

Pemanfaatan LiDAR dalam Pemantauan Perubahan Tutupan Lahan untuk Mitigasi Perubahan Iklim: Tinjauan Literatur Sistematis

Resta Ulis Muslimah¹, Nia Three Manurung², Fernando Eric Redondo³, Hamdi Akhsan⁴, Melly Ariska⁵

Pendidikan Fisika, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

Email korespondensi: hamdiakhsan@fkip.unsri.ac.id

Abstrak

Perubahan tutupan lahan merupakan faktor penting dalam studi perubahan iklim global, terutama dipicu oleh aktivitas antropogenik. Dalam dua dekade terakhir, teknologi Light Detection and Ranging (LiDAR) telah berkembang sebagai alat efektif untuk pemantauan spasial perubahan tutupan lahan dengan akurasi tinggi. Penelitian ini bertujuan memberikan tinjauan sistematis mengenai pemanfaatan teknologi laser pada LiDAR dalam konteks pemantauan perubahan tutupan lahan yang relevan dengan studi perubahan iklim. Pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) digunakan untuk mengidentifikasi tren penelitian, metode yang digunakan, serta kontribusi LiDAR dalam estimasi parameter lingkungan seperti biomassa, stok karbon, dan model elevasi digital. Tinjauan ini mencakup publikasi dari tahun 2015 hingga 2024. Hasil menunjukkan bahwa LiDAR memiliki keunggulan dalam penetrasi kanopi vegetasi dan estimasi biomassa dengan akurasi tinggi (90-95%). Selain itu, integrasi LiDAR dengan data multispektral dan kecerdasan buatan (AI) memperluas kemampuannya dalam pemantauan lingkungan. Temuan ini diperoleh dari analisis literatur yang mencakup berbagai konteks aplikasi, seperti program REDD+, mitigasi bencana, dan validasi laporan emisi karbon nasional, terutama di wilayah tropis seperti Amazon dan Kalimantan. Dengan demikian, LiDAR merupakan teknologi utama dalam pengamatan bumi yang memadukan dimensi spasial dan temporal, sehingga mampu memberikan data yang presisi dan kontinu untuk mendukung kajian perubahan iklim, dinamika tutupan lahan, dan isu-isu lingkungan lainnya secara berkelanjutan.

Masuk:

21 Mei 2025

Diterima:

1 Agustus 2025

Diterbitkan:

8 September 2025

Kata kunci:

LiDAR, Perubahan Tutupan Lahan, Perubahan Iklim, Point Cloud, Biomassa

1. Pendahuluan

Istilah penutupan lahan mengacu pada perubahan permukaan bumi yang disebabkan oleh manusia, ini sebagian besar hasil dari hubungan antara proses alami dan proses antropogenik [1]. Perubahan tutupan lahan terjadi karena pertumbuhan penduduk yang semakin besar dan perkembangan teknologi yang semakin pesat sehingga menyebabkan suatu wilayah dapat dikonversi menjadi bentuk lain untuk memenuhi kebutuhan manusia baik kebutuhan sandang, pangan terutama lahan untuk pemukiman [2]. Faktor utama yang mendorong perubahan tutupan lahan adalah proses antropogenik, yang mengubah permukaan bumi secara signifikan. Ini berdampak pada pola penutupan lahan yang dapat diamati seiring waktu [3]. Beberapa dekade terakhir mengalami perubahan tutupan lahan yang signifikan terutama karena pertumbuhan perkotaan yang cepat yang telah mempengaruhi suhu permukaan tanah secara negatif [4].

Pemetaan pola penutup lahan dari skala global, regional, hingga lokal sangat penting bagi para ilmuwan dan otoritas untuk menghasilkan pemantauan yang lebih baik terhadap perubahan global karena distribusi penutup lahan berdampak besar pada iklim dan lingkungan [5]. Penutupan Lahan merupakan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh faktor-faktor biofisik dan sosial-ekonomi. Faktor-faktor ini mencakup pergeseran iklim jangka panjang, proses geomorfologi dan ekologi, perubahan pada penutup vegetasi dan struktur lanskap, variabilitas iklim, dan efek rumah kaca [6][7]. Perubahan tutupan lahan dapat mengganggu layanan ekosistem penting dengan mengubah rezim kelembaban dan suhu [8]. Seperti yang ditunjukkan oleh banyak penelitian, urbanisasi dapat menyebabkan peningkatan suhu permukaan, yang pada akhirnya menyebabkan efek pulau panas perkotaan (urban heat island/UHI). Efek ini terjadi ketika area perkotaan menjadi jauh lebih panas dibandingkan dengan wilayah sekitarnya akibat akumulasi panas dari permukaan bangunan, jalan, dan

minimnya vegetasi. Kondisi ini tidak hanya meningkatkan suhu lokal, tetapi juga dapat mengubah pola sirkulasi atmosfer di atas kota, sehingga memengaruhi curah hujan dan kelembaban di wilayah perkotaan [9].

Penginderaan jarak jauh, yang dapat merekam pantulan spektral dari panjang gelombang tampak hingga inframerah, dan resolusi spasial sedang hingga sangat tinggi, telah terbukti menjadi alat yang efektif untuk mengakses topografi bumi dalam cakupan spasial yang luas [5]. Teknik penginderaan jarak jauh aktif memberikan data tentang koordinat dan karakteristik reflektansi permukaan Bumi dalam panjang gelombang laser [10]. Salah satu penginderaan jarak jauh yang beberapa dekade terakhir telah berkembang adalah teknologi Light Detection and Ranging (LiDAR) yang telah diaplikasikan di berbagai aspek kehidupan sehari-hari [11]. LiDAR yang populer dikenal sebagai Laser-Radar, menggunakan laser sebagai bahan pengirim karena berasal dari Radar, keduanya memiliki prinsip kerja yang sama [12].

LiDAR hanya salah satu dari banyak metode penginderaan jarak jauh yang dapat memperoleh data georeferensi yang sangat akurat dan berkerapatan tentang bentuk dan karakteristik permukaan Bumi [13]. LiDAR cocok untuk pemantauan tutupan lahan karena dapat menghasilkan data yang sangat akurat tentang topografi dan struktur vegetasi dalam tiga dimensi [14]. Teknologi LiDAR memiliki kemampuan untuk menembus kanopi tanaman hingga ke permukaan tanah, yang memungkinkan pemetaan bahkan di wilayah yang sangat tertutup seperti hutan. Karena menggunakan pulsa laser aktif dan memiliki kemampuan untuk menutupi area yang luas dengan cepat, LiDAR dapat berfungsi baik siang maupun malam. LiDAR juga berguna untuk melacak perubahan tutupan lahan secara dekat dan cepat karena dapat mengidentifikasi karakteristik tanah seperti bangunan, pohon, dan lahan terbuka [14].

Penelitian yang menggunakan metode LiDAR sistem time of flight (ToF) dengan sumber cahaya untuk mengukur jarak dari 2 meter hingga 55 meter adalah salah satu dari beberapa penelitian yang relevan dengan teknologi LiDAR. Dengan metode ToF, teknologi LiDAR yang kontinu dapat digunakan untuk menentukan jarak objek target. Metode ToF memiliki fitur deteksi jarak jauh, sistem deteksi yang sederhana, dan efisiensi tinggi, serta efektivitas biaya. Cahaya tampak dengan panjang gelombang 632 nm digunakan sebagai laser dioda. Studi ini melakukan eksperimen secara langsung. Namun, ketepatan hasilnya belum dievaluasi secara kuantitatif [15].

Penulisan ini bertujuan untuk menyajikan tinjauan sistematis terhadap Pemanfaatan LiDAR dalam pemantauan perubahan tutupan lahan untuk mitigasi perubahan iklim. Melalui pendekatan Systematic Literature Review (SLR), kajian ini dirancang untuk mengidentifikasi efektivitas penggunaan LiDAR, tren penelitian terkini, serta kontribusi teknologi ini dalam mendukung estimasi parameter lingkungan yang berkaitan erat dengan perubahan iklim. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan menyusun sintesis informasi ilmiah yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan riset lanjutan dan penyusunan kebijakan berbasis data spasial.

2. Metode Penelitian

Artikel ini dibuat dengan menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR), mengacu pada pedoman PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) untuk menjamin transparansi dan reproduktibilitas proses seleksi literatur. Pencarian literatur dilakukan secara sistematis dengan memanfaatkan perangkat lunak *Publish or Perish* sebagai alat bantu dalam mengidentifikasi dan mengumpulkan publikasi ilmiah yang relevan.

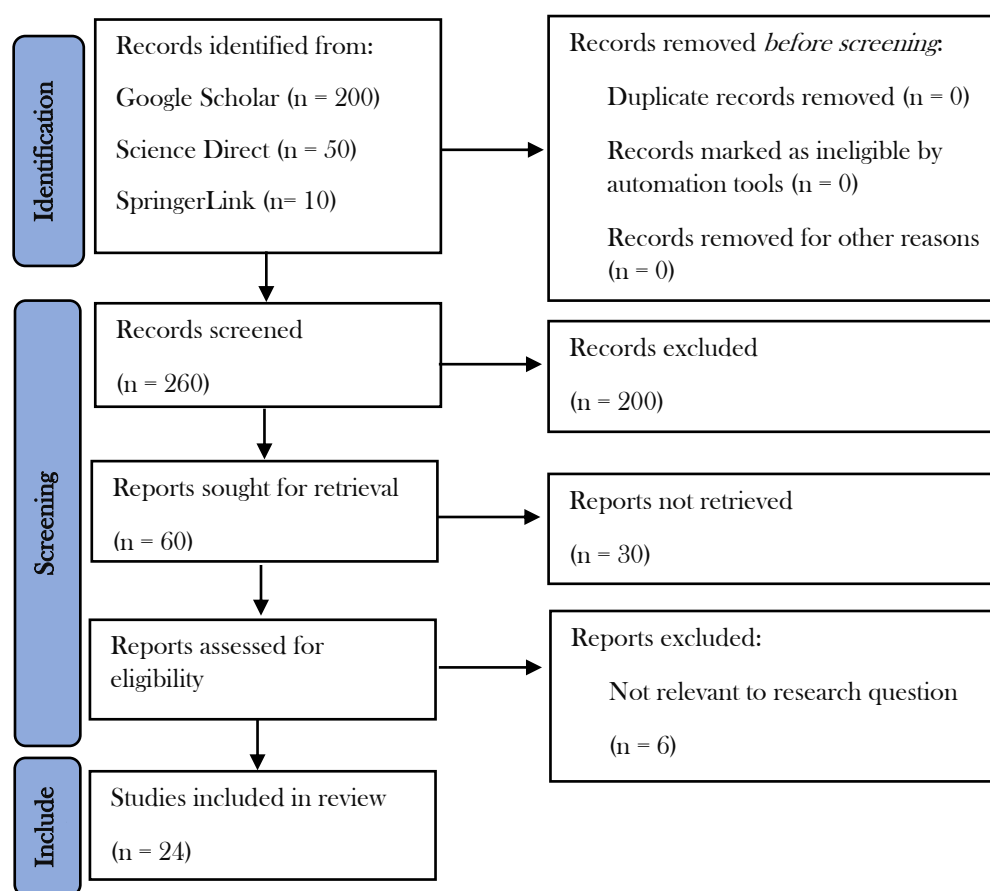
Strategi pencarian dirancang untuk menjangkau publikasi ilmiah yang relevan dan terkini dari tiga basis data akademik terkemuka yaitu, Google Scholar ($n = 200$), Science Direct ($n = 50$) dan SpringerLink ($n = 10$). Total sebanyak 260 artikel ilmiah berhasil teridentifikasi melalui penggunaan kata kunci gabungan dengan operator Boolean sebagai berikut: ("LiDAR" OR "Laser Scanning") AND ("land cover change" OR "vegetation structure" OR "biomass mapping") AND ("climate change" OR "environmental monitoring"). Pemilihan kata kunci tersebut disusun untuk memastikan cakupan luas terhadap penelitian LiDAR yang relevan, baik dalam konteks geofisika maupun klimatologis.

Pemilihan studi mengikuti kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan sebelumnya untuk memastikan ketelitian metodologis dan relevansi topik (lihat Tabel 1). Penyaringan dimulai dengan judul dan abstrak, diikuti dengan tinjauan teks lengkap dari artikel yang memenuhi syarat. Kriteria inklusi dan eksklusi ditampilkan sebagaimana diperlihatkan pada Tabel

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi untuk Pemilihan Artikel

Kriteria	Penyertaan	Pengecualian
Tipe Dokumen	Artikel jurnal yang ditinjau sejawat dan terindeks	Prosiding yang tidak ditinjau, blog, opini
Tahun Terbit	Tahun 2015-2024	Diluar kisaran ini
Bahasa	Bahasa Inggris	Bahasa selain bahasa Inggris
Fokus Topik	Pemanfaatan LiDAR dalam Pemantauan Perubahan Tutupan Lahan untuk Mitigasi Perubahan Iklim	Artikel yang tidak berkaitan langsung dengan topik (misalnya: aplikasi LiDAR pada keamanan, pertahanan, dll.)
Fokus Konten	Artikel yang membahas teknologi LiDAR, termasuk integrasi dengan UAV, citra multispektral, AI/machine learning, serta analisis parameter lingkungan seperti biomassa, stok karbon, DEM/CHM, dan klasifikasi tutupan lahan	Artikel yang hanya membahas teknologi laser tanpa kaitannya dengan studi lingkungan atau iklim, serta artikel yang tidak membahas sistem pencitraan atau data spasial secara langsung

Dari setiap artikel yang terpilih, data yang diekstraksi meliputi nama penulis, tahun publikasi, tujuan penelitian, metode yang digunakan, serta karakteristik sampel. Data hasil ekstraksi kemudian dianalisis secara naratif untuk menjawab pertanyaan penelitian. Artikel-artikel yang memiliki kesamaan tema dikelompokkan dan dianalisis secara deskriptif sesuai dengan fokus studi. Proses seleksi artikel ditampilkan dalam diagram alur PRISMA sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1

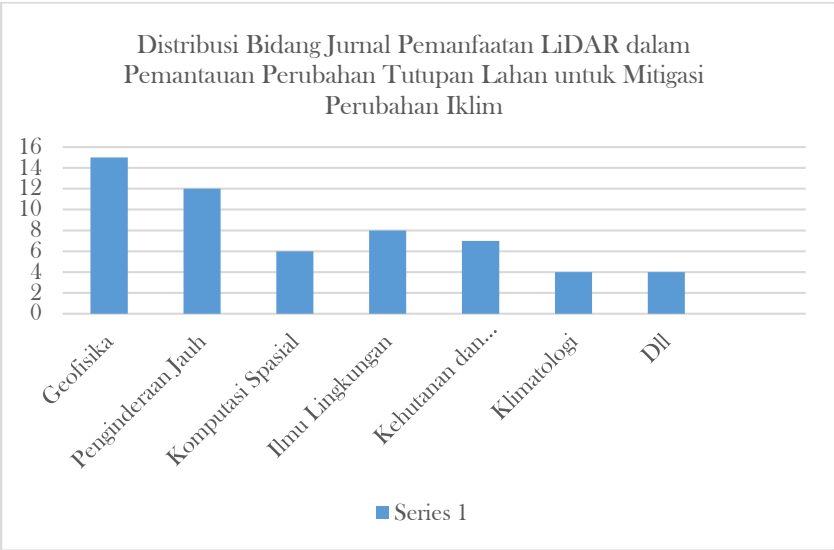


Gambar 1. Diagram Alir PRISMA Proses Seleksi Literatur

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis literatur 9 tahun terakhir menunjukkan tren peningkatan signifikan dalam penggunaan LiDAR untuk studi perubahan iklim. Sejak 2015, jumlah publikasi yang menggunakan LiDAR untuk topik seperti deforestasi, urbanisasi, dan estimasi karbon meningkat hampir dua kali lipat. Hal ini mencerminkan pengakuan global terhadap efektivitas LiDAR dalam mendukung studi iklim yang berbasis data presisi. Studi dari Amazon, Afrika Tengah, hingga Asia Tenggara menunjukkan bahwa integrasi LiDAR dengan model iklim spasial mampu meningkatkan akurasi prediksi dan penilaian risiko [16].

Penggunaan LiDAR di kawasan tropis menjadi bukti konkret kontribusinya dalam studi iklim. Melalui misi GEDI, Duncanson et al. [17] menggunakan data LiDAR untuk mengembangkan model kepadatan biomassa di atas permukaan tanah secara global, termasuk di wilayah tropis yang sulit dijangkau oleh sensor optik. Di Kalimantan, [18] menerapkan UAV-LiDAR untuk mengukur karbon yang dilepaskan dari kebakaran gambut secara akurat. Studi ini membuktikan bahwa LiDAR menjadi alat penting dalam pemantauan perubahan lahan di wilayah tropis yang rentan terhadap degradasi dan berkontribusi besar terhadap emisi karbon global.



Gambar 2. Distribusi Bidang Penelitian dalam Artikel tentang Pemanfaatan LiDAR dalam Pemantauan Perubahan Tutupan Lahan untuk Mitigasi Perubahan Iklim (2015–2025)

Gambar distribusi menunjukkan bahwa mayoritas artikel sejak tahun 2015 sampai 2024 terkait teknologi laser pada LiDAR untuk pemantauan perubahan tutupan lahan berasal dari bidang geofisika dan penginderaan jauh, masing-masing menyumbang proporsi terbesar publikasi. Hal ini mencerminkan dominasi aplikasi LiDAR dalam studi topografi, deformasi permukaan, dan deteksi vegetasi. Bidang lain seperti komputasi spasial, ilmu lingkungan, kehutanan, dan klimatologi juga menunjukkan kontribusi signifikan, menegaskan sifat multidisipliner dari teknologi ini. Temuan ini memperkuat posisi LiDAR sebagai alat penting dalam studi perubahan iklim berbasis data spasial dan pengamatan bumi.

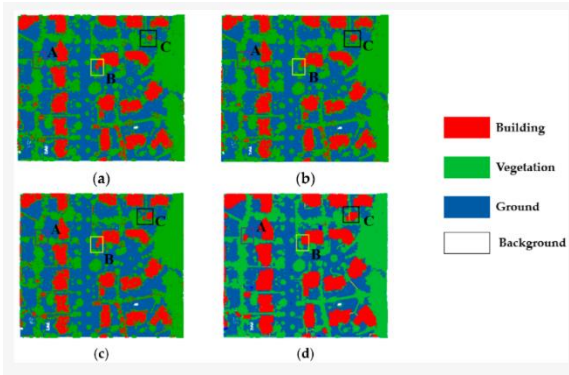
Tabel 2. Ringkasan Temuan Penelitian tentang Pemanfaatan LiDAR dalam Pemantauan Perubahan Tutupan Lahan untuk Mitigasi Perubahan Iklim

No	Nama Penulisan dan Tahun	Judul Artikel	Hasil Temuan
1	(Duncanson <i>et al.</i> , 2022)	Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission	Model mampu memperkirakan biomassa dengan akurasi tinggi; berguna untuk program REDD+ dan pemantauan emisi karbon

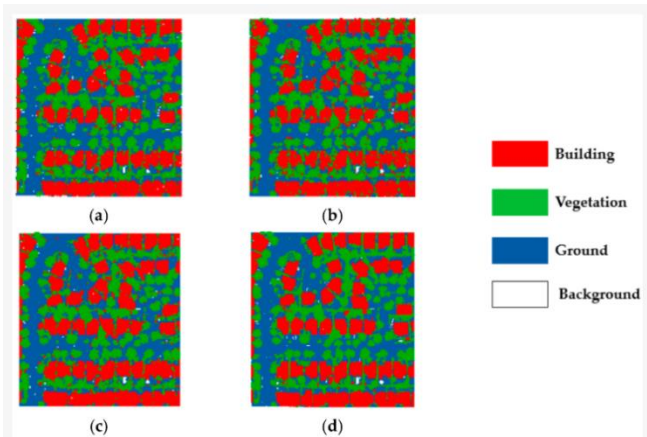
2	(Vernimmen <i>et al.</i> , 2019)	Creating a lowland and peatland landscape digital terrain model (DTM) from interpolated partial coverage LiDAR data for Central Kalimantan and East Sumatra, Indonesia	Model DTM membantu identifikasi area rawan kebakaran dan perubahan elevasi pada lahan gambut
3	(D. Zhao, L. Ji, and F, 2023)	Land Cover Classification Based on Airborne LiDAR Point Cloud with Possibility Method and Multi-Classifie	Klasifikasi mencapai akurasi tinggi (>90%) dalam mengidentifikasi bangunan, vegetasi, dan permukaan terbuka
4	(C. Doyle, S. Luzzadder-Beach, and T. Beach, 2023)	Advances in remote sensing of the early Anthropocene in tropical wetlands: From biplanes to LiDAR and machine learning	LiDAR dan AI meningkatkan kemampuan deteksi perubahan sejarah dan struktur ekosistem di kawasan basah tropis
5	(S. Debnath, M. Paul, and T. Debnath, 2023)	Applications of LiDAR in Agriculture and Future Research Directions	LiDAR efektif dalam estimasi biomassa tanaman, monitoring pertumbuhan, dan penilaian kesehatan tanah
6	(S. K. Choi, R. A. Ramirez, and T. H. Kwon, 2023)	Acquisition of high-resolution topographic information in forest environments using integrated UAV-LiDAR system: System development and field demonstration	Sistem berhasil menghasilkan peta topografi presisi tinggi di area hutan yang sulit diakses
7	(M. Azari, L. Billa, and A. Chan, 2022)	Multi-temporal analysis of past and future land cover change in the highly urbanized state of Selangor, Malaysia	Perubahan penggunaan lahan berkorelasi langsung dengan peningkatan suhu permukaan dan efek pulau panas perkotaan
8	R. H. Topaloglu, G. A. Aksu, Y. A. G. Ghale, and E. Sertel, 2022)	High-resolution land use and land cover change analysis using GEOBIA and landscape metrics: A case of Istanbul, Turkey	LiDAR meningkatkan akurasi analisis dinamika penggunaan lahan di perkotaan
9	(A. Tariq and H. Shu, 2020)	CA-Markov chain analysis of seasonal land surface temperature and land use land cover change using optical multi-temporal satellite data of Faisalabad, Pakistan	Perubahan tutupan lahan memengaruhi pola suhu musiman dan mikroiklim perkotaan

3.1 Integrasi LiDAR dengan Teknologi Pendukung

LiDAR (Light Detection and Ranging) bekerja dengan memancarkan pulsa laser dan mengukur waktu tempuh pantulannya untuk menghasilkan representasi tiga dimensi permukaan bumi. Dengan kemampuan ini, LiDAR mampu menghasilkan *point cloud* yang sangat detail, memungkinkan klasifikasi tutupan lahan secara akurat [19]. Salah satu keunggulan utama LiDAR dibandingkan citra optik adalah kemampuannya menembus lapisan kanopi vegetasi hingga ke permukaan tanah [20]. Hal ini sangat penting dalam studi hutan tropis, di mana kanopi sering kali rapat dan sulit ditembus oleh sensor optik. Selain itu, LiDAR relatif tidak terpengaruh oleh kondisi awan atau pencahayaan, sehingga cocok digunakan di daerah dengan curah hujan tinggi.



Gambar 3. Visualisasi Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan Berbasis Point Cloud LiDAR
Sumber: Zhao et al. (2023)



Gambar 4. Visualisasi Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan Berbasis Point Cloud LiDAR
Sumber: Zhao et al. (2023)

3.2 Aplikasi LiDAR dalam Estimasi Biomassa dan Stok Karbon

LiDAR banyak digunakan untuk menghitung biomassa di atas permukaan tanah (*Above Ground Biomass/AGB*), yang berkorelasi erat dengan cadangan karbon. Dengan mengukur tinggi pohon, volume kanopi, dan densitas vegetasi, LiDAR memberikan hasil yang lebih realistis dibandingkan citra optik biasa. Beberapa studi melaporkan akurasi estimasi AGB hingga 90–95% saat menggunakan LiDAR airborne atau UAV, sedangkan metode konvensional hanya mencapai 65–80% [21]. Di kawasan hutan tropis seperti Amazon dan Kalimantan, informasi struktur vertikal hutan yang dihasilkan oleh LiDAR sangat bernilai untuk memahami dinamika penyimpanan karbon. Hal ini menjadikan LiDAR sebagai alat kunci dalam pelaksanaan program REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*), khususnya dalam memvalidasi klaim konservasi dan reforestasi serta menyusun laporan emisi nasional sesuai standar UNFCCC.

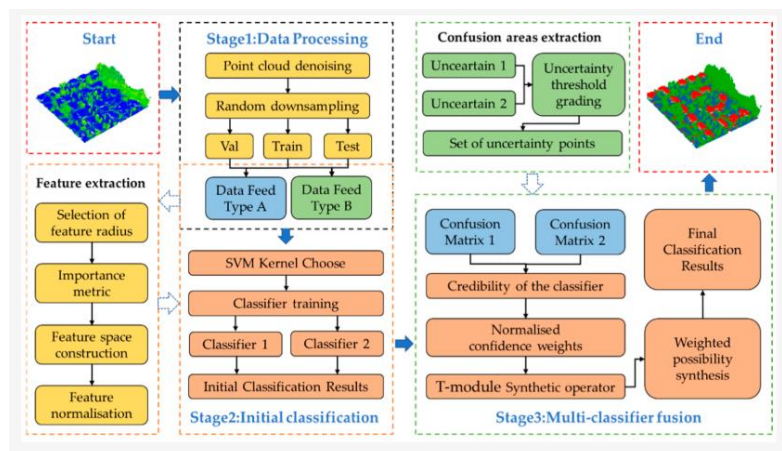
Tabel 3. Perbandingan Akurasi Estimasi Biomassa

LiDAR Type	Analytical Method	Model	Features	Results
Terrestrial	SLR; PMCC	3D volumetric model	The volume of woody tissue of vines	Volumes calculated from LIDAR data range between 1.31 and 10.61 L. Volumes obtained from analogue measurement range between 0.83 and 5.05 L. The SLR of analogue volume on LiDAR-based volume indicates that slope values range from 0.43 to

				0.54. Furthermore, the PMCC ranges between 0.73 and 0.97 [35].
Terrestrial	SLR;LSR;SMR; ANN; RFR		Height; canopy cover; canopy volume	At the plot level: LSR and SLR had R^2 of 0.79 and 0.80, respectively. The R^2 of SMR, ANN and RF were 0.80, 0.68 and 0.79, respectively. At the individual plant level: LSR and SLR had R^2 of 0.93 and 0.96, respectively. The R^2 of SMR, ANN and RF were 0.94, 0.93 and 0.94, respectively. In the leaf group level: LSR and SLR had R^2 of 0.95 and 0.92, respectively. The R^2 of SMR, ANN and RF were 0.97, 0.97 and 0.97, respectively. At the stem level: LSR and SLR had R^2 of 0.93 and 0.94, respectively. The R^2 and RMSE of SMR, ANN and RF were 0.94, 0.95 and 0.95, respectively [14].
Terrestrial	SLR	DSM; DTM	Vegetation volume; NNI; canopy height; canopy volume	Relationships between observed physical proxies and LIDAR-derived vegetation volume for all seasons and growth stages were with $R^2 \geq 0.72$. The range of relationships between the actual nitrogen concentration and green laser return Intensity was $R^2 = 0.10-0.75$ [36].
Terrestrial	Percentile algorithm; Pearson's correlation coefflclent (r); SLR		AGB; CH; LPV; LCH	The correlations between AGB and LPV were up to $r = 0.86$. The correlations between CH and LCH were up to $r = 0.94$ [37].

Sumber: Debnath et al. (2023)

LiDAR memungkinkan pemantauan perubahan tutupan lahan secara temporal (time series) dengan ketelitian tinggi. Hal ini sangat bermanfaat untuk mendeteksi deforestasi, degradasi lahan, maupun upaya reforestasi. Studi oleh [20] di kawasan tropis menunjukkan bahwa LiDAR mampu mendeteksi perubahan kerapatan kanopi hutan akibat aktivitas manusia seperti pembukaan lahan dan pembangunan infrastruktur, bahkan dalam skala kecil.



Gambar 5. Alur Kerja Pemantauan Perubahan Tutupan Lahan dengan LiDAR

3.3 Integrasi LiDAR dengan Teknologi Pendukung

Akurasi dan efisiensi aplikasi LiDAR meningkat signifikan ketika dikombinasikan dengan data lain seperti citra multispektral (NDVI, Sentinel-2), radar (SAR), serta teknologi machine learning dan AI. Contohnya, sistem integrasi UAV-LiDAR dengan klasifikasi berbasis AI telah mencapai akurasi klasifikasi tutupan vegetasi hingga 97%, jauh lebih tinggi dibandingkan penggunaan data tunggal [22].

3.4 Peran LiDAR dalam Mitigasi Bencana dan Permodelan Iklim

Selain untuk studi vegetasi dan karbon, LiDAR juga digunakan untuk menghasilkan model elevasi digital (*Digital Elevation Model/DEM*) dan model tinggi kanopi (*Canopy Height Model/CHM*) dengan resolusi tinggi. Data ini menjadi dasar dalam simulasi hidrologi, analisis erosi, serta mitigasi risiko bencana seperti banjir dan longsor [23]. Presisi vertikal LiDAR memungkinkan pendeteksian perbedaan elevasi kecil yang penting dalam prediksi aliran air dan dampak kenaikan muka laut, terutama di daerah pesisir. Dalam konteks perubahan iklim, informasi topografi dan struktur vegetasi dari LiDAR sangat berharga untuk memodelkan perubahan mikroiklim, albedo permukaan, dan siklus hidrologi [24].

LiDAR telah digunakan secara luas untuk mendukung implementasi dan validasi program REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*), terutama dalam menghitung baseline emisi karbon dan memantau perubahan tutupan hutan dari waktu ke waktu. Data LiDAR memberikan bukti spasial yang kuat atas klaim reforestasi dan konservasi hutan oleh negara-negara tropis yang menerima kompensasi karbon. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan UAV-LiDAR di lahan gambut Kalimantan berhasil mendeteksi emisi dari kebakaran dengan akurasi tinggi, membantu Indonesia menyusun laporan karbon nasional yang sesuai dengan standar UNFCCC [18].

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis sistematis literatur lima tahun terakhir (2015–2024), dapat disimpulkan bahwa teknologi LiDAR memainkan peran penting dalam pemantauan perubahan tutupan lahan, khususnya dalam konteks studi perubahan iklim. Dengan kemampuan menghasilkan data geospasial tiga dimensi secara presisi tinggi, LiDAR efektif digunakan untuk mendeteksi deforestasi, mengestimasi biomassa, memodelkan dinamika iklim, serta menilai risiko bencana lingkungan. Pemanfaatan LiDAR semakin optimal ketika diintegrasikan dengan teknologi pendukung seperti UAV, citra multispektral, dan kecerdasan buatan. Di wilayah tropis seperti Amazon dan Kalimantan, LiDAR telah terbukti mampu mendeteksi degradasi hutan secara detail dan mengestimasi emisi karbon akibat kebakaran lahan gambut. Teknologi ini juga berkontribusi dalam implementasi program REDD+ dan penyusunan laporan emisi nasional yang selaras dengan standar internasional. Kajian ini mengisi kekosongan sintesis sistematis sebelumnya dengan fokus khusus pada pemanfaatan LiDAR dalam studi perubahan iklim. Namun, kajian ini terbatas pada literatur dalam bahasa Inggris dan Indonesia yang diterbitkan antara tahun 2015 hingga 2024. Sebagai rekomendasi untuk penelitian lanjutan, pengembangan integrasi LiDAR dengan algoritma machine learning berpotensi meningkatkan prediksi spasial perubahan tutupan lahan secara real-time, sekaligus memperkuat kapasitas negara berkembang dalam penerapan kebijakan iklim berbasis data spasial akurat.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Civitas Akademika Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Sriwijaya sebagai lembaga penelitian yang telah memberikan dukungan fasilitas, infrastruktur, serta akses terhadap sumber daya akademik dalam penyusunan artikel ini. Apresiasi juga disampaikan kepada para dosen, dan mahasiswa yang telah turut membantu proses pengumpulan dan analisis data selama penelitian berlangsung. Segala kritik dan saran yang membangun sangat dihargai untuk pengembangan riset di masa mendatang.

Daftar Pustaka

- [1] M. O. Dinka and D. D. Chaka, "Analysis of land use/land cover change in Adei watershed, Central Highlands of Ethiopia," *J. Water L. Dev.*, 2019, doi: 10.2478/jwld-2019-0038.
- [2] T. A. Teo and H. M. Wu, "Analysis of land cover classification using multi-wavelength LiDAR system," *Appl. Sci.*, 2017, doi: 10.3390/app7070663.
- [3] M. G. Munthali, J. O. Botai, N. Davis, and A. M. Adeola, "Multi-temporal analysis of land use and land cover change detection for dedza district of Malawi using geospatial techniques," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 2019.
- [4] S. Ullah, K. Ahmad, R. U. Sajjad, A. M. Abbasi, A. Nazeer, and A. A. Tahir, "Analysis and simulation of land cover changes and their impacts on land surface temperature in a lower Himalayan region," *J. Environ. Manage.*, 2019, doi:

- 10.1016/j.jenvman.2019.05.063.
- [5] W. Y. Yan, A. Shaker, and N. El-Ashmawy, "Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review," 2015. doi: 10.1016/j.rse.2014.11.001.
- [6] R. H. Topaloğlu, G. A. Aksu, Y. A. G. Ghale, and E. Sertel, "High-resolution land use and land cover change analysis using GEOBIA and landscape metrics: A case of Istanbul, Turkey," *Geocarto Int.*, 2022, doi: 10.1080/10106049.2021.2012273.
- [7] A. Tariq and H. Shu, "CA-Markov chain analysis of seasonal land surface temperature and land use landcover change using optical multi-temporal satellite data of Faisalabad, Pakistan," *Remote Sens.*, 2020, doi: 10.3390/rs12203402.
- [8] M. Alemu, B. Warkineh, E. Lulekal, and Z. Asfaw, "Analysis of land use land cover change dynamics in Habru District, Amhara Region, Ethiopia," *Heliyon*, vol. 10, no. 19, p. e38971, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e38971.
- [9] M. Azari, L. Billa, and A. Chan, "Multi-temporal analysis of past and future land cover change in the highly urbanized state of Selangor, Malaysia," *Ecol. Process.*, 2022, doi: 10.1186/s13717-021-00350-0.
- [10] M. N. Favorskaya and L. C. Jain, "Overview of LiDAR technologies and equipment for land cover scanning," in *Intelligent Systems Reference Library*, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-52308-8_2.
- [11] J. H. Churnside and J. A. Shaw, "Lidar remote sensing of the aquatic environment: invited," *Appl. Opt.*, 2020, doi: 10.1364/ao.59.000c92.
- [12] J. Wang *et al.*, "Laser machining fundamentals: micro, nano, atomic and close-to-atomic scales," *Int. J. Extrem. Manuf.*, vol. 5, no. 1, 2023, doi: 10.1088/2631-7990/acb134.
- [13] X. Wang, H. Pan, K. Guo, X. Yang, and S. Luo, "The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020. doi: 10.1088/1755-1315/502/1/012008.
- [14] S. Pan *et al.*, "Land-cover classification of multispectral LiDAR data using CNN with optimized hyper-parameters," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2020, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.022.
- [15] D. Hanto *et al.*, "Time of Flight Lidar Employing Dual-Modulation Frequencies Switching for Optimizing Unambiguous Range Extension and High Resolution," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2023, doi: 10.1109/TIM.2023.3235450.
- [16] M. Zhang *et al.*, "Phase-Modulated Continuous-Wave Coherent Ranging Method and Anti-Interference Evaluation," *Appl. Sci.*, 2023, doi: 10.3390/app13095356.
- [17] S. Affan Ahmed, M. Mohsin, and S. M. Zubair Ali, "Survey and technological analysis of laser and its defense applications," 2021. doi: 10.1016/j.dt.2020.02.012.
- [18] R. Verninmen *et al.*, "Creating a lowland and peatland landscape digital terrain model (DTM) from interpolated partial coverage LiDAR data for Central Kalimantan and East Sumatra, Indonesia," *Remote Sens.*, 2019, doi: 10.3390/rs11101152.
- [19] L. Duncanson *et al.*, "Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission," *Remote Sens. Environ.*, 2022, doi: 10.1016/j.rse.2021.112845.
- [20] D. Zhao, L. Ji, and F. Yang, "Land Cover Classification Based on Airborne Lidar Point Cloud with Possibility Method and Multi-Classifer," *Sensors (Basel)*, 2023, doi: 10.3390/s23218841.
- [21] C. Doyle, S. Luzzadder-Beach, and T. Beach, "Advances in remote sensing of the early Anthropocene in tropical wetlands: From biplanes to lidar and machine learning," *Prog. Phys. Geogr.*, 2023, doi: 10.1177/03091333221134185.
- [22] S. Debnath, M. Paul, and T. Debnath, "Applications of LiDAR in Agriculture and Future Research Directions," 2023. doi: 10.3390/jimaging9030057.
- [23] S. K. Choi, R. A. Ramirez, and T. H. Kwon, "Acquisition of high-resolution topographic information in forest environments using integrated UAV-LiDAR system: System development and field demonstration," *Heliyon*, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20225.
- [24] M. K. Jindal, M. Mainuddin, S. Veerabuthiran, and A. K. Razdan, "Laser-Based Systems for Standoff Detection of CWA: A Short Review," 2021. doi: 10.1109/JSEN.2020.3030672.