukuran dapat dilakukan dengan lebih efisien (Arrofiqoh dkk., 2022).

Akuisisi LiDAR ini mendapatkan data profil memanjang dari jalan tol tersebut yang merupakan bagian dari inventarisasi jalan tol. Dari data ini dihitung *International Roughness Index* (IRI) sebagai nilai indeks kerataan suatu jalan. *International Roughness Index* (IRI) adalah indeks yang paling umum digunakan di seluruh dunia yang mengkarakterisasi kekasaran jalan memanjang untuk mengelola sistem jalan (Můčka, 2017). IRI muncul sebagai kebutuhan untuk menyatukan kriteria pengukuran keteraturan permukaan jalan, dan saat ini menjadi salah satu parameter yang paling banyak diterima dan digunakan di banyak negara untuk mengukur kerusakan permukaan perkerasan jalan (Caro & Peña, 2012).

2. METODE PENELITIAN

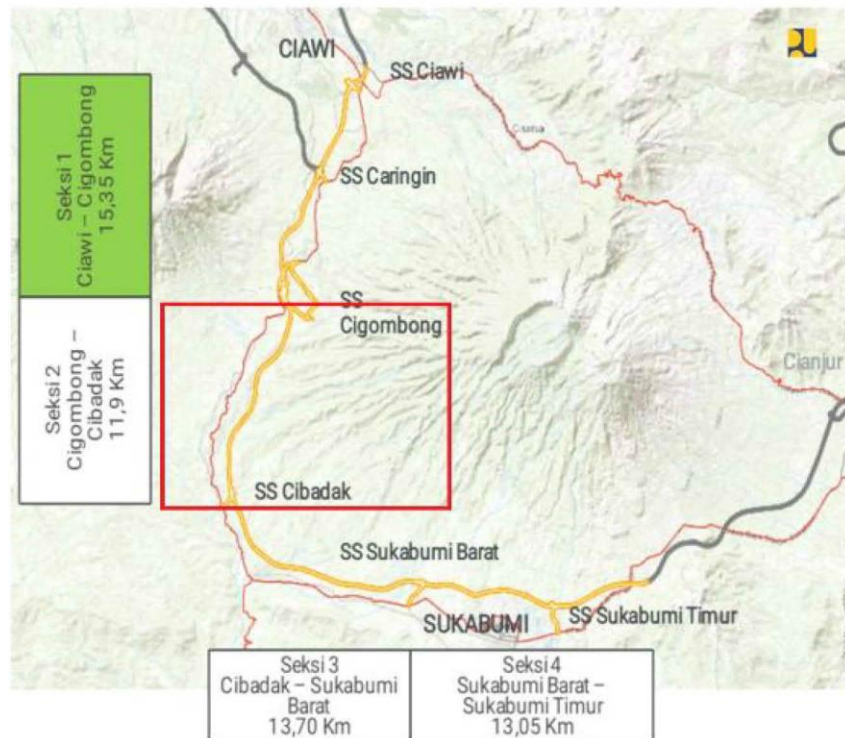
2.1. Data, Peralatan dan Lokasi Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu raw data Las.LiDAR dan titik marking merupakan data sekunder diperoleh dari akuisisi data LiDAR menggunakan sensor LiDAR yang dipasang pada wahana UAV LiDAR diakuisisi oleh PT. Mettana. Pemindaian menggunakan wahana udara

LiDAR dilakukan pada Jalan Tol Bogor – Sukabumi Seksi II Cigombong - Cibadak. Hasil pemindaian menggunakan UAV LiDAR berupa titik awan yang berformat file .las. Adapun peralatan untuk mendukung pengolahan pada pengerjaan tugas akhir ini terbagi dalam perangkat keras dan perangkat lunak.

- 1) Perangkat keras
 - a) Satu unit personal computer (PC).
 - b) Printer.
- 2) Perangkat lunak
 - a) Microstation dan TerraScan, digunakan untuk mengolah data raw LiDAR.
 - b) Global Mapper digunakan untuk proses visualisasi data LiDAR hasil filtering.
 - c) ProVAL 4.0, digunakan untuk menghitung nilai IRI jalan tol.
 - d) Microsoft Excel, digunakan untuk menyimpan hasil nilai IRI dan klasifikasinya dari profil memanjang jalan tol.

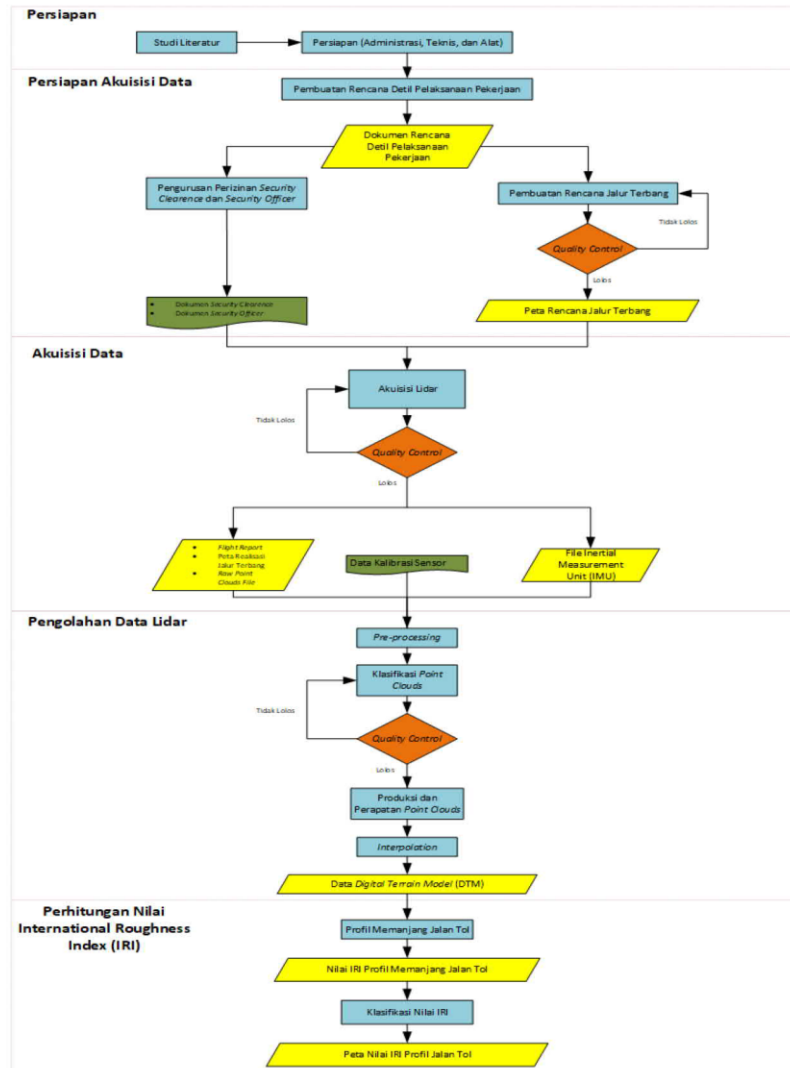
Lokasi penelitian berada di Jalan Tol Bogor – Sukabumi Seksi II Cigombong – Cibadak dengan panjang jalan tol sekitar 11,9 km. Lokasi ini dipilih dikarenakan pembuatan jalan tol pada seksi ini baru saja selesai. Lokasi penelitian dapat diilustrasikan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (Sumber: Badan Pengatur Jalan Tol)

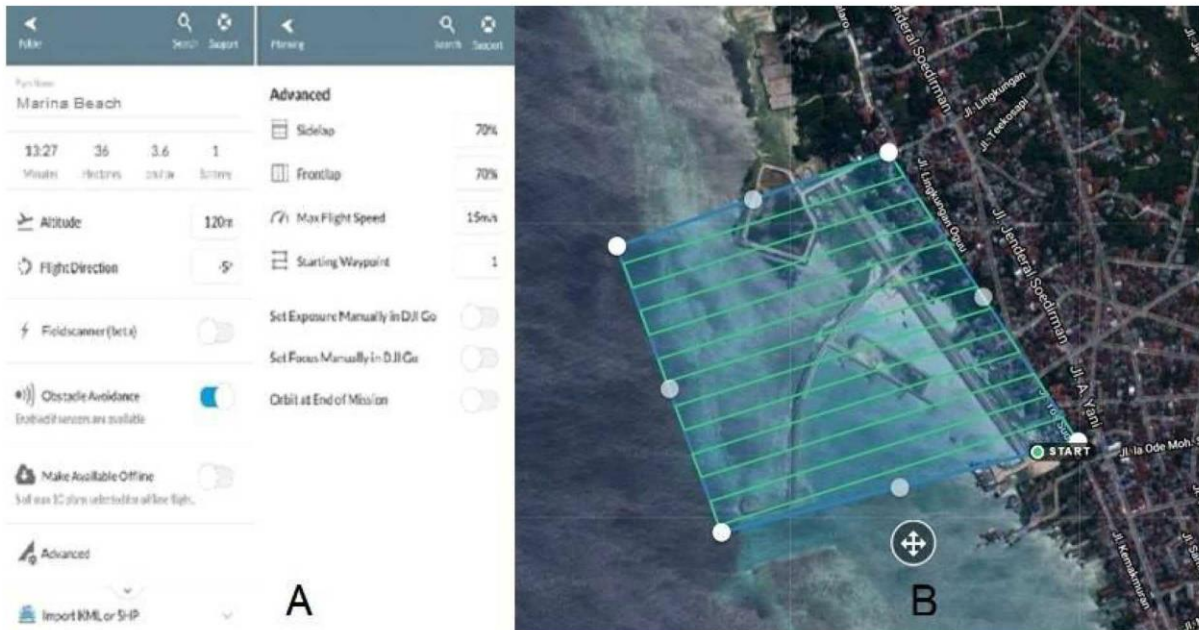
2.2. Tahapan dan Proses Penelitian

Akuisisi data LiDAR dilakukan melalui serangkaian persiapan yang matang dan terperinci sesuai dengan **Gambar 1** di bawah ini.



Gambar 2. Diagram Alir Metodologi Penelitian

Tahap pertama melibatkan pembuatan rencana detail pelaksanaan pekerjaan yang terdiri dari pengurusan *security clearance* dan *security officer*, serta pembuatan rencana jalur terbang. Pengurusan *security clearance* dan *security officer* adalah langkah awal yang diperlukan untuk memastikan bahwa seluruh kegiatan akuisisi data dapat dilakukan dengan aman dan sesuai dengan peraturan yang berlaku. Dokumen *security clearance* yang dihasilkan dari proses ini menjadi bukti bahwa kegiatan survei memiliki izin yang sah, sementara dokumen *security officer* memastikan bahwa aspek keamanan terjaga selama pelaksanaan survei. Langkah berikutnya adalah pembuatan rencana jalur terbang, yang sangat penting untuk menentukan area survei yang akan dilalui oleh sensor LiDAR. Rencana ini disusun dengan mempertimbangkan cakupan area dan jalur optimal untuk pengumpulan data yang akurat. Setelah peta rencana jalur terbang dibuat, dilakukan *quality control* untuk memastikan bahwa jalur yang dipilih dapat menghasilkan data yang sesuai dengan standar yang diinginkan.



Gambar 3. Ilustrasi Pembuatan Jalur Terbang

Dengan selesainya kedua persiapan tersebut, yaitu diperolehnya dokumen *security clearance* serta *security officer*, dan peta rencana jalur terbang yang telah melalui *quality control*, proses akuisisi data LiDAR dapat dilaksanakan. Selama proses akuisisi, dilakukan *quality control* yang ketat untuk menjamin kualitas data yang dikumpulkan. Hasil akhir dari proses ini mencakup *flight report*, peta realisasi jalur terbang, *raw point clouds file*, serta *file Inertial Measurement Unit (IMU)* dan data kalibrasi sensor yang diperlukan untuk pengolahan data LiDAR.

Dimulai dengan langkah *preprocessing* yang bertujuan untuk menyiapkan data mentah hasil akuisisi menjadi lebih siap digunakan. Tahap ini mencakup koreksi kesalahan sistematis, penyesuaian data terhadap koordinat yang benar, dan sinkronisasi data dari berbagai sensor. Setelah *pre-processing* selesai, langkah selanjutnya adalah klasifikasi *point clouds*. Pada tahap ini, titik-titik dalam *point clouds* dikelompokkan berdasarkan kategori tertentu, seperti tanah, bangunan, vegetasi, dan objek lainnya. Klasifikasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa data yang digunakan benar-benar merepresentasikan permukaan tanah yang sesungguhnya. *Quality control* diperlukan dalam tahap ini untuk memverifikasi keakuratan klasifikasi yang dilakukan.

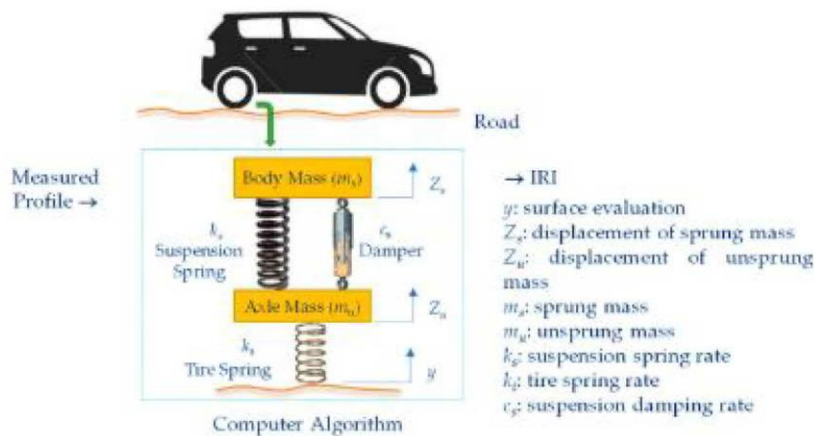
Kemudian, dilakukan produksi perapatan *point clouds* untuk meningkatkan kerapatan data yang ada sehingga dapat menghasilkan model yang lebih akurat. Setelah itu, *interpolation* diterapkan untuk memperhalus data dan mengisi celah-celah yang mungkin ada di antara titik-titik *point clouds*, menghasilkan model digital yang konsisten.

Proses ini menghasilkan *Digital Terrain Model (DTM)*, yang merupakan representasi permukaan tanah tanpa objek-objek di atasnya. DTM yang dihasilkan kemudian digunakan untuk perhitungan nilai *International Roughness Index (IRI)*. IRI merupakan parameter paling umum yang dikutip dalam literatur untuk memberikan ukuran kekasaran yang objektif (De Blasiis dkk., 2021). Selain itu, memerlukan nilai profil memanjang jalan tol dari data DTM untuk perhitungannya.

Setelah nilai IRI dihitung, hasilnya diklasifikasi untuk menggambarkan variasi kekasaran jalan tol. Langkah terakhir adalah pembuatan peta nilai IRI jalan tol, yang memberikan visualisasi dari distribusi kekasaran permukaan jalan berdasarkan data yang telah dianalisis. Peta ini dapat digunakan untuk evaluasi dan pemeliharaan jalan tol guna memastikan kenyamanan dan keamanan pengguna jalan.

3. HASIL DAN ANALISIS

3.1. Hasil Perhitungan IRI



Gambar 4. Ilustrasi Algoritma Perhitungan Nilai IRI (Sumber: Chen dkk., 2022)

Dalam penentuan nilai IRI, model matematikanya ialah sebagai berikut:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |Z_{s'}(t) - Z_{u'}(t)| dt \quad (1)$$

Persamaan (1) menjelaskan:

IRI : *International Roughness Index* dalam mm/m atau m/km.

L : panjang profil jalan.

V : kecepatan model mobil.

L/V : waktu yang dibutuhkan model mobil untuk menempuh jarak L.

dt : pertambahan waktu.

Z_{s'} : kecepatan vertikal model massa kendaraan.

Z_{u'} : kecepatan vertikal model massa poros.

Menurut Sawyers dalam Šroubek dkk. (2022), mengukur IRI suatu jalan mengikuti empat langkah berikut ini:

1. Pengukuran fisik profil memanjang sederhana.
2. Profil ini disaring menggunakan rata-rata bergerak pada dasar sepanjang 250 mm. Penyaringan ini mensimulasikan efek pelunakan deformasi ban.
3. Profil yang dihasilkan disaring lagi menggunakan simulasi seperempat mobil. Simulasi ini merekam respon fisik sebuah mobil "ideal" yang melaju pada profil dengan kecepatan 80 km/jam.
4. IRI (m/km) dihitung sebagai akumulasi pergerakan (m) suspensi mobil "ideal", dibagi dengan panjang profil perjalanan (km).

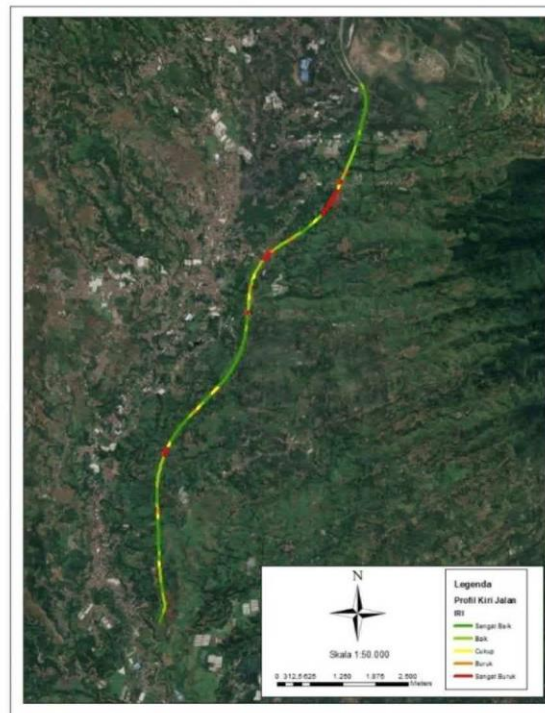
Menurut Šroubek dkk. (2022), pendekatan yang umum adalah dengan membagi profil jalan menjadi segmen-segmen dengan panjang konstan (panjang umum adalah $L = 20$ m atau $L = 100$ m) dan IRI dihitung di setiap segmen secara terpisah. Dalam penelitian kali ini, panjang konstan yang dilakukan ialah 100 m.

Untuk pengklasifikasiannya tersendiri, Yu dkk. dalam Abudinen dkk. (2017) menetapkan ambang batas IRI untuk kecepatan pengoperasian yang berbeda dan mempertimbangkan perubahan akselerasi vertikal yang dialami kendaraan, yang penulis definisikan sebagai "sentakan"; penulis memasukkan evaluasi terhadap 102 profil jalan pedesaan dari database Kinerja Perkerasan Jangka Panjang SHRP dari tahun 1989 hingga 2002. Dari penelitian ini, peneliti dapat mengusulkan ambang batas yang disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Klasifikasi Batas IRI dalam Berbagai Kecepatan Operasional

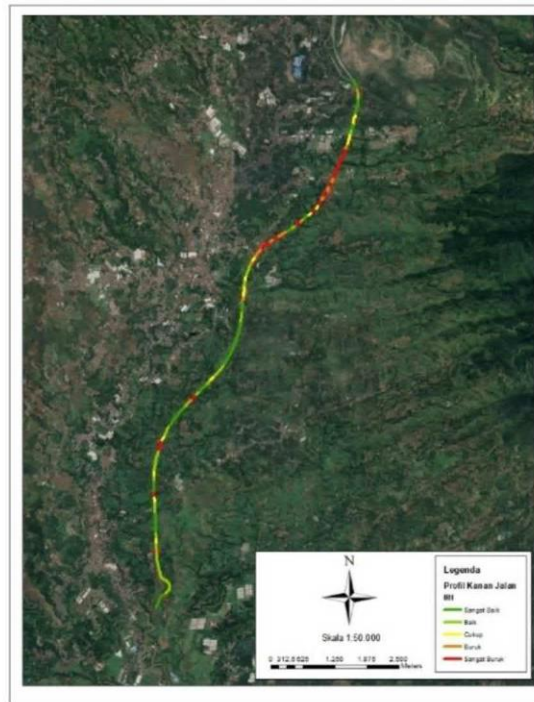
Kualitas Perjalanan	Batas ambang IRI dalam berbagai kecepatan operasional									
	120 km/jam	100 km/jam	80 km/jam	70 km/jam	60 km/jam	50 km/jam	40 km/jam	30 km/jam	20 km/jam	10 km/jam
Sangat Baik	<0,95	<1,14	<1,43	<1,63	<1,9	<2,28	<2,86	<3,8	<5,72	<11,44
Baik	0,95-1,49	1,14-1,79	1,43-2,24	1,63-2,57	1,90-2,99	2,28-3,59	2,86-4,49	3,80-5,99	5,72-8,99	11,44-17,99
Cukup	1,50-1,89	1,80-2,27	2,25-2,84	2,58-3,25	3,00-3,79	3,60-4,54	4,50-5,69	6,00-7,59	9,00-11,39	18,00-22,79
Buruk	1,90-2,70	2,28-3,24	2,85-4,05	3,26-4,63	3,79-5,40	4,55-6,25	5,70-8,08	7,60-10,8	11,40-16,16	22,80-32,32
Sangat Buruk	>2,70	>3,24	>4,05	>4,63	>5,50	>6,25	>8,08	>10,8	>16,1	>32,3

Dari **Tabel 1** ini, batas ambang IRI yang peneliti ambil adalah batas ambang IRI dengan kecepatan 80 km/jam sesuai dengan langkah yang dikemukakan Sawyers. Dengan mengacu **Tabel 1**, maka berikut merupakan peta profil kiri dari nilai IRI dengan pengklasifikasiannya.



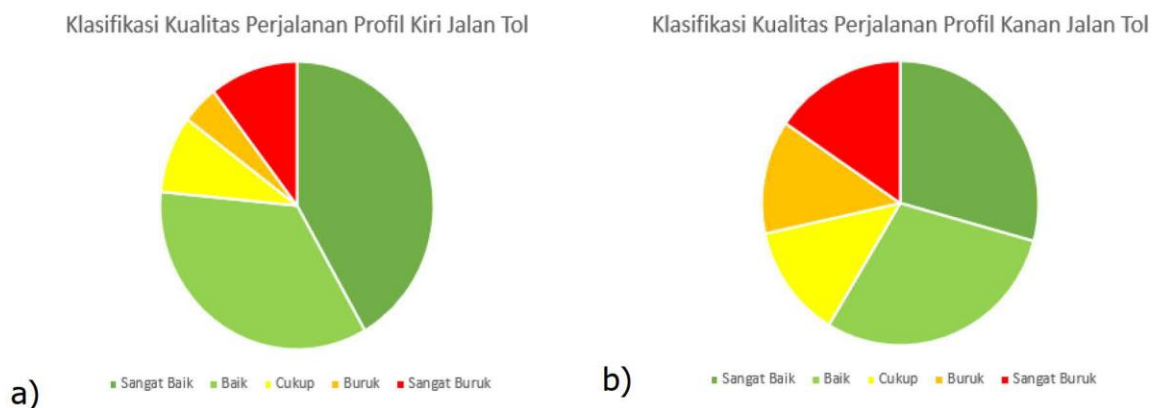
Gambar 5. Peta Nilai IRI Profil Kiri Jalan Tol

Sesuai dengan **Gambar 4**, didapatkan 11,6 km jalan yang diklasifikasikan sebanyak 4,9 km jalan dinilai sangat baik, 4 km jalan dinilai baik, 1 km jalan dinilai cukup, 0,5 km jalan dinilai buruk, dan 1,2 km jalan dinilai sangat buruk. Secara rata-rata, nilai IRI profil kiri jalan menilai Jalan Tol Bogor – Sukabumi Seksi II Cigombong – Cibadak dalam klasifikasi baik. Sedangkan berikut merupakan peta profil kanan dari nilai IRI dengan pengklasifikasiannya.



Gambar 6. Peta Nilai IRI Profil Kanan Jalan Tol

Sesuai dengan **Gambar 5**, didapatkan 11,7 km jalan yang diklasifikasikan sebanyak 3,5 km jalan dinilai sangat baik, 3,4 km jalan dinilai baik, 1,5 km jalan dinilai cukup, 1,5 km dinilai buruk, dan 1,8 km dinilai sangat buruk. Nilai IRI profil kanan jalan rata-rata menilai Jalan Tol Bogor – Sukabumi Seksi II Cigombong – Cibadak dalam klasifikasi cukup. Dengan data tersebut dapat divisualisasikan dengan diagram di bawah ini.



Gambar 7. Diagram Klasifikasi Nilai IRI (a) Profil Kiri Jalan dan (b) Profil Kanan Jalan

Dari **Gambar 6** (a) dapat diketahui bahwa sekitar 41.74% jalan dinilai sangat baik, 34.78% jalan dinilai baik, 8.69% jalan dinilai cukup, 4.34% jalan dinilai buruk, dan 10.43% jalan dinilai sangat buruk serta **Gambar 5** (b) dapat diketahui bahwa 29.91% jalan dinilai sangat baik,

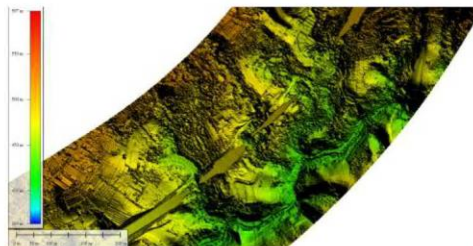
29.06% jalan dinilai baik, 12.82% jalan dinilai cukup, 12.82% jalan dinilai buruk, dan 15.38% jalan dinilai sangat buruk. Data – data ini dicakup dalam **Tabel 2.** di bawah ini.

Tabel 2. Hasil Klasifikasi Nilai Jalan IRI Profil Kiri dan Kanan Jalan Tol

Profil Kiri Jalan Tol		Profil Kanan Jalan Tol
41.74%	Sangat Baik	29.06%
34.78%	Baik	29.91%
8.69%	Cukup	12.82%
4.34%	Buruk	12.82%
10.43%	Sangat Buruk	15.38%

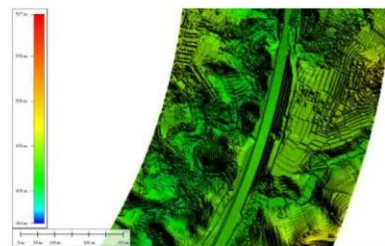
3.2. Analisis Faktor yang Mempengaruhi Penggunaan Data LiDAR dalam Perhitungan IRI

Hasil perhitungan nilai IRI menunjukkan sejumlah 1,5 km jalan data dinilai sangat buruk pada profil kiri dan 1,8 km jalan data dinilai sangat buruk pada profil kanan. Setelah diteliti, ada beberapa faktor yang mempengaruhi penggunaan data dalam perhitungan IRI. Salah satunya ialah hasil DTM yang masih kasar sehingga ketinggian jalan yang tidak sesuai dengan yang ada di lapangan.



Gambar 4.1 Nilai IRI yang sangat buruk karena DTM yang kasar

Namun, dalam perhitungan nilai IRI pun sejumlah 4,9 km jalan data dinilai sangat baik pada profil kiri dan 3,5 km jalan data dinilai sangat baik pada profil kanan.



Gambar 4.2 Nilai IRI yang sangat baik karena DTM yang halus

Hal ini membuktikan bahwa data LiDAR dipengaruhi oleh beberapa faktor. Berikut adalah analisis hipotesis faktor-faktor tersebut:

- a. Kerapatan titik (*Point Density*): Semakin tinggi kerapatan titik, semakin detail model yang dihasilkan. Namun, untuk DTM yang masih kasar, kerapatan titik yang rendah dapat digunakan, yang berarti lebih sedikit data yang diolah dan lebih cepat dalam proses pengolahan, tetapi dengan detail yang lebih rendah.
- b. Keakuratan sensor ketika akuisisi data: Ketika akuisisi data dilakukan, ada kemungkinan sensor LiDAR tidak akurat karena terhalang oleh awan atau kabut dalam pengerjaannya sehingga data pada area tersebut tidak terekam secara maksimal.
- c. Kondisi medan: Topografi dan vegetasi di area pemetaan dapat mempengaruhi kualitas data LiDAR. Area dengan vegetasi lebat atau permukaan yang sangat tidak rata akan

menghasilkan data yang lebih kompleks dan mungkin lebih banyak *noise*, yang harus diperhitungkan dalam pembuatan DTM.

- d. Metode pengolahan data: Metode interpolasi dan filtering yang digunakan akan mempengaruhi hasil akhir, terutama dalam menghilangkan *noise* dan artefak dari data yang kasar.
- e. Resolusi grid: Pemilihan ukuran grid dalam DTM mempengaruhi detail dan kualitas model. Grid yang lebih besar akan menghasilkan DTM yang lebih kasar dengan detail yang kurang, namun lebih cepat dalam proses pembuatan dan lebih ringan dalam hal penyimpanan data.
- f. Penghapusan objek *non-terrain*: Untuk menghasilkan DTM yang representatif dari permukaan tanah, semua objek di atas tanah seperti bangunan, vegetasi, dan lainnya harus dihapus atau disaring dari *data point cloud*. Teknik yang digunakan untuk pemisahan ini sangat mempengaruhi keakuratan DTM yang dihasilkan.

Dari kemungkinan enam faktor di atas, besar kemungkinan faktor yang mempengaruhi penggunaan data LiDAR dalam perhitungan nilai IRI ialah keakuratan sensor ketika akuisisi data dikarenakan data DTM yang kasar hanya terdapat di sejumlah lokasi saja sehingga besar kemungkinan ketika dilakukan akuisisi di lokasi tersebut, terhalang oleh awan, kabut, ataupun adanya hembusan angin yang kencang saat akuisisi LiDAR dilakukan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan klasifikasi nilai IRI pada Jalan Tol Bogor – Sukabumi Seksi II Cigombong – Cibadak berbeda antara profil kiri dan profil kanan jalan. Pada 11,5 km jalan menggunakan profil kiri, 4,8 km dinilai sangat baik, 4 km baik, 1 km cukup, 0,5 km buruk, dan 1,2 km sangat buruk. Sementara itu, pada 11,6 km jalan menggunakan profil kanan, 3,4 km dinilai sangat baik, 3,4 km baik, 1,5 km cukup, 1,5 km buruk, dan 1,8 km sangat buruk. Secara rata-rata, nilai IRI pada profil kiri jalan diklasifikasikan sebagai baik, sedangkan profil kanan diklasifikasikan sebagai cukup. Penelitian ini juga menemukan bahwa akuisisi data LiDAR mempengaruhi hasil perhitungan nilai IRI, dengan faktor utama yang mempengaruhi kualitas data DTM adalah keakuratan sensor saat akuisisi data.

Berdasarkan hasil penelitian ini, aplikasi LiDAR untuk inventarisasi Jalan Tol Bogor – Sukabumi Seksi II Cigombong - Cibadak disarankan untuk dilakukan karena lebih ekonomis dibandingkan metode mobile LiDAR dengan *Terrestrial Laser Scanning* (TLS) dan lebih efektif dari segi waktu dibandingkan survei lapangan langsung. Untuk meningkatkan hasil perhitungan nilai IRI, perlu memastikan bahwa akuisisi data LiDAR dilakukan dengan cermat sehingga data DTM yang digunakan dalam perhitungan maksimal. Karena keterbatasan waktu dan data dalam penelitian ini, disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan mengenai aplikasi LiDAR lainnya dalam inventarisasi jalan tol, mengingat potensi penggunaan teknologi LiDAR yang luas dalam bidang ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abudinen, D., Fuentes, L. G., & Muñoz, J. S. C. (2017). Travel quality assessment of urban roads based on international roughness index: Case study in Colombia. Dalam *Transportation Research Record* (Vol. 2612, hlm. 1–10). National Research Council. <https://doi.org/10.3141/2612-01>
- Arrofiqoh, E. N., Muryamto, R., Afyanti, D., Azizah, S. C., Kresnawan, S., Nuron, A., Program, F., Terapan, S., Survei, T., Dasar, P., & Kebumian, D. T. (2022). *Pemanfaatan UAV dengan Sensor Kamera dan Lidar untuk Pemetaan Situs Cagar Budaya Kawasan Candi Prambanan Leveraging UAV with Camera and LIDAR sensor*

- for Mapping of Cultural Heritage Sites in the Prambanan Temple Area. 17(2), 176–184.*
- Caro, F., & Peña, G. (2012). *Análisis y criterios para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en vías urbanas colombianas que orienten la elaboración de una especificación técnica* (Vol. 7).
- Chen, S. L., Lin, C., Tang, C. W., & Hsieh, H. A. (2022). Evaluation of Pavement Roughness by the International Roughness Index for Sustainable Pavement Construction in New Taipei City. *Sustainability (Switzerland), 14(12)*. <https://doi.org/10.3390/su14126982>
- De Blasiis, M. R., Di Benedetto, A., Fiani, M., & Garozzo, M. (2021). Assessing of the road pavement roughness by means of lidar technology. *Coatings, 11(1)*, 1–19. <https://doi.org/10.3390/coatings11010017>
- Můčka, P. (2017). International Roughness Index specifications around the world. *Road Materials and Pavement Design, 18(4)*, 929–965. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1197144>
- Nugroho, H., & Puspasari, F. (2018). *Analisis Pemanfaatan Dan Ketelitian Lidar Menggunakan Wahana Unmanned Aerial Vehicle (UAV). X*. <https://journals.itb.ac.id/index.php/ijog/article/view/9995>
- PP Nomor 15 Pasal 1 Ayat 2 Tahun 2005 tentang Jalan Tol (2005).
- Šroubek, F., Šorel, M., & Žák, J. (2022). Precise International Roughness Index Calculation. *International Journal of Pavement Research and Technology, 15(6)*, 1413–1419. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00097-z>
- Undang Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan (2004).