Era Sains: Journal of Science, Engineering and Information Systems Research
Vol. 2, No. 2, Juni 2026
e-ISSN: xxxx-xxxx, p-ISSN: xxxx-xxxx, Hlm. 6-11

Analisis Ekonomi Lapis Pondasi Bawah *Telford* Vs *Rigid Pavement* menggunakan *Life Cycle Cost Analysis*

Economic Analysis of Telford Subbase Layers Vs Rigid Pavement Using Life Cycle Cost Analysis

Agus Prasetio[1]*, Abdul Khamid[2], Mohamad Tolani[3], Wahidin[4], Abdul Latif Nurdin[5]
[1,2,3,4,5]Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhadi Setiabudi, Brebes, Indonesia
E-mail: [1*]aguspt.89@gmail.com, [2]abdulkhamid.mt@gmail.com, [3]uj_pesdm@yahoo.co.id,
[4]wahidinnaures@gmail.com, [5]studiokp3k.brebes@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: April 06, 2026
Revised: May 15, 2026
Accepted: June 20, 2026

Keywords:
Life Cycle Cost Analysis,
Subbase Layer,
Telford Construction,
Rigid Pavement,
Cost Efficiency

ABSTRACT

The growing demand for road construction and maintenance requires sub-base solutions that are not only technically reliable but also economically efficient in the long term. This study compares the economic efficiency of Telford (crushed stone) and Rigid (concrete) sub-base methods using the Life Cycle Cost Analysis (LCCA) approach. The 20-year LCCA simulation with a 4% discount rate integrates data from the 2024 Ministry of Public Works and Housing (PUPR) Unit Price Analysis (AHSP), experimental studies on concrete, and historical road maintenance data. The analysis covers initial construction costs, maintenance, rehabilitation, and sensitivity tests on material inflation and traffic volume. The rigid sub-base demonstrates economic advantages with an NPV of IDR 3.3 billion/km (vs. Telford: IDR 3.9 billion/km), despite having 44% higher initial costs. Telford's maintenance costs are 38% higher due to increased repair frequency. For traffic volumes exceeding 500 vehicles/day, the rigid sub-base reaches its break-even point in the 8th year. Based on traffic volume, the technical recommendation suggests that Telford is optimal for local roads (<300 vehicles/day), while rigid sub-base is more economical for arterial roads (>500 vehicles/day).

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Corresponding Author:
Agus Prasetio
Email: aguspt.89@gmail.com

Abstrak

Tingginya kebutuhan pembangunan dan pemeliharaan jalan yang menuntut solusi lapis pondasi bawah (*sub-base*) yang tidak hanya kuat secara teknis tetapi juga efisien secara ekonomi dalam jangka panjang. Penelitian ini membandingkan efisiensi ekonomi lapis pondasi bawah metode *Telford* (batu belah) dan *Rigid* (beton) menggunakan pendekatan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Simulasi LCCA periode 20 tahun dengan tingkat diskonto 4%, mengintegrasikan data *Analisis* Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) Kementerian PUPR 2024, studi eksperimental beton, dan data historis pemeliharaan jalan. Analisis mencakup biaya konstruksi awal, pemeliharaan, rehabilitasi, serta uji sensitivitas terhadap inflasi material dan volume lalu lintas. *Rigid sub-base* menunjukkan keunggulan ekonomi dengan NPV Rp3,3 miliar/km (vs Telford: Rp3,9 miliar/km), meskipun biaya awal 44% lebih tinggi. Biaya pemeliharaan Telford 38% lebih tinggi akibat frekuensi perbaikan yang meningkat. Volume lalu lintas >500 kendaraan/hari, rigid mencapai *break-even point* pada tahun ke-8. Rekomendasi teknis berbasis volume lalu lintas: Telford optimal untuk jalan lokal (<300 kend./hari), sedangkan rigid lebih ekonomis untuk jalan arteri (>500 kend./hari).

Kata Kunci: *Life_Cycle_Cost_Analysis*, Lapis_Pondasi_Bawah, Konstruksi_Telford, *Rigid_Pavement*, Efisiensi_Biaya

1. PENDAHULUAN

Lapis pondasi bawah *(sub-base)* merupakan salah satu elemen krusial dalam konstruksi perkerasan jalan yang berperan menyumbang sekitar 25–30% terhadap kekuatan struktural jalan [1]. Keberadaan lapis pondasi bawah tidak hanya menentukan stabilitas perkerasan, tetapi juga

memengaruhi umur layanan serta efisiensi biaya pemeliharaan jangka panjang [2]. Di Indonesia, terdapat dua metode utama yang umum digunakan, yaitu metode *Telford* yang menggunakan material batu belah dan metode *Rigid* yang berbasis beton [3]. Kedua pendekatan tersebut memiliki karakteristik teknis yang berbeda, pemilihan metode di lapangan umumnya masih didominasi oleh pertimbangan biaya awal, tanpa memperhatikan komponen biaya siklus hidup secara komprehensif.

Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan untuk menggeser paradigma perencanaan konstruksi jalan dari sekadar berorientasi pada *initial cost* menuju pendekatan yang lebih menyeluruh melalui *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). Pertimbangan biaya siklus hidup sangat penting mengingat tingginya biaya pemeliharaan dan rehabilitasi jalan di Indonesia yang sering kali melebihi perkiraan awal akibat minimnya analisis jangka panjang dalam proses perencanaan. Efisiensi anggaran pembangunan infrastruktur nasional yang dialokasikan setiap tahun akan sangat ditentukan oleh kemampuan perencana dalam memilih metode konstruksi yang tidak hanya ekonomis pada tahap awal, tetapi juga berkelanjutan dalam jangka panjang [4].

Penelitian terdahulu memberikan landasan bagi kajian ini. Aimelda [5] menyoroti adanya kesenjangan dalam evaluasi biaya jangka panjang perkerasan, khususnya pada aspek durabilitas material dan pola pemeliharaan. Mohod [6] menunjukkan bahwa meskipun rigid pavement memiliki biaya awal lebih tinggi dibanding flexible pavement, biaya pemeliharaan jangka panjangnya cenderung lebih rendah. Gonzales [7] menekankan pentingnya mengintegrasikan analisis biaya dengan pendekatan *life cycle assessment* (LCA) untuk menilai dampak lingkungan dari berbagai jenis perkerasan. Fauzi [8] menggarisbawahi peran material lokal dalam menekan biaya pembangunan jalan pedesaan, meskipun studi mengenai integrasi material lokal dengan analisis biaya siklus hidup masih terbatas.

Penelitian ini difokuskan pada tiga rumusan masalah utama: bagaimana komposisi biaya siklus hidup metode *Telford* dibandingkan dengan metode Rigid; dalam kondisi operasional seperti apa metode *Rigid* lebih ekonomis; faktor non-ekonomis apa saja yang turut memengaruhi kelayakan penggunaan kedua metode tersebut. Tujuan penelitian ini adalah menyusun model LCCA untuk membandingkan total biaya antara metode *Telford* dan *Rigid* dalam periode analisis 20 tahun, dengan memasukkan pertimbangan aspek teknis, lingkungan, serta ketersediaan material lokal sebagai variabel penentu dalam pengambilan keputusan.

Lapis Pondasi *Telford*

Lapis pondasi *Telford* merupakan konstruksi tradisional yang menggunakan material batu belah berukuran 7–20 cm, yang kemudian ditutup dengan lapisan pasir setebal 10–15 cm [9]. Keunggulan utama metode ini terletak pada biaya awal yang relatif rendah, yaitu sekitar Rp1,8 miliar per kilometer, sehingga menjadi alternatif yang ekonomis, khususnya untuk pembangunan jalan di daerah terpencil yang terbatas akses terhadap alat berat. Fleksibilitas aplikasinya memungkinkan konstruksi tetap dapat dilaksanakan meskipun kondisi geografis kurang mendukung. Kelemahan signifikan dari metode ini adalah kecenderungan mengalami deformasi vertikal lebih dari 12 mm setelah lima tahun operasi, yang berdampak pada penurunan kenyamanan dan umur layan perkerasan [10].

Lapis Pondasi *Rigid*

Berbeda dengan metode *Telford*, lapis pondasi *Rigid* menggunakan material beton mutu K-250 hingga K-400 dengan ketebalan 15–20 cm yang diperkuat dengan tulangan baja. Studi [11] menunjukkan bahwa penggunaan rigid sub-base mampu meningkatkan daktilitas material hingga 76,6% dibandingkan dengan beton konvensional, sehingga memberikan ketahanan lebih tinggi terhadap beban lalu lintas berat. Keunggulan lain dari metode ini adalah kemampuannya dalam mengurangi kebutuhan tebal lapisan permukaan hingga 25% serta menurunkan frekuensi pemeliharaan sebesar 60%. Hal tersebut menjadikan rigid sub-base sebagai opsi yang menjanjikan dalam konteks efisiensi jangka panjang, meskipun biaya awal konstruksinya relatif lebih tinggi dibandingkan dengan metode Telford.

***Life Cycle Cost Analysis* (LCCA)**

Pendekatan LCCA digunakan untuk menilai kelayakan ekonomi antara kedua metode tersebut. Metode ini menghitung total biaya aset selama umur layan jalan dengan memperhitungkan biaya awal, biaya pemeliharaan, serta biaya rehabilitasi [12]. Model matematis LCCA dapat dinyatakan dalam bentuk.

NPV = C_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{C_m}{(1+r)^t} + \frac{R}{(1+r)^n}

Keterangan:

C_0 = Biaya konstruksi awal
C_m = Biaya pemeliharaan tahun ke-t
R = Biaya rehabilitasi
r = Tingkat diskonto (4%)

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode LCCA untuk membandingkan kelayakan ekonomi antara lapis pondasi bawah *Telford* dan lapis pondasi *Rigid.* Tahapan penelitian dirancang secara sistematis mulai dari pengumpulan data, penyusunan skenario analisis, hingga simulasi model dan validasi hasil. Data penelitian diperoleh dari kombinasi sumber primer dan sekunder. Data biaya konstruksi dihimpun berdasarkan AHSP Kementerian PUPR tahun 2024 serta lima dokumen tender proyek jalan yang mewakili wilayah Jawa dan Sumatera. Untuk biaya pemeliharaan, digunakan hasil wawancara dengan 12 kontraktor bersertifikasi PUPR serta laporan operasi dan pemeliharaan (O&P) jalan periode 2019–2024. Parameter teknis dikumpulkan melalui uji kuat tekan beton sesuai standar ASTM C39 serta data deformasi lapis pondasi Telford dari literatur terdahulu [13].

Analisis dilakukan dengan menetapkan beberapa skenario agar hasil lebih representatif. Periode analisis ditetapkan selama 20 tahun, dengan tingkat diskonto sebesar 4% yang merefleksikan BI Rate tahun 2025. Variasi volume lalu lintas dikategorikan menjadi rendah (200 kendaraan/hari) hingga tinggi (1.000 kendaraan/hari), sedangkan faktor inflasi material dianalisis dalam dua kondisi, yaitu baseline dan kenaikan sebesar 20%. Hasil analisis dapat mencerminkan sensitivitas model terhadap perubahan kondisi operasional dan ekonomi. Prosedur penelitian dilakukan melalui empat tahapan utama. Pertama, dilakukan kuantifikasi biaya konstruksi awal untuk masing-masing metode pondasi berdasarkan AHSP dan data tender. Kedua, biaya pemeliharaan diproyeksikan menggunakan model regresi linier terhadap data historis O&P. Ketiga, perhitungan *Net Present Value* (NPV) dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Excel yang diintegrasikan dengan add-in @RISK untuk mensimulasikan variabilitas parameter dan menghasilkan distribusi probabilistik biaya siklus hidup. Keempat, hasil model divalidasi menggunakan *Delphi Method* dengan melibatkan tujuh pakar infrastruktur, yang terdiri atas akademisi, praktisi konstruksi, serta perencana jalan, guna memastikan keandalan dan relevansi model dengan kondisi nyata di lapangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi Biaya (per Km)

Komposisi biaya (per Km) pada penelitian ini dianalisis dengan membandingkan struktur pengeluaran antara metode *Telford* dan *Rigid*. Perhitungan dilakukan berdasarkan tiga komponen utama, yaitu biaya konstruksi awal, biaya pemeliharaan rutin selama sepuluh tahun, serta biaya rehabilitasi pada tahun ke-15. Seluruh komponen biaya dinyatakan dalam bentuk NPV dengan tingkat diskonto sebesar 4% untuk memberikan representasi nilai ekonomi yang setara. Pendekatan ini memungkinkan perbandingan yang objektif terhadap beban biaya sepanjang umur layanan jalan, sehingga memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai efisiensi jangka panjang dari masing-masing metode. Temuan ini memberikan gambaran penting bagi perencanaan ekonomi proyek, khususnya dalam memilih metode konstruksi yang optimal dari segi efisiensi biaya jangka panjang.

Rincian hasil perbandingan komponen biaya kedua metode ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 1. Telford Didominasi Pemeliharaan (38%), Sementara Rigid Didominasi Biaya Awal (79%)

Komponen Biaya	Telford (Rp miliar)	Rigid (Rp miliar)
Konstruksi Awal (C_0)	1.8	2.6
Pemeliharaan (Tahun 1-10)	0.9	0.3
Rehabilitasi (Tahun 15)	1.2	0.4
Total NPV (r=4%)	3.9	3.3

Sumber: Data yang diolah, 2025

Tabel 1 memperlihatkan biaya awal *Telford* lebih rendah dibandingkan *Rigid*. Nilai pemeliharaan dan rehabilitasi Telford relatif tinggi, sehingga total NPV mencapai Rp3,9 miliar/km. Total NPV Rigid sebesar Rp3,3 miliar/km menunjukkan efisiensi jangka panjang meskipun konstruksi awal lebih besar. Perbedaan ini menegaskan bahwa daya tahan Rigid menghasilkan penghematan biaya pemeliharaan yang signifikan.

Pengaruh Volume Lalu Lintas

Evaluasi biaya berdasarkan volume lalu lintas menunjukkan perbedaan pola efisiensi antar metode. Pada arus lalu lintas rendah sebesar 200 kendaraan per hari, *Telford* lebih ekonomis dengan total NPV 12% lebih rendah dibandingkan *Rigid.* Kondisi berbeda terjadi pada arus lalu lintas tinggi sebesar 1.000 kendaraan per hari. Perhitungan menunjukkan *Rigid* mulai lebih hemat setelah tahun ke-8 dengan penghematan akumulatif mencapai Rp600 juta/km pada akhir periode analisis. Temuan ini menegaskan bahwa keunggulan *Rigid* semakin dominan pada kondisi operasional dengan beban lalu lintas berat.

Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas memberikan pemahaman mengenai sejauh mana perubahan faktor eksternal dapat memengaruhi total biaya siklus hidup masing-masing metode [14]. Pengujian dilakukan pada dua skenario utama, yaitu kenaikan harga material sebesar 20% dan peningkatan beban gandar hingga 15 ton. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Sensitivitas terhadap Biaya Siklus Hidup

Skenario	Δ NPV Telford	Δ NPV Rigid
Inflasi material +20%	+22%	+15%
Peningkatan beban gandar 15 ton	+18%	+9%

Sumber: Data yang diolah, 2025

Tabel 2 menunjukkan *Telford* lebih rentan terhadap perubahan harga material maupun peningkatan beban lalu lintas. Kenaikan inflasi material sebesar 20% meningkatkan NPV *Telford* sebesar 22%, sedangkan Rigid hanya naik 15%. Beban gandar tinggi berdampak pada peningkatan NPV *Telford* hingga 18%, sementara *Rigid* hanya 9%. Hasil ini menegaskan bahwa *Rigid* lebih stabil terhadap ketidakpastian ekonomi maupun teknis.

Aspek Non-Ekonomis

Evaluasi non-ekonomi memberikan dimensi tambahan dalam membandingkan kedua metode. Melihat dari perspektif lingkungan, *Rigid* menghasilkan emisi CO_2 lebih rendah sekitar 15–20% karena kebutuhan pemeliharaan yang lebih sedikit [15]. Melihat dari sisi ketersediaan material, *Telford* lebih unggul pada daerah kepulauan yang memiliki sumber daya batu lokal melimpah [16]. *Rigid* lebih sesuai diterapkan di kawasan perkotaan yang memiliki akses material beton dan infrastruktur pendukung. Pertimbangan ini memperkaya analisis dengan menempatkan faktor keberlanjutan dan ketersediaan sumber daya lokal sebagai variabel penting dalam pengambilan keputusan.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan komposisi biaya antara metode *Telford* dan *Rigid* memberikan implikasi penting terhadap strategi pemilihan lapis pondasi bawah. Biaya awal *Telford* lebih rendah, namun dominasi komponen pemeliharaan dan rehabilitasi menyebabkan total

NPV menjadi lebih tinggi. *Rigid* membutuhkan investasi awal lebih besar, tetapi efisiensi pemeliharaan menghasilkan total NPV lebih rendah sehingga memberikan keuntungan jangka panjang [17]. Struktur biaya ini memperlihatkan bahwa *Rigid* memiliki daya tahan yang lebih baik dalam siklus hidup konstruksi jalan.

Evaluasi berdasarkan volume lalu lintas memperkuat temuan terkait perbedaan karakteristik kedua metode. *Telford* lebih ekonomis pada lalu lintas rendah karena kebutuhan pemeliharaan masih dapat ditoleransi [15]. Kondisi berubah pada lalu lintas tinggi ketika beban kendaraan mempercepat degradasi struktur *Telford* sehingga biaya pemeliharaan meningkat signifikan. *Rigid* menunjukkan efisiensi yang semakin kuat pada intensitas lalu lintas tinggi, terbukti dari penghematan akumulatif yang tercapai setelah tahun ke-8. Pola ini menegaskan bahwa pemilihan metode harus mempertimbangkan konteks operasional dan intensitas penggunaan jalan [18].

Analisis sensitivitas menambahkan perspektif mengenai ketahanan masing-masing metode terhadap variabel eksternal. *Telford* lebih rentan terhadap kenaikan harga material dan peningkatan beban lalu lintas berat, tercermin dari lonjakan NPV yang lebih besar dibandingkan *Rigid*. Stabilitas *Rigid* terhadap fluktuasi eksternal menunjukkan bahwa metode ini lebih adaptif terhadap ketidakpastian ekonomi dan teknis. Ketahanan ini menjadi keunggulan penting dalam konteks pembangunan infrastruktur jangka panjang yang menghadapi dinamika pasar material dan pertumbuhan beban transportasi [19].

Aspek non-ekonomis memberikan dimensi tambahan dalam menilai relevansi penerapan kedua metode. *Rigid* lebih ramah lingkungan dengan emisi CO_2 lebih rendah akibat kebutuhan pemeliharaan yang terbatas. *Telford* lebih sesuai di wilayah yang memiliki ketersediaan batu lokal melimpah sehingga meminimalkan ketergantungan pada distribusi material beton. Konteks geografis dan ketersediaan sumber daya menjadi faktor penting dalam menentukan metode yang tepat. Integrasi antara aspek ekonomi, teknis, lingkungan, dan ketersediaan material memperkaya analisis serta memberikan dasar yang lebih komprehensif bagi pengambilan keputusan dalam perencanaan infrastruktur jalan [20]

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapis pondasi bawah *Rigid* lebih ekonomis dalam jangka panjang dengan nilai NPV sebesar Rp3,3 miliar/km, lebih rendah Rp600 juta/km dibandingkan *Telford*. Efisiensi ini terutama disebabkan oleh penurunan biaya pemeliharaan hingga 60%. Volume lalu lintas terbukti menjadi faktor penentu utama dalam pemilihan metode, di mana *Telford* lebih direkomendasikan untuk jalan lokal dengan lalu lintas rendah (<300 kendaraan/hari) dan daerah terpencil yang memiliki keterbatasan akses alat berat maupun material beton. *Rigid* lebih sesuai untuk jalan arteri atau tol dengan volume lalu lintas tinggi (>500 kendaraan/hari) serta wilayah dengan tingkat inflasi material yang tinggi karena stabilitas biaya siklus hidupnya lebih terjaga. Pertimbangan lingkungan juga memperkuat keunggulan Rigid, mengingat metode ini mampu menurunkan emisi CO_2 sebesar 15–20% akibat minimnya aktivitas pemeliharaan. Temuan ini menegaskan perlunya penerapan pendekatan LCCA dalam pengambilan keputusan teknis, agar pilihan desain pondasi jalan tidak hanya berfokus pada biaya awal, tetapi juga mempertimbangkan keberlanjutan ekonomi dan lingkungan.

Strategi pemilihan lapis pondasi bawah perlu diarahkan pada pendekatan kontekstual yang menyesuaikan kondisi operasional, ketersediaan sumber daya, serta target keberlanjutan. Jalan dengan lalu lintas rendah di daerah terpencil lebih rasional menggunakan Telford karena keterbatasan akses material beton dapat diatasi melalui pemanfaatan batu lokal yang melimpah. Jalan arteri dan tol lebih tepat menerapkan Rigid karena ketahanannya terhadap beban lalu lintas berat serta stabilitas biaya dalam jangka panjang. Integrasi aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan menjadi dasar penting dalam merumuskan kebijakan pembangunan infrastruktur jalan yang berorientasi pada efisiensi dan keberlanjutan. Keputusan desain sebaiknya tidak hanya berfokus pada biaya awal, melainkan juga memperhitungkan dampak jangka panjang terhadap biaya pemeliharaan, lingkungan, dan ketersediaan material lokal.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] ASTM, "D6433: Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys," 2023.
[2] H. Zulkifli and A. Putra, "Comparative Life-Cycle Cost of Asphalt and Concrete Pavements in Tropical Climate," *J. Sustain. Infrastruct.*, vol. 7, no. 3, pp. 145–160, 2021.
[3] S. K. Fuller, *Life Cycle Cost Analysis*. 2020.
[4] K. PUPR, *Spesifikasi Umum Jalan 2024*. Jakarta, 2024.
[5] L. Almeida and et al., "Life-Cycle Cost Comparison of Pavement Alternatives," *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 29, no. 1, 2023.
[6] S. Mohod and R. Kadam, "Life-Cycle Cost Analysis of Flexible Pavements and Rigid Pavements in Urban Areas," *IJISRT (International J. Innov. Sci. Res. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 24–31, 2017.
[7] R. Gonzalez and F. Pereira, "Implementation of LCA and LCCA Analysis for Pavement Type Selection," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 50–62, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.045.
[8] I. Fauzi, "Material Lokal untuk Konstruksi Jalan Pedesaan," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UNNES*, 2022.
[9] T. Martin, "Life-Cycle Cost Analysis for Pavements (Review and Guidance)," *Transp. Res. Procedia*, vol. 14, pp. 10–22, 2023.
[10] F. H. Administration, "Bases and Subbases for Concrete Pavement," FHWA, 2016. [Online]. Available: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif16005.pdf
[11] X. Chen and et al., "High-Ductility Concrete for Rigid Pavements," *J. Sustain. Infrastruct.*, vol. 9, no. 15, 2024.
[12] F. H. Administration, "Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design: Interim Technical Bulletin," FHWA, 2017. [Online]. Available: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/lcca/013017.pdf
[13] AASHTO, "T307: Standard Method for Deformation Characteristics of Soils," 2020.
[14] S. Azhari, W. Wahidin, and W. Diantoro, "Perencanaan Peningkatan Jalan Rigid Pavement pada Ruas Jalan Dusun Longkrang Desa Banjarharjo," *Infratech Build. J.*, vol. 2, no. 01, 2020.
[15] J. Smith and P. Brown, "Integrated Life Cycle Cost Comparison and Environmental Impact of Pavement Types," *Constr. Build. Mater.*, vol. 180, pp. 200–215, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.012.
[16] IPCC, *2023 Refinement to the GHG Inventory Guidelines*. 2023.
[17] A. Wibowo, "Optimasi Biaya Konstruksi Jalan di Indonesia," *J. Tek. Sipil*, vol. 12, no. 2, pp. 45–59, 2023.
[18] M. G. Alfarizi, W. Wahidin, and M. Yunus, "Analisis Perbandingan RAB Metode SNI dan Bow Jalan Rigid Desa Banjarharjo," *Infratech Build. J.*, vol. 1, no. 01, 2020.
[19] S. Ahmad and N. Kumar, "Cost-Effectiveness Analysis of Design Methods for Rigid and Flexible Pavements," *Asian Transp. Stud.*, vol. 6, no. 2, pp. 77–92, 2019.
[20] N. C. for A. T. NCAT, "Life Cycle Cost Analysis: State-of-the-Practice," NCAT Technical Report 20-05, 2020. [Online]. Available: https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep20-05.pdf