



Evaluasi Dampak Truk Angkut Air terhadap Umur Fatigue Perkerasan dan Biaya Pemeliharaan Jalan

Vinsensius Budiman Pantas*, Dewi Anastasia Ipah Wuwur

Program Studi Perancangan Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Kupang, Kupang, Indonesia

Email: ^{1,*}v.budiman.pantas@gmail.com, ²dewi.atw@gmail.com

Email Penulis Korespondensi: v.budiman.pantas@gmail.com

Abstrak—Kerusakan perkerasan kaku pada Jalan Anggrek di Kota Kupang menunjukkan tren peningkatan seiring tingginya intensitas kendaraan niaga, khususnya truk angkut air. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh lalu lintas truk tangki air terhadap umur fatigue perkerasan kaku serta implikasinya terhadap biaya pemeliharaan jalan. Metode yang digunakan adalah pendekatan mekanistik-empiris yang didasarkan pada perhitungan repetisi beban sumbu, faktor fatigue, dan faktor erosi pada dua skenario lalu lintas, yaitu dengan dan tanpa truk air. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil analisis dengan kondisi visual kerusakan aktual di lapangan, sedangkan pengembangan model dilanjutkan dengan prediksi umur layan dan estimasi biaya pemeliharaan menggunakan pendekatan biaya per meter unit retak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan truk air memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan nilai erosi perkerasan, terutama pada kelompok sumbu ganda, yang berdampak pada percepatan perkembangan retak permukaan. Pada skenario tanpa truk tangki air, nilai erosi relatif rendah dan menunjukkan laju degradasi yang lebih lambat. Persentase kerusakan aktual di lapangan sebesar $\pm 5\%$ masih termasuk dalam kategori pemeliharaan rutin, namun tren nilai erosi mengindikasikan potensi peningkatan kebutuhan intervensi di masa mendatang. Model prediksi biaya menunjukkan bahwa dominasi truk tangki air dapat meningkatkan akumulasi biaya pemeliharaan lebih dari 30% dalam jangka panjang dibandingkan kondisi tanpa truk air. Dengan demikian, lalu lintas truk air terbukti dapat menurunkan umur layan perkerasan serta meningkatkan kebutuhan anggaran pemeliharaan jalan, sehingga diperlukan strategi pengendalian beban kendaraan dan perencanaan struktur yang lebih adaptif pada jalan perkotaan.

Kata Kunci: Kerusakan Fatigue; Truk Air; Perkerasan Kaku

Abstract—Rigid pavement damage on Jalan Anggrek in Kupang City shows an increasing trend with the high intensity of commercial vehicles, especially water trucks. This study aims to evaluate the effect of water tanker truck traffic on the fatigue life of rigid pavement and its implications for road maintenance costs. The method used is a mechanistic-empirical approach based on the calculation of repeated axle loads, fatigue factors, and erosion factors in two traffic scenarios, namely with and without water trucks. Model validation is carried out by comparing the analysis results with the visual conditions of actual damage in the field, while model development continues with service life prediction and maintenance cost estimation using the cost per meter of crack unit. The results show that the presence of water trucks contributes significantly to increasing pavement erosion values, especially in the dual axle group, which has an impact on accelerating surface crack growth. In the scenario without water tankers, erosion values are relatively low and indicate a slower degradation rate. The percentage of actual damage in the field of $\pm 5\%$ is still in the routine maintenance category, but the erosion value trend indicates a potential increase in the need for intervention in the future. Cost prediction models show that the dominance of water tanker trucks can increase accumulated maintenance costs by more than 30% over the long term compared to conditions without water trucks. Thus, water truck traffic has been shown to reduce pavement service life and increase road maintenance budget requirements, necessitating vehicle load control strategies and more adaptive structural planning on urban roads.

Keywords: Fatigue Damage; Water Trucks; Rigid Pavement

1. PENDAHULUAN

Perkerasan jalan merupakan suatu struktur yang secara terus-menerus menerima beban berulang dari lalu lintas kendaraan selama masa layanannya. Salah satu bentuk kerusakan yang paling dominan adalah kerusakan kelelahan (*fatigue*), yang terjadi akibat akumulasi regangan tarik berulang pada bagian bawah lapisan perkerasan, baik pada perkerasan lentur maupun perkerasan kaku (Jasim et al., 2024). Beban kendaraan berat yang berulang dan melebihi kapasitas rencana jalan dapat mempercepat kerusakan struktural, seperti retak kelelahan dan *punch-out* pada perkerasan kaku (Cota et al., 2022).

Kondisi ini sangat relevan terjadi di Kota Kupang, khususnya pada Jalan Anggrek, yang memiliki tiga titik pengisian air sebagai pusat aktivitas truk tangki air. Akibatnya, ruas jalan tersebut menjadi koridor lalu lintas harian bagi truk-truk tersebut yang membawa beban berat melebihi kapasitas jalan perkotaan (Xin et al., 2026). Berdasarkan klasifikasi beban jalan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, banyak jalan perkotaan dirancang untuk lalu lintas ringan hingga sedang, bukan untuk operasi rutin kendaraan berat. Permasalahan utama yang muncul adalah ketidaksesuaian antara fungsi desain jalan dengan beban lalu lintas aktual. Keberadaan truk pengangkut air dalam jumlah besar mencerminkan kelemahan sistem penyediaan air perpipaan, yang seharusnya mampu memenuhi kebutuhan masyarakat tanpa ketergantungan pada distribusi air menggunakan kendaraan berat. Ketidaksesuaian ini menyebabkan penurunan umur layan jalan serta peningkatan biaya pemeliharaan yang signifikan (Tushar et al., 2025).

Pendekatan pemecahan masalah dalam penelitian ini disusun secara terpadu untuk menilai pengaruh lalu lintas truk tangki air terhadap umur kelelahan perkerasan kaku serta implikasinya terhadap biaya pemeliharaan pada Jalan Anggrek di Kota Kupang, melalui kombinasi analisis konseptual, simulasi numerik, dan verifikasi empiris. Tahap awal dilakukan dengan mengidentifikasi fenomena kerusakan jalan dan merumuskan hipotesis bahwa intensitas serta beban truk tangki air berkontribusi terhadap penurunan umur kelelahan dan peningkatan kebutuhan biaya pemeliharaan.

Kerangka analisis kemudian diperkuat melalui studi literatur yang mengacu pada konsep regangan tarik dan hubungan antara siklus pembebanan dengan akumulasi kerusakan sebagai dasar pemodelan umur kelelahan (Mahdi et al., 2023). Data yang digunakan mencakup data primer berupa lalu lintas harian rata-rata kendaraan, khususnya truk tangki air dan kendaraan non-truk hasil survei lapangan, serta data sekunder berupa struktur dan tebal perkerasan dari instansi terkait, dengan spesifikasi kendaraan mengacu pada truk tangki tipe Hino Dutro 110 HD sebagai representasi beban. Analisis dilakukan dengan membandingkan dua skenario, yaitu kondisi jalan dengan keberadaan lalu lintas truk tangki air dan tanpa lalu lintas tersebut, guna memperoleh gambaran kuantitatif mengenai dampaknya terhadap umur layan perkerasan dan frekuensi pemeliharaan.

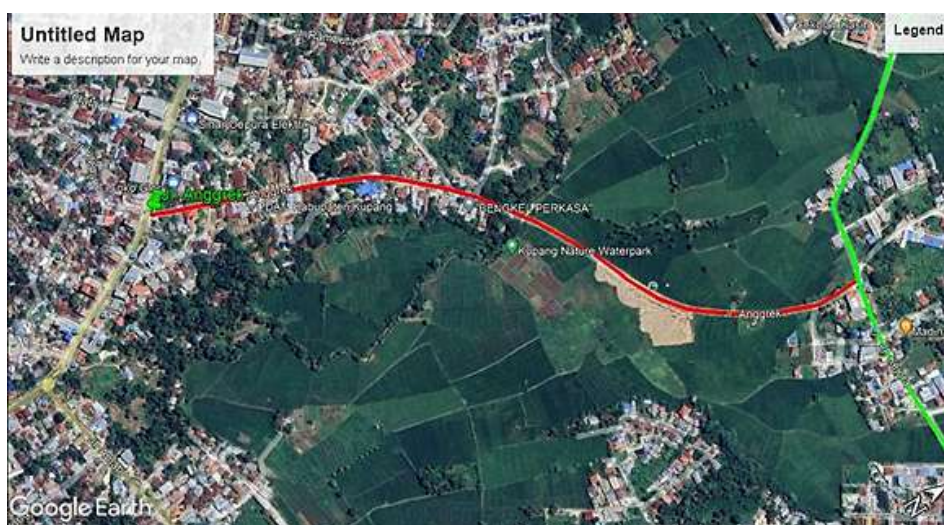
Selanjutnya, estimasi biaya pemeliharaan dihitung berdasarkan perbedaan umur rencana dari kedua skenario menggunakan acuan harga satuan pekerjaan jalan yang berlaku. Dalam konteks perkembangan teknologi, kajian ini memanfaatkan pendekatan prediksi umur kelelahan berbasis regangan dan model akumulasi kerusakan yang umum digunakan, meskipun sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada perkerasan lentur dengan asumsi distribusi lalu lintas yang seragam serta kondisi ideal, dan sering menggunakan perangkat lunak seperti KENPAVE atau metode elemen hingga untuk mensimulasikan respons struktur perkerasan (Keramati et al., 2020). Namun demikian, penerapan pendekatan tersebut pada perkerasan kaku di jalan perkotaan dengan pola lalu lintas yang tidak merata masih relatif terbatas. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada fokus kajian yang spesifik dan kontekstual pada Jalan Anggrek dengan karakteristik unik berupa keberadaan titik distribusi air yang memicu intensitas tinggi truk tangki, penggunaan pendekatan dua skenario komparatif yang jarang diterapkan dalam evaluasi jalan perkotaan, serta integrasi analisis teknis umur kelelahan dengan estimasi biaya pemeliharaan sebagai dasar pengambilan keputusan. Temuan penelitian terdahulu mengenai kendaraan Over Dimension Over Load (ODOL) juga memperkuat asumsi penelitian ini, di mana kendaraan berat seperti truk pengangkut memiliki nilai Vehicle Damage Factor (VDF) yang tinggi dan berkontribusi signifikan terhadap percepatan kerusakan perkerasan dibandingkan kendaraan komersial lainnya.

Fokus roadmap penelitian ini adalah kerusakan jalan akibat lalu lintas kendaraan berat, pemeliharaan jalan, dan manajemen perkerasan. Penelitian diawali dengan identifikasi beban lalu lintas, estimasi biaya pemeliharaan, eksplorasi alternatif kebijakan terkait transportasi jalan, serta strategi pemeliharaan jalan, hingga pada pemanfaatan material lokal untuk perbaikan jalan. Hal ini diharapkan dapat menurunkan biaya konstruksi dan pemeliharaan sekaligus meningkatkan kualitas pelayanan jalan sebagai infrastruktur transportasi. Luaran yang diharapkan dari setiap fokus penelitian diarahkan untuk memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya di bidang teknik perkerasan jalan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Jalan Anggrek, Kota Kupang, yang merupakan jalan perkotaan dengan jenis perkerasan kaku. Lokasi ini dipilih karena memiliki tiga titik pengisian air yang menyebabkan tingginya volume lalu lintas truk tangki air. Data tebal perkerasan diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum Kota Kupang.



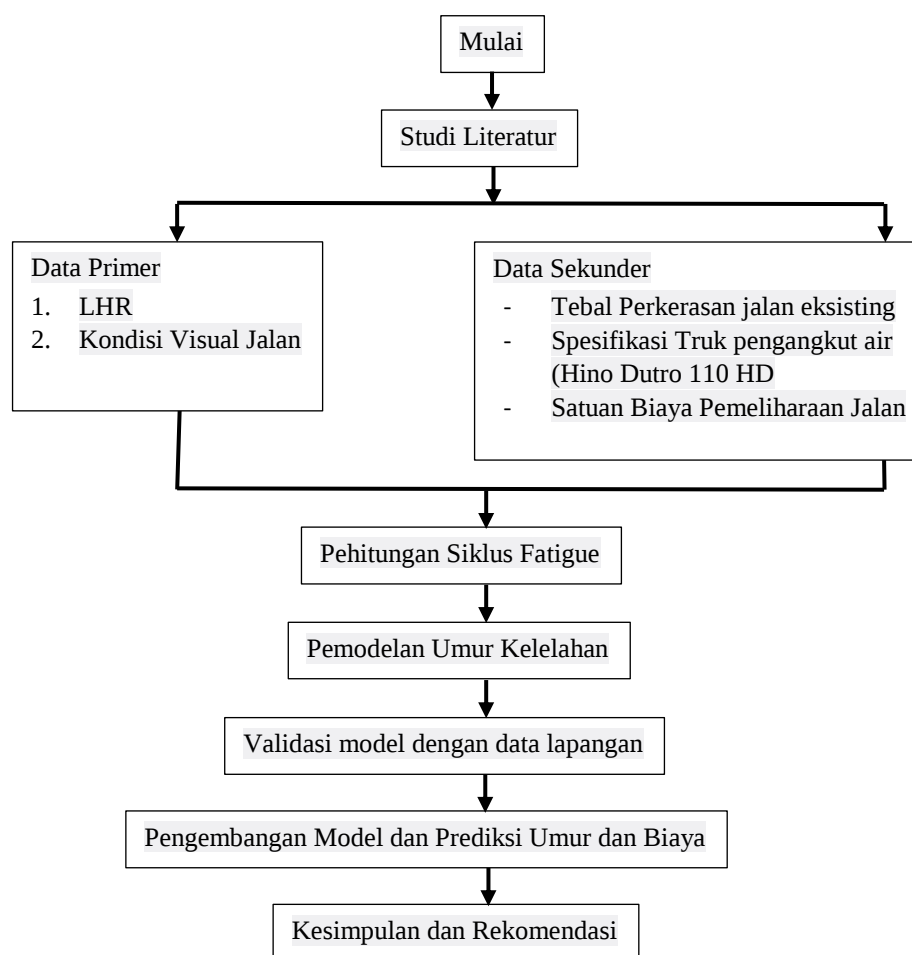
Gambar 1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan data primer berupa LHR, komposisi kendaraan, frekuensi truk tangki, serta kondisi jalan, dan data sekunder meliputi tebal perkerasan, spesifikasi beban truk, biaya pemeliharaan, serta literatur terkait. Analisis dilakukan dengan pendekatan mekanistik-empiris melalui evaluasi regangan tarik, disertai perbandingan skenario dengan dan tanpa truk tangki untuk menilai umur kelelahan. Dampak ekonominya dihitung melalui estimasi biaya pemeliharaan berdasarkan siklus perbaikan yang dihasilkan.

2.2 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian menggambarkan tahapan penelitian yang dilakukan secara sistematis mulai dari tahap persiapan hingga penyusunan kesimpulan. Penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperoleh landasan teori mengenai kerusakan fatigue pada perkerasan kaku, karakteristik pembebanan kendaraan berat, serta metode analisis mekanistik-empiris yang digunakan dalam evaluasi umur layan perkerasan. Tahap berikutnya adalah pengumpulan data yang terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer meliputi survei lalu lintas harian rata-rata (LHR) dan identifikasi kondisi visual kerusakan perkerasan di lapangan. Sementara itu, data sekunder mencakup informasi mengenai struktur dan tebal perkerasan eksisting, spesifikasi kendaraan truk tangki air yang digunakan sebagai objek penelitian, serta data biaya pemeliharaan jalan yang digunakan dalam analisis ekonomi.

Seluruh data yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis melalui perhitungan siklus fatigue untuk memperoleh jumlah repetisi beban yang bekerja pada struktur perkerasan. Hasil perhitungan tersebut digunakan sebagai dasar dalam pemodelan umur kelelahan (*fatigue life*) pada dua skenario, yaitu kondisi dengan lalu lintas truk tangki air dan kondisi tanpa truk tangki air. Tahap selanjutnya adalah validasi model dengan membandingkan hasil analisis terhadap kondisi kerusakan aktual di lapangan. Proses validasi dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara hasil perhitungan teoritis dengan kondisi eksisting sehingga model yang digunakan memiliki tingkat keandalan yang memadai. Berdasarkan hasil validasi, dilakukan pengembangan model untuk memprediksi umur layan perkerasan dan estimasi biaya pemeliharaan jalan pada masing-masing skenario. Tahapan tersebut menjadi dasar dalam penyusunan kesimpulan dan rekomendasi yang diharapkan dapat memberikan masukan bagi pengelolaan beban lalu lintas kendaraan berat serta perencanaan program pemeliharaan jalan secara lebih efektif.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Analisis

Analisis ini diawali dengan penyajian data umum mengenai perkerasan Jalan Anggrek, data truk tangki air, kondisi visual Jalan Anggrek, lalu lintas harian rata-rata, perhitungan siklus kelelahan (*fatigue cycle*), biaya satuan pemeliharaan jalan, pemodelan umur kelelahan (*fatigue life*), validasi model dengan data lapangan, serta pengembangan model yang mencakup prediksi umur layanan dan biaya.



3.1.1 Data Umum Perkerasan Jalan Anggrek

Jalan Anggrek merupakan jalan sepanjang 1,1 km dengan jenis perkerasan kaku. Jalan ini dibangun dengan dua jenis ketebalan perkerasan, yaitu Tipe 1 dengan ketebalan 200 mm dan Tipe 2 dengan ketebalan 120 mm. Lebar jalan adalah 5 meter. Pembagian segmen berdasarkan tipe jalan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Perkerasan Jalan Anggrek

Tipe	Lapisan	Tebal	Mutu Beton	Sta. Awal	Sta. Akhir	Lebar
1	Beton	200 mm	K-300	0+000	0+008	5
	Timbunan Pilihan	100 mm	-	0+104	0+176	-
				0+586	1+086	-
				1+086	1+110	-
2	Beton	120 mm	K-300	0+008	0+104	5
	Perkerasan Eksisting	-	-	0+176	0+596	-

3.1.2 Data Truk Tangki Air

Berdasarkan hasil wawancara dengan pengemudi truk di titik pengisian air, mayoritas truk yang digunakan adalah Mitsubishi Center (Cold Diesel) PS 125 dengan kapasitas tangki sebesar 5.000 liter. Rata-rata waktu operasi adalah 12 jam dengan frekuensi pengiriman sebanyak 9 kali. Berat kosong truk Mitsubishi Center (Cold Diesel) PS 125 adalah 2.345 kg, dengan berat kotor kendaraan maksimum (*Gross Vehicle Weight/GVW*) sebesar 7.500 kg. Truk Mitsubishi PS 125 memiliki sistem sumbu 1.2, dengan sumbu depan tunggal dan sumbu belakang ganda. Sumbu depan memiliki beban maksimum sebesar 2.250 kg, sedangkan sumbu belakang sebesar 5.250 kg.

3.1.3 Data Kondisi Jalan Anggrek

Data kondisi Jalan Anggrek dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Perkerasan Jalan Anggrek

STA	POSISI	TRACK		P (m) A	L (m) B	D (m) C	A (m ²) A x B	INFORMATION
		RIGHT	LEFT					
0+000-0+050								No Damage
0+050-0+100								No Damage
0+100-0+150								No Damage
0+150-0+200								No Damage
0+200-0+250								No Damage
0+250-0+300	0+293	●		1,6	1,5		2,4	Raveling
0+300-0+350	0+307	●	●	0,05	5		0,25	Transverse Crack
	0+323	●	●	0,03	2,5		0,075	Meandering Crack
	0+345	●	●	0,06	5		0,3	Transverse Crack
	0+363		●	0,9	1,04		0,936	Raveling
0+350-0+400	0+367	●		1,04	5		5,2	Raveling & Hairline Crack
	0+368	●		1,42	1,84		2,6128	Raveling & Transverse Crack
	0+373	●	●	0,03	5		0,15	Transverse Crack
	0+377	●	●	0,02	5		0,1	Transverse Crack
	0+379	●		0,03	5		0,15	Transverse Crack
	0+394	●		2,11	2,5		5,275	Transverse Crack
	0+412	●		7	0,05		0,35	Longitudinal Crack
	0+436	●	●	20	1,8		36	Raveling
0+450-0+500	0+451	●	●	8	1,9		15,2	Block Cracking
	0+464	●	●	13	5		65	Raveling
0+500-0+550	0+512	●	●	3	2,5		7,5	Block Cracking
	0+519		●	0,03	0,07	0,01	0,0021	Pothole
	0+543	●	●	5	2		10	Raveling
0+550-0+600								Deck Slab
0+600-0+650	0+606 - 0+900	●		306	0,2		61,2	Edge Crack
	0+607	●		0,4	1		0,4	Raveling
	0+634	●	●	5	5		25	Meandering Crack
0+650-0+700	0+662	●		0,03	0,09		0,0027	Raveling
	0+688	●	●	0,03	5		0,15	Transverse Crack
0+700-0+750	0+712		●	4	2,5		10	Raveling
	0+726	●	●	0,01	5		0,05	Transverse Crack
0+750-0+800	0+767	●	●	0,03	5		0,15	Transverse Crack
	0+775	●		25	1,25		31,25	Block Cracking



STA	POSISI	TRACK	P (m)	L (m)	D (m)	A (m ²)	A x	INFORMATION
0+800-0+850	0+823	● ●	0,03	5		0,15		Transverse Crack
	0+831	●	7	0,03		0,21		Longitudinal Crack
0+850-900								No Damage
0+900-0+950	0+900-1+000	●	100	0,05		5		Edge Crack
	0+905	● ●	0,03	5		0,15		Transverse Crack
	0+932	● ●	0,03	5		0,15		Transverse Crack
0+950-1+000								No Damage
1+000-1+050	1+000-1+050	●	50	0,05		2,5		Edge Crack
1+050-1+100								No Damage
1+100-1+150	1+115	● ●	0,03	5		0,15		Transverse Crack

Berdasarkan Tabel 2, persentase kerusakan total dihitung untuk menentukan jenis program pemeliharaan yang diperlukan.

$$\text{Luas total kerusakan} = 286,8 \text{ m}^2$$

$$\text{Luas Jalan Anggrek} = 5 \text{ m} \times 1.100 \text{ m} = 5.500 \text{ m}^2$$

$$\text{Persentase kerusakan} = \frac{\text{Luas Total Kerusakan}}{\text{Luas Jalan Anggrek}} = \frac{286,8 \text{ m}^2}{5.500 \text{ m}^2} = 4,99\%$$

Tabel 3. Penentuan Kondisi Jalan dan Program Pemeliharaan

Kondisi Jalan	Persentase Batasan Kerusakan (Persen terhadap Luas Lapis Perkerasan Permukaan)	Program Penanganan
Baik (B)	< 6%	Pemeliharaan Rutin
Sedang (S)	6 – < 11%	Pemeliharaan Rutin/Berkala
Rusak Ringan (RR)	11 – < 15%	Pemeliharaan Rehabilitasi
Rusak Berat (RB)	≥ 15%	Rekonstruksi/Peningkatan Struktur

Berdasarkan Tabel 3, Jalan Anggrek masih berada dalam kondisi yang cukup baik dengan program pemeliharaan rutin. Kondisi visual jalan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 4. Kondisi Visual Jalan

Gambar 4 menunjukkan kondisi visual jalan yang mengindikasikan kerusakan dengan tingkat sedang hingga cukup parah. Kerusakan tersebut didominasi oleh retak melintang dan pelepasan butir (*grain detachment*).

3.1.4 Lalu Lintas Harian Rata-Rata (LHR)

Data LHR diperoleh dari survei selama 7 hari (6–12 Oktober 2025). Survei dilakukan selama 8 jam per hari (pukul 06.00–10.00 dan 14.00–18.00).

**Tabel 4.** Hasil Survei LHR

Klasifikasi Kendaraan	Deskripsi	AADT (Kendaraan/Hari)
1	Sepeda Motor	5,563
2	Mobil Penumpang	752
3	Bemo (Minibus)	4
4	Pick-Up	93
5a	Bus Kecil	5
5b	Bus Besar	2
6a	Truk Ringan	21
6b	Truk Sedang	44
7a2	Truk Berat	1
TA	Tangki Air	541
Total Sepeda Motor		7,025
Total (Kendaraan Komersial)		613
% Tangki Air / Total		7.69%
% Tangki Air / Total Kendaraan Komersial		88.12%

Tabel 4 menunjukkan persentase LHR kendaraan tangki air dibandingkan dengan total LHR seluruh jenis kendaraan, yaitu sekitar 7,69%. Sementara itu, jika dibandingkan dengan total kendaraan komersial, LHR kendaraan tangki air mendominasi sebesar 88,12%. Hal ini penting untuk diperhatikan karena kendaraan komersial merupakan jenis kendaraan yang digunakan dalam perhitungan tebal perkerasan kaku. Jumlah kelompok sumbu kendaraan komersial (JSKN) dihitung untuk memperoleh tebal perkerasan rencana. Oleh karena itu, untuk menentukan umur kelelahan perkerasan JSKN, dilakukan perhitungan beban lalu lintas jalan. Nilai JSKN berdasarkan hasil survei dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Jumlah Kelompok Sumbu Kendaraan Komersial (JSKN)

Gol Kend.	LHR	HVAG	STRT	STRG	STdRT	STdRG
5a	5	10	5	5		
5b	2	4	2	2		
6a	21	43	21	21		
6b	44	88	44	44		
7a2	1	2	1			1
TA	541	1082	541	541		
Total	613	1228	614	614	0	1
Total Tanpa TA	73	146	73	72	0	1
Proporsi Jenis Kendaraan (%)		100%	50.01%	49.92%	0.00%	0.08%

Pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa kelompok sumbu STRT (Single Axle, Single Wheel) mendominasi dengan persentase sebesar 50,01%, diikuti oleh kelompok sumbu STRG (Single Axle Double Wheel). JSKN dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$JSKN = (\sum LHR_{JK} \times JSKN_{JK}) \times 365 \times DD \times DL \times R$$

$$JSKN = (613 \times 2) \times 365 \times 0,5 \times 1 \times 28,27$$

$$JSKN = 6.339.418$$

Selanjutnya, dengan menentukan proporsi beban, dilakukan perhitungan jumlah repetisi beban yang diizinkan selama 20 tahun. Repetisi untuk masing-masing kelompok sumbu dapat dilihat pada Tabel 6, 7, dan 8.

Tabel 6. Repetisi Beban yang Diizinkan – STRT

Beban Sumbu (Ton)	Load Proportion	Axle Group Proportion	Design Traffic	Allowable Load Repetitions
100	0.0003	0.50	6,339,418	951
90	0.0038	0.50	6,339,418	12,046
80	0.0065	0.50	6,339,418	20,605
70	0.0304	0.50	6,339,418	96,369
60	0.0447	0.50	6,339,418	141,700
50	0.0639	0.50	6,339,418	202,565
40	0.1952	0.50	6,339,418	618,790
30	0.3957	0.50	6,339,418	1,254,382
20	0.2581	0.50	6,339,418	818,185
10	0.0015	0.50	6,339,418	4,755



Berdasarkan data dari Mitsubishi PS125, sumbu depan truk tangki air STRT mampu menahan beban sekitar 2.250 kg atau setara dengan 22,5 ton. Oleh karena itu, jumlah repetisi yang diizinkan adalah sekitar 1,2 juta.

Tabel 7. Repetisi Beban yang Diizinkan – STRG

Beban Sumbu (Ton)	Proporsi Beban	Proporsi Kelompok Sumbu	Lalu Lintas Rencana	Repetisi Beban yang Diizinkan
150	0.0028	0.50	6,339,418	8,862
140	0.0168	0.50	6,339,418	53,170
130	0.0025	0.50	6,339,418	7,912
120	0.0083	0.50	6,339,418	26,268
110	0.0102	0.50	6,339,418	32,282
100	0.0185	0.50	6,339,418	58,550
90	0.0288	0.50	6,339,418	91,148
80	0.1001	0.50	6,339,418	316,804
70	0.1521	0.50	6,339,418	481,377
60	0.1736	0.50	6,339,418	549,422
50	0.1636	0.50	6,339,418	517,773
40	0.2261	0.50	6,339,418	715,577
30	0.0939	0.50	6,339,418	297,181
20	0.0000	0.50	6,339,418	-
10	0.0027	0.50	6,339,418	8,545

Sementara itu, roda belakang truk tangki air STRG dapat menahan beban maksimum sebesar 52,5 ton, sehingga jumlah repetisi yang diizinkan adalah sebesar 517.773.

Tabel 8. Repetisi Beban yang Diizinkan – STdRG

Beban Sumbu (Ton)	Proporsi Beban	Proporsi Kelompok Sumbu	Lalu Lintas Rencana	Repetisi Beban yang Diizinkan
310	0.1164	0.00081	6,339,418	2,028
300	0.0184	0.00081	6,339,418	321
290	0.0092	0.00081	6,339,418	160
280	0.0143	0.00081	6,339,418	249
270	0.0204	0.00081	6,339,418	355
260	0.0225	0.00081	6,339,418	392
250	0.0215	0.00081	6,339,418	375
240	0.0255	0.00081	6,339,418	444
230	0.0541	0.00081	6,339,418	943
220	0.0296	0.00081	6,339,418	516
210	0.0347	0.00081	6,339,418	605
200	0.0194	0.00081	6,339,418	338
190	0.0347	0.00081	6,339,418	605
180	0.0398	0.00081	6,339,418	694
170	0.0358	0.00081	6,339,418	624
160	0.0582	0.00081	6,339,418	1,014
150	0.0858	0.00081	6,339,418	1,495
140	0.0919	0.00081	6,339,418	1,601
130	0.0868	0.00081	6,339,418	1,513
120	0.0552	0.00081	6,339,418	962
110	0.0623	0.00081	6,339,418	1,086
100	0.0317	0.00081	6,339,418	552
90	0.0133	0.00081	6,339,418	232
80	0.0041	0.00081	6,339,418	71
70	0.0061	0.00081	6,339,418	106
60	0.0000	0.00081	6,339,418	-
50	0.0010	0.00081	6,339,418	17
40	0.0000	0.00081	6,339,418	-
30	0.0000	0.00081	6,339,418	-
20	0.0000	0.00081	6,339,418	-
10	0.0072	0.00081	6,339,418	125

Sementara itu, kelompok sumbu STdRG memiliki jumlah repetisi yang lebih rendah. Hal ini dipengaruhi tidak hanya oleh jumlah kendaraan yang tercatat selama survei, tetapi juga oleh fungsi Jalan Anggrek yang memiliki batas



beban maksimum sebesar 10 ton. Jumlah repetisi yang diizinkan pada ruas ini dipengaruhi oleh kondisi lalu lintas saat ini serta proporsi beban sumbu kendaraan.

3.1.5 Perhitungan Siklus Kelelahan (*Fatigue Cycle*)

Perhitungan siklus kelelahan ini dilakukan dalam dua skenario. Skenario pertama dilakukan dengan adanya lalu lintas truk tangki air, sedangkan skenario kedua dilakukan tanpa lalu lintas truk tangki air. Perhitungan ini digunakan untuk menentukan tingkat repetisi yang diizinkan pada material perkerasan kaku. Nilai kesetaraan faktor kelelahan (S_e) dan faktor erosi (F_3) dihitung untuk setiap kelompok sumbu kendaraan sebagai parameter dalam analisis kerusakan perkerasan kaku. Nilai tersebut digunakan untuk menentukan kontribusi masing-masing konfigurasi sumbu terhadap mekanisme kerusakan akibat kelelahan maupun erosi. Hasil perhitungan disajikan pada tabel 9.

Tabel 9. Kesetaraan Faktor Kelelahan (S_e) dan Faktor Erosi (F_3)

Ekuivalen	STRT & STdRT	STRG	STdRG	STrRG & SQdRG
S_e	0.40	0.88	0.77	0.54
F_3	1.74	2.35	3.56	2.42

Berdasarkan Tabel 9, kelompok sumbu STRG memiliki nilai faktor kesetaraan fatigue tertinggi sebesar 0,88, sedangkan kelompok STdRG memiliki faktor erosi terbesar yaitu 3,56. Hal tersebut menunjukkan bahwa setiap konfigurasi sumbu memberikan karakteristik pembebanan yang berbeda terhadap struktur perkerasan. Oleh karena itu, evaluasi umur layan perkerasan perlu mempertimbangkan pengaruh masing-masing kelompok sumbu agar hasil analisis lebih representatif.

Setelah diperoleh nilai faktor kesetaraan, analisis dilanjutkan dengan menghitung kontribusi kelompok sumbu STRT terhadap kerusakan fatigue dan erosi pada kondisi lalu lintas yang melibatkan truk tangki air. Hasil analisis ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Perhitungan Faktor Fatigue dan Erosi – STRT (Dengan Truk Tangki Air)

Beban Sumbu	Repetisi Beban SLF (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Sr	Faktor Kesetaraan Fatigue 0,396		Kesetaraan Faktor Erosi 1,742	
				Analisis Faktor Fatigue		Analisis Faktor Erosi	
				Pengulangan yang Diizinkan	Fatigue (%)	Pengulangan yang Diizinkan	Erosi (%)
100	110	951	0,285	tak terbatas	0,00	5,33E+07	0,00
90	99	12.046	0,258	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
80	88	20.605	0,231	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
70	77	96.369	0,204	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
60	66	141.700	0,176	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
50	55	202.565	0,149	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
40	44	618.790	0,121	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
30	33	1.254.382	0,092	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
20	22	818.185	0,063	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
10	11	4.755	0,033	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
Total				Fatigue (%)	0,00	Erosi (%)	0,00

Berdasarkan Tabel 10, seluruh tingkat pembebanan pada kelompok sumbu STRT menghasilkan nilai fatigue dan erosi total sebesar 0%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa beban yang diterima masih berada di bawah kapasitas struktur perkerasan sehingga belum memberikan kontribusi terhadap akumulasi kerusakan. Dengan demikian, kelompok sumbu STRT tidak menjadi penyebab utama penurunan umur layan pada ruas jalan yang diteliti. Analisis selanjutnya dilakukan pada kelompok sumbu STRG, yang merupakan salah satu konfigurasi sumbu dengan frekuensi lintasan tinggi pada kendaraan truk tangki air. Hasil perhitungan faktor fatigue dan erosi disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Hasil Perhitungan Faktor Fatigue dan Erosi STRG (Dengan Truk Tangki Air)

Beban Sumbu	Repetisi Beban SLF (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Sr	Faktor Kesetaraan Fatigue 0,88		Kesetaraan Faktor Erosi 2,35	
				Analisis Faktor Fatigue		Analisis Faktor Erosi	
				Pengulangan yang Diizinkan	Fatigue (%)	Pengulangan yang Diizinkan	Erosi (%)
150	165	29.921	0,484	8.885.702	0,34	468.533	6,39
140	154	179.526	0,454	214.658.231	0,08	771.149	23,28
130	143	26.715	0,423	tak terbatas	0	1.387.950	1,92
120	132	88.695	0,392	tak terbatas	0	2.883.896	3,08
110	121	108.998	0,362	tak terbatas	0	7.895.754	1,38
100	110	197.693	0,331	tak terbatas	0	48.767.768	0,41



Beban Sumbu	Repetisi		Sr	Faktor Kesetaraan Fatigue		Kesetaraan Faktor Erosi	
	Beban SLF (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan		Analisis Faktor Fatigue		Analisis Faktor Erosi	
				Pengulangan yang Diizinkan	Fatigue (%)	Pengulangan yang Diizinkan	Erosi (%)
90	99	307.759	0,299	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
80	88	1.069.677	0,268	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
70	77	1.625.354	0,236	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
60	66	1.855.105	0,205	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
50	55	1.748.244	0,172	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
40	44	2.416.125	0,139	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
30	33	1.003.424	0,106	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
20	22	-	0,072	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
10	11	28.852	0,038	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
Total				Fatigue (%)	0,42036605	Erosi (%)	36,45

Berdasarkan Tabel 11, total kerusakan akibat fatigue sebesar 0,42%, sedangkan erosi mencapai 36,45%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa pada kelompok sumbu STRG mekanisme kerusakan lebih didominasi oleh erosi dibandingkan fatigue. Persentase erosi terbesar terjadi pada beban sumbu 140 kN, sedangkan kontribusi fatigue relatif kecil. Hasil ini mengindikasikan bahwa pembebanan berulang oleh truk tangki air lebih berpengaruh terhadap degradasi fondasi dan kehilangan dukungan perkerasan dibandingkan retak akibat kelelahan material.

Kelompok sumbu STdRG dianalisis untuk mengetahui pengaruh pembebanan tandem terhadap kerusakan perkerasan pada kondisi lalu lintas dengan truk tangki air. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil Perhitungan Faktor Fatigue dan Erosi STdRG (Dengan Truk Tangki Air)

Beban Sumbu	Repetisi		Sr	Faktor Kesetaraan Fatigue		Kesetaraan Faktor Erosi	
	Beban SLF (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan		Analisis Faktor Fatigue		Analisis Faktor Erosi	
				Pengulangan yang Diizinkan	Fatigue (%)	Pengulangan yang Diizinkan	Erosi (%)
310	341	2.028	0,96	1,44	140823,09	106	1922,60
300	330	321	0,93	3,24	9910,06	129	249,12
290	319	160	0,90	7,28	2202,32	158	101,53
280	308	249	0,87	16,41	1518,91	195	127,86
270	297	355	0,84	37,04	959,79	242	146,83
260	286	392	0,81	83,77	468,04	303	129,46
250	275	375	0,78	189,83	197,37	3,82E+02	98,16
240	264	444	0,75	430,99	103,10	4,85E+02	91,64
230	253	943	0,72	980,55	96,14	6,22E+02	151,68
220	242	516	0,69	2.235,68	23,07	8,04E+02	64,13
210	231	605	0,66	5.108,86	11,84	1,05E+03	57,49
200	220	338	0,64	11.702,18	2,89	1,39E+03	24,30
190	209	605	0,61	26.871,44	2,25	1,86E+03	32,43
180	198	694	0,58	61.866,82	1,12	2,53E+03	27,36
170	187	624	0,55	542.026	0,12	3,50E+03	17,81
160	176	1.014	0,51	1.682.703	0,06	4,93E+03	20,58
150	165	1.495	0,48	8.885.702	0,02	7,08E+03	21,11
140	154	1.601	0,45	214.658.231	0,00	1,04E+04	15,34
130	143	1.513	0,42	tak terbatas	0	1,58E+04	9,55
120	132	962	0,39	tak terbatas	0	2,49E+04	3,86
110	121	1.086	0,36	tak terbatas	0	4,09E+04	2,66
100	110	552	0,33	tak terbatas	0	7,11E+04	0,78
90	99	232	0,30	tak terbatas	0	1,34E+05	0,17
80	88	71	0,27	tak terbatas	0	2,80E+05	0,03
70	77	106	0,24	tak terbatas	0	7,07E+05	0,02
60	66	-	0,20	tak terbatas	0	2,57E+06	0,00
50	55	17	0,17	tak terbatas	0	3,56E+07	0,00
40	44	-	0,14	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
30	33	-	0,11	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
20	22	-	0,07	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
10	11	125	0,04	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
Total				Fatigue (%)	156320,20	Erosi (%)	3316,49



Berdasarkan Tabel 12, kelompok sumbu STdRG menghasilkan total fatigue sebesar 156.320,20% dan total erosi sebesar 3.316,49%. Nilai tersebut merupakan yang tertinggi dibandingkan kelompok sumbu lainnya sehingga menunjukkan bahwa konfigurasi sumbu tandem memberikan kontribusi paling besar terhadap kerusakan perkerasan. Besarnya nilai fatigue maupun erosi mengindikasikan bahwa pembebanan berulang dari truk tangki air dengan sumbu tandem berpotensi mempercepat penurunan umur layan jalan secara signifikan. Sebagai pembanding, dilakukan analisis pada kondisi lalu lintas tanpa truk tangki air. Hasil perhitungan untuk kelompok sumbu STRT disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13. Hasil Perhitungan Faktor Fatigue dan Erosi STRT (Tanpa Truk Tangki Air)

Beban Sumbu	Repetisi Beban SLF (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Sr	Faktor Kesetaraan Fatigue 0,396		Kesetaraan Faktor Erosi 1,742	
				Analisis Faktor Fatigue		Analisis Faktor Erosi	
				Pengulangan yang Diizinkan	Fatigue (%)	Pengulangan yang Diizinkan	Erosi (%)
100	110	951	0,258	tak terbatas	0,00	5,33E+07	0,00
90	99	12.046	0,234	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
80	88	20.605	0,209	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
70	77	96.369	0,185	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
60	66	141.700	0,160	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
50	55	202.565	0,134	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
40	44	618.790	0,109	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
30	33	1.254.382	0,083	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
20	22	818.185	0,057	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
10	11	4.755	0,030	tak terbatas	0,00	3,56E+14	0,00
Total				Fatigue (%)	0,00	Erosi (%)	0,00

Berdasarkan Tabel 13, nilai total fatigue dan erosi tetap sebesar 0%, yang menunjukkan bahwa kelompok sumbu STRT tidak memberikan kontribusi terhadap kerusakan perkerasan meskipun truk tangki air tidak diperhitungkan dalam lalu lintas. Hasil ini menunjukkan bahwa kelompok sumbu tersebut masih berada dalam batas kemampuan struktur perkerasan. Analisis berikutnya dilakukan pada kelompok sumbu STRG untuk mengetahui perubahan tingkat kerusakan ketika lalu lintas truk tangki air tidak diperhitungkan. Hasil analisis ditunjukkan pada Tabel 14.

Tabel 14. Hasil Perhitungan Faktor Fatigue dan Erosi STRG (Tanpa Truk Tangki Air)

Beban Sumbu	Repetisi Beban SLF (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Sr	Faktor Kesetaraan Fatigue 0,88		Kesetaraan Faktor Erosi 2,35	
				Analisis Faktor Fatigue		Analisis Faktor Erosi	
				Pengulangan yang Diizinkan	Fatigue (%)	Pengulangan yang Diizinkan	Erosi (%)
150	165	1.015	0,438	tak terbatas	0	468.533	0,22
140	154	6.088	0,411	tak terbatas	0	771.149	0,79
130	143	906	0,383	tak terbatas	0	1.387.950	0,07
120	132	3.008	0,355	tak terbatas	0	2.883.896	0,10
110	121	3.696	0,328	tak terbatas	0	7.895.754	0,05
100	110	6.704	0,299	tak terbatas	0	48.767.768	0,01
90	99	10.436	0,271	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
80	88	36.274	0,243	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
70	77	55.118	0,214	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
60	66	62.909	0,185	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
50	55	59.285	0,156	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
40	44	81.934	0,127	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
30	33	34.027	0,097	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
20	22	-	0,066	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
10	11	978	0,034	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
Total				Fatigue (%)	0	Erosi (%)	1,24

Berdasarkan Tabel 14, total fatigue bernilai 0%, sedangkan erosi hanya sebesar 1,24%. Nilai tersebut jauh lebih kecil dibandingkan kondisi dengan truk tangki air. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan truk tangki air memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap peningkatan kerusakan akibat erosi pada kelompok sumbu STRG. Kelompok sumbu STdRG juga dianalisis pada kondisi tanpa truk tangki air untuk mengetahui perubahan kontribusi terhadap kerusakan perkerasan. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 15.

**Tabel 15.** Hasil Perhitungan Faktor Fatigue dan Erosi STdRG (Tanpa Truk Tangki Air)

Beban Sumbu	Repetisi Beban SLF (Beban Rencana)	Repetisi Beban yang Diizinkan	Sr	Faktor Kesetaraan Fatigue Analisis Faktor Fatigue Pengulangan yang Diizinkan	0,77 Fatigue (%)	Kesetaraan Faktor Erosi Analisis Faktor Erosi Pengulangan yang Diizinkan	3,56 Erosi (%)
310	341	584	0,87	18,25	3200,03	106	553,57
300	330	92	0,84	37,96	243,24	129	71,73
290	319	46	0,81	79,05	58,39	158	29,23
280	308	72	0,79	164,89	43,51	195	36,81
270	297	102	0,76	344,48	29,71	242	42,28
260	286	113	0,74	720,84	15,66	303	37,28
250	275	108	0,71	1.511,01	7,14	3,82E+02	28,26
240	264	128	0,68	3.172,95	4,03	4,85E+02	26,38
230	253	271	0,66	6.675,24	4,07	6,22E+02	43,67
220	242	149	0,63	14.070,68	1,06	8,04E+02	18,47
210	231	174	0,60	29.719,94	0,59	1,05E+03	16,55
200	220	97	0,57	62.908,61	0,15	1,39E+03	7,00
190	209	174	0,55	133.460,01	0,13	1,86E+03	9,34
180	198	200	0,52	283.808,81	0,07	2,53E+03	7,88
170	187	180	0,49	605.055,51	0,03	3,50E+03	5,13
160	176	292	0,47	1.293.384,58	0,02	4,93E+03	5,92
150	165	430	0,44	tak terbatas	0	7,08E+03	6,08
140	154	461	0,41	tak terbatas	0	1,04E+04	4,42
130	143	436	0,38	tak terbatas	0	1,58E+04	2,75
120	132	277	0,36	tak terbatas	0	2,49E+04	1,11
110	121	313	0,33	tak terbatas	0	4,09E+04	0,76
100	110	159	0,30	tak terbatas	0	7,11E+04	0,22
90	99	67	0,27	tak terbatas	0	1,34E+05	0,05
80	88	21	0,24	tak terbatas	0	2,80E+05	0,01
70	77	31	0,21	tak terbatas	0	7,07E+05	0,00
60	66	-	0,19	tak terbatas	0	2,57E+06	0,00
50	55	5	0,16	tak terbatas	0	3,56E+07	0,00
40	44	-	0,13	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
30	33	-	0,10	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
20	22	-	0,07	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
10	11	36	0,03	tak terbatas	0	3,56E+14	0,00
Total				Fatigue (%)	3607,84	Erosi (%)	954,91

Berdasarkan Tabel 15, kelompok sumbu STdRG menghasilkan total fatigue sebesar 3.607,84% dan erosi sebesar 954,91%. Meskipun nilainya masih cukup besar, hasil tersebut jauh lebih rendah dibandingkan kondisi dengan truk tangki air. Perbedaan ini menunjukkan bahwa lalu lintas truk tangki air meningkatkan tingkat kerusakan fatigue maupun erosi secara signifikan, terutama pada kendaraan dengan konfigurasi sumbu tandem. Dengan demikian, keberadaan truk tangki air merupakan faktor dominan yang mempercepat penurunan umur layan perkerasan kaku pada ruas Jalan Anggrek. Pemeliharaan rutin perkerasan kaku meliputi pengisian sambungan (*joint sealing*) dan pengisian retak (*crack sealing*). Biaya pemeliharaan rutin termasuk mobilisasi sebesar Rp57.760.000 untuk panjang retak 457 meter.

Pemodelan umur kelelahan dilakukan dengan membandingkan nilai faktor kelelahan dan erosi pada dua skenario lalu lintas, yaitu dengan dan tanpa truk tangki air. Parameter utama yang digunakan adalah persentase akumulasi kerusakan kelelahan (%) dan erosi (%) untuk setiap kelompok sumbu kendaraan. Berdasarkan hasil perhitungan:

Skenario dengan Truk Tangki Air

STRT : Fatigue $\approx 0,00\%$; Erosi $\approx 0,00\%$

STRG : Fatigue $\approx 0,42\%$; Erosi $\approx 36,45\%$

STdRG : Fatigue $\approx 156.320\%$; Erosi $\approx 3.316\%$

Nilai STdRG menunjukkan akumulasi kerusakan yang sangat tinggi akibat dominasi beban berat berulang dari kendaraan komersial, khususnya truk tangki air. Skenario tanpa Truk Tangki Air.

STRT : Fatigue $\approx 0,00\%$; Erosi $\approx 0,00\%$

STRG : Fatigue $\approx 0\%$; Erosi $\approx 1,24\%$

STdRG : Fatigue $\approx 3.607,84\%$; Erosi $\approx 954,91\%$

Terlihat bahwa tanpa keberadaan truk tangki air, nilai kerusakan pada STdRG tetap tinggi, namun mengalami penurunan yang signifikan dibandingkan dengan skenario yang melibatkan truk tangki air. Interpretasi hasil menunjukkan bahwa umur kelelahan perkerasan pada kondisi tanpa lalu lintas truk tangki air cenderung lebih panjang,



ditandai dengan penurunan signifikan akumulasi kelelahan pada STRG, nilai erosi yang turun hingga mendekati 1%, serta kontribusi STdRG yang tetap dominan namun tidak seintensif pada kondisi dengan beban truk tangki. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan truk tangki air mempercepat degradasi umur layanan perkerasan secara eksponensial, terutama akibat pengaruh beban sumbu ganda. Validasi model melalui perbandingan dengan data lapangan di Jalan Anggrek menunjukkan kesesuaian yang kuat, di mana luas kerusakan sebesar 286,8 m² dari total 5.500 m² (sekitar 4,99%) dengan dominasi retak melintang, retak blok, pelepasan butir, dan retak tepi sejalan dengan prediksi model terkait tingginya nilai erosi dan potensi kerusakan struktural. Pada kondisi tanpa truk tangki, nilai erosi model yang rendah menunjukkan kecenderungan kerusakan berada pada tingkat pemeliharaan rutin. Pengembangan model lebih lanjut mengaitkan hasil analisis kelelahan–erosi dengan estimasi biaya pemeliharaan, di mana biaya satuan perbaikan retak dihitung sekitar Rp126.400 per meter berdasarkan total biaya Rp57.760.000 untuk panjang retak 457 meter. Dalam skenario tanpa truk tangki, biaya pemeliharaan cenderung stabil dan meningkat secara linier karena pertumbuhan kerusakan yang lambat, sedangkan pada kondisi dengan truk tangki air, tingginya nilai erosi STRG dan STdRG menyebabkan percepatan pertumbuhan retak, siklus pemeliharaan yang lebih pendek, serta peningkatan biaya yang bersifat non-linier.

Tabel 16. Pendekatan Prediksi Biaya

Horizon Waktu	Tanpa Truk Tangki Air	Dengan Truk Tangki Air
5 Tahun	± Rp65 juta	± Rp80 juta
10 Tahun	± Rp75 juta	± Rp100 juta
20 Tahun	± Rp95 juta	± Rp130 juta

Model ini menunjukkan bahwa keberadaan truk tangki air berpotensi meningkatkan biaya pemeliharaan hingga sekitar 30–40% dalam horizon waktu 20 tahun.

3.2 Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan bahwa karakteristik lalu lintas di Jalan Anggrek memiliki ketimpangan signifikan, terutama karena dominasi kendaraan tangki air dalam kelompok kendaraan komersial. Meskipun secara proporsi terhadap total lalu lintas hanya sekitar 7,69%, kontribusinya terhadap kendaraan komersial mencapai lebih dari 88%, sehingga beban struktural perkerasan sangat dipengaruhi oleh jenis kendaraan ini. Kondisi ini memperkuat asumsi bahwa kerusakan perkerasan tidak hanya ditentukan oleh volume kendaraan, tetapi lebih ditentukan oleh distribusi beban sumbu dan intensitas repetisi beban berat (Li et al., 2023).

Secara mekanistik, peningkatan kerusakan lebih dipicu oleh kelompok sumbu ganda, khususnya STRG dan STdRG. Pada skenario dengan truk tangki air, nilai erosi pada STRG mencapai sekitar 36,45%, sementara pada kondisi tanpa truk hanya sekitar 1,24%. Perbedaan ini menunjukkan adanya lonjakan degradasi struktural yang sangat tajam akibat kehadiran beban berat berulang (Al-Janabi & Obaid, 2024). Fenomena ini konsisten dengan teori kerusakan perkerasan kaku, di mana erosi menjadi indikator utama kehilangan dukungan lapisan bawah yang kemudian memicu retak permukaan (Yao et al., 2022).

Kelompok sumbu STdRG menjadi faktor paling kritis dalam mempercepat kegagalan struktur. Pada kondisi dengan truk tangki air, nilai fatigue mencapai lebih dari 156.000% dan erosi lebih dari 3.300%, yang mengindikasikan bahwa kapasitas struktur telah terlampaui secara ekstrem. Sebaliknya, pada skenario tanpa truk tangki air, nilai tersebut masih tinggi namun mengalami penurunan signifikan (Abdelfattah & Al-Shamsi, 2025). Hal ini menegaskan bahwa beban sumbu berat berulang memiliki efek eksponensial terhadap akumulasi kerusakan, bukan bersifat linier (He et al., 2021).

Temuan ini juga tervalidasi oleh kondisi lapangan, di mana tingkat kerusakan mencapai sekitar 4,99% dan didominasi oleh retak melintang, retak blok, serta pelepasan butir (Abdelazim et al., 2022). Meskipun secara klasifikasi masih termasuk pemeliharaan rutin, pola kerusakan yang muncul mencerminkan indikasi awal kegagalan struktural akibat fatigue dan erosi (Osorio-Tejada et al., 2022). Dengan kata lain, kondisi visual saat ini belum mencerminkan potensi kerusakan jangka panjang yang diprediksi oleh model (Chen & Xue, 2025).

Dari perspektif umur layan, keberadaan truk tangki air terbukti mempercepat siklus kelelahan material. Pada kondisi tanpa truk tangki, laju degradasi cenderung lebih lambat dan stabil, sedangkan pada kondisi dengan truk tangki terjadi percepatan kerusakan yang menyebabkan interval pemeliharaan menjadi lebih pendek (Aszharri et al., 2024). Hal ini menunjukkan bahwa desain perkerasan eksisting tidak dirancang untuk menahan beban operasional aktual, sehingga terjadi mismatch antara kapasitas struktur dan beban lalu lintas (Utari et al., 2025).

Implikasi ekonomi dari kondisi tersebut sangat signifikan. Model prediksi menunjukkan bahwa biaya pemeliharaan meningkat secara non-linier pada skenario dengan truk tangki air. Dalam periode 20 tahun, biaya dapat mencapai sekitar Rp130 juta dibandingkan Rp95 juta pada kondisi tanpa truk tangki, atau meningkat sekitar 30–40%. Kenaikan ini disebabkan oleh frekuensi perbaikan yang lebih tinggi akibat percepatan propagasi retak.

Secara konseptual, hasil ini memperkuat pendekatan mekanistik-empiris yang menyatakan bahwa umur kelelahan perkerasan sangat dipengaruhi oleh kombinasi regangan tarik, repetisi beban, dan distribusi sumbu kendaraan (Uddin et al., 2021). Ketika salah satu parameter meningkat secara signifikan dalam hal ini beban sumbu dari truk tangki maka kerusakan akan terakumulasi lebih cepat dan menurunkan umur layan secara drastis (Blaauw et al., 2022).



Dengan demikian, pembahasan ini menegaskan bahwa permasalahan utama bukan hanya pada intensitas lalu lintas, tetapi pada struktur komposisi kendaraan yang tidak sesuai dengan desain jalan (Guest et al., 2020). Tanpa intervensi berupa pengendalian beban atau peningkatan kapasitas struktur, degradasi jalan akan terus berlangsung secara progresif dan berdampak langsung pada peningkatan biaya pemeliharaan di masa depan (Putra & Tajudin, 2021).

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa hipotesis awal mengenai pengaruh truk tangki air terhadap percepatan penurunan umur kelelahan perkerasan terbukti, yang ditunjukkan oleh nilai kelelahan dan erosi yang jauh lebih tinggi pada skenario dengan keberadaan kendaraan tersebut. Pada kondisi tanpa truk tangki air, nilai erosi STRG hanya sekitar 1,24%, sedangkan pada kondisi dengan truk tangki meningkat hingga 36,45%, mencerminkan perbedaan tingkat kerusakan yang sangat signifikan. Kelompok sumbu STdRG menjadi kontributor utama terhadap kerusakan pada kedua skenario, namun intensitasnya meningkat tajam ketika terdapat lalu lintas truk tangki air. Hasil pemodelan juga selaras dengan kondisi aktual di lapangan, yang menunjukkan tingkat kerusakan sebesar 4,99% dengan dominasi retak permukaan. Selain itu, analisis ekonomi memperlihatkan bahwa tanpa pengendalian lalu lintas truk tangki air, biaya pemeliharaan berpotensi meningkat hingga sekitar 40% dalam periode 20 tahun. Diperlukan pengelolaan lalu lintas kendaraan berat di Jalan Anggrek, khususnya truk tangki air, sebagai upaya mengurangi percepatan kerusakan perkerasan. Dalam jangka panjang, pengembangan sistem distribusi air berbasis perpipaan perlu dipertimbangkan guna menekan ketergantungan terhadap truk tangki. Selain itu, pada ruas jalan dengan karakteristik lalu lintas serupa, disarankan dilakukan peningkatan tebal pelat maupun mutu beton untuk meningkatkan ketahanan struktur. Model kelelahan erosi yang dikembangkan berbasis data aktual juga berpotensi dimanfaatkan sebagai alat bantu dalam perencanaan anggaran pemeliharaan jalan perkotaan.

REFERENCES

- Abdelazim, S., El-Hakim, M., Hossain, K., & Volovski, M. (2022). Pavement damage costs by truck class and economy of scale relative to increased loading. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1970–1980. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1832221>
- Abdelfattah, H. F. H., & Al-Shamsi, K. (2025). Estimation of damage cost from truck overload on flexible pavements based on rutting performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2025.2525524>
- Al-Janabi, A. J., & Obaid, H. A. (2024). Analysis of the Impact of Overloading for Trucks on the Design Life of Flexible Pavement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1374(1), 012089. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1374/1/012089>
- Aszharri, A., Susetyo, D. A., & Sulaiman, S. (2024). Kinerja Struktur Perkerasan Aspal Porus Modifikasi dengan Pemodelan Program KENPAVE. *Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 13(2), 91–102. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v13i2.363>
- Blaauw, S. A., Maina, J. W., Mturi, G. A. J., & Visser, A. T. (2022). Flexible pavement performance and life cycle assessment incorporating climate change impacts. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 104, 103203. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103203>
- Chen, Y., & Xue, J. (2025). Sustainable urban freight: pavement, environmental, and economic impacts of heavy-duty electric trucks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 149, 105033. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.105033>
- Cota, J., Martínez-Lazcano, C., Montoya-Alcaraz, M., García, L., Mungaray-Moctezuma, A., & Sánchez-Atondo, A. (2022). Improvement in Durability and Service of Asphalt Pavements through Regionalization Methods: A Case Study in Baja California, Mexico. *Sustainability*, 14(9), 5123. <https://doi.org/10.3390/su14095123>
- Guest, G., Zhang, J., Maadani, O., & Shirkhani, H. (2020). Incorporating the impacts of climate change into infrastructure life cycle assessments: A case study of pavement service life performance. *Journal of Industrial Ecology*, 24(2), 356–368. <https://doi.org/10.1111/jiec.12915>
- He, S., Salem, O., & Salman, B. (2021). Decision Support Framework for Project-Level Pavement Maintenance and Rehabilitation through Integrating Life Cycle Cost Analysis and Life Cycle Assessment. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(1), 04020083. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000239>
- Jasim, A. F., Ali, Z. K., & Al-Saadi, I. F. (2024). A Comprehensive Review of Life Cycle Cost Assessment of Recycled Materials in Asphalt Pavements Rehabilitation. *Advances in Civil Engineering*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/2004803>
- Keramati, A., Lu, P., Sobhani, A., & Haji Esmaeili, S. A. (2020). Impact of Forest Road Maintenance Policies on Log Transportation Cost, Routing, and Carbon-Emission Trade-Offs: Oregon Case Study. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 146(5). <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000335>
- Li, H., Jiang, J., & Li, Q. (2023). Economic and environmental assessment of a green pavement recycling solution using foamed asphalt binder based on LCA and LCCA. *Transportation Engineering*, 13, 100185. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100185>



- Mahdi, S. N., Imjai, T., Wattanapanich, C., Garcia, R., Kaur, H., & Musarat, M. A. (2023). Life cycle cost analysis of flexible pavements reinforced with geo-synthetics: a case study of new construction or repair overlays in Thailand's roads. *Engineered Science*. <https://doi.org/10.30919/es1071>
- Osorio-Tejada, J. L., Llera-Sastresa, E., & Scarpellini, S. (2022). Environmental assessment of road freight transport services beyond the tank-to-wheels analysis based on LCA. *Environment, Development and Sustainability*, 26(1), 421–451. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02715-7>
- Putra, J., & Tajudin, A. N. (2021). Desain Ulang Dan Analisis Respons Struktural Perkerasan Lentur Pada Jalan Pantura Ruas Tangerang-Serang. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 4(1), 23. <https://doi.org/10.24912/jmts.v0i0.10496>
- Tushar, Q., Santos, J., Zhang, G., Robert, D., & Giustozzi, F. (2025). Recycled used cooking oil (UCO) as a rejuvenator in high content reclaimed asphalt pavement (RAP) mixes: A life cycle assessment (LCA). *Science of The Total Environment*, 961, 178376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178376>
- Uddin, S., Lu, Q., & Nguyen, H. (2021). Truck Impact on Buried Water Pipes in Interdependent Water and Road Infrastructures. *Sustainability*, 13(20), 11288. <https://doi.org/10.3390/su132011288>
- Utari, S. N., Nurdin, Abd. R., & Mallawangeng, T. (2025). Analisa Dampak Volume Lalu Lintas dan Estimasi Berat Kendaraan Terhadap Umur Layanan Jalan. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi*, 3(1), 75–84. <https://doi.org/10.56326/jptsk.v3i1.4181>
- Xin, J., Frangopol, D. M., Akiyama, M., Zhang, L., & Pei, J. (2026). Life-cycle performance, design, maintenance, optimization, and decision-making of asphalt pavement under uncertainty: a review. *Structure and Infrastructure Engineering*, 22(2), 358–386. <https://doi.org/10.1080/15732479.2025.2552239>
- Yao, L., Leng, Z., Lan, J., Chen, R., & Jiang, J. (2022). Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130405>