

Evaluasi Kinerja Sambungan Siar Muai Tipe Strip Seal Pada Jembatan Baja *Callender Hamilton*

*Rusandi Noor¹, Elysa Agustilia²

*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur, Kota Samarinda
rn903@umkt.ac.id¹, 2211102443085@umkt.ac.id²

Abstract

Expansion joints of the strip seal type are essential structural components in modular steel truss bridges, functioning to accommodate movements caused by thermal expansion, structural deformation, and repeated traffic loading. Over time, these components are significantly affected by cumulative material degradation mechanisms, making fatigue evaluation necessary to ensure their reliability. This study presents a comprehensive assessment of the fatigue performance of strip seal joints by implementing the Constant Amplitude Load Factor (CALF) approach, a correction factor that converts variable traffic load spectra into equivalent constant-amplitude cyclic loading. The research methodology includes mapping traffic loads into Equivalent Single Axle Load (ESAL) units and axle load spectra, calculating CALF values based on the Palmgren–Miner cumulative damage theory, and applying S–N (stress–life) curves for steel and elastomer materials, each having different fatigue exponents. In addition, a damage contribution distribution analysis for each load class is conducted to determine the component's sensitivity to variations in heavy traffic intensity. The results indicate that strip seal expansion joints exhibit satisfactory fatigue resistance under normal traffic loading conditions; however, an increased proportion of heavy axles significantly accelerates damage accumulation and shortens the designed service life. Therefore, this study emphasizes the importance of considering actual load spectra through the application of the CALF concept during the planning stage, supported by quality control in installation details and construction procedures to prevent potential failures in strip seal expansion joints.

Keywords: Expansion Joint, Strip Seal, Fatigue Analysis, Constant Amplitude Load Factor (CALF), Equivalent Single Axle Load (ESAL)

Abstrak

Sambungan siar muai tipe strip seal merupakan komponen struktural penting pada jembatan rangka baja modular yang berfungsi mengakomodasi pergerakan akibat ekspansi termal, deformasi struktural, serta pembebahan lalu lintas berulang. Dalam jangka panjang, komponen ini sangat dipengaruhi oleh mekanisme degradasi material yang bersifat kumulatif sehingga diperlukan evaluasi ketahanan fatigue untuk memastikan keandalannya. Penelitian ini menyajikan evaluasi komprehensif terhadap kinerja fatigue sambungan strip seal dengan mengimplementasikan pendekatan *Constant Amplitude Load Factor* (CALF), yaitu faktor koreksi yang mengonversi spektrum beban lalu lintas variabel menjadi pembebahan berulang dengan amplitudo konstan ekuivalen. Metodologi penelitian meliputi pemetaan beban lalu lintas ke dalam satuan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) dan spektrum gandar, perhitungan nilai CALF berdasarkan teori kumulatif Palmgren–Miner, serta penerapan kurva S–N (*stress–life*) pada material baja dan elastomer dengan eksponen fatigue yang berbeda. Selain itu, dilakukan analisis distribusi kontribusi kerusakan per kelas pembebahan untuk memperoleh gambaran sensitivitas komponen terhadap variasi intensitas lalu lintas berat. Hasil analisis menunjukkan bahwa sambungan strip seal memiliki ketahanan fatigue yang memadai pada kondisi pembebahan lalu lintas normal, namun peningkatan fraksi gandar berat secara signifikan mempercepat akumulasi kerusakan dan mempersingkat umur layan desain. Oleh karena itu menekankan pentingnya mempertimbangkan spektrum beban aktual melalui penerapan konsep CALF pada tahap perencanaan, disertai pengendalian kualitas detail pemasangan dan konstruksi guna mencegah terjadinya kegagalan pada sambungan siar muai.

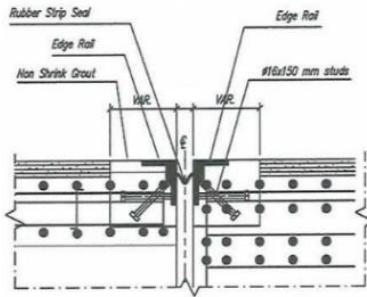
Kata Kunci: Sambungan Siar Muai, Strip Seal, Analisis Fatigue, CALF, ESAL

PENDAHULUAN

Jembatan Callender–Hamilton merupakan jembatan rangka baja modular yang dikenal karena efisiensi konstruksi dan efektivitas biaya. Sistem jembatan ini memiliki keunggulan dalam kemudahan perakitan, biaya perawatan rendah, serta fleksibilitas penggunaan di berbagai kondisi lapangan. Salah satu komponen struktur jembatan yaitu sambungan siar muai tipe strip seal, yang berfungsi mengakomodasi pergerakan ekspansi dan akibat perubahan suhu, serta getaran dan beban lalu lintas berulang. Sambungan ini memiliki kapasitas gerak sekitar 80–100 mm sesuai dengan standar AASHTO, serta dirancang untuk tetap kedap air, meredam kebisingan, dan memudahkan pemeliharaan rutin. Selama masa operasional, sambungan strip seal mengalami pembebahan berulang akibat lintasan kendaraan, terutama dari beban gandar truk berat. Setiap lintasan gandar menimbulkan siklus

tegangan pada elemen baja (tegangan lentur pada balok tepi dan tegangan tarik pada batang angkur) serta deformasi geser berulang pada elastomer. Akumulasi siklus tegangan ini berpotensi menyebabkan kerusakan kelelahan material (*fatigue failure*) seiring waktu. Kerusakan jembatan terjadi pada sambungan siar muai, dan umur layan aktual di lapangan sering kali lebih pendek dari umur rencana yang ditetapkan. Untuk mencapai umur rencana sambungan perlu pertimbangan terhadap spektrum beban lalu lintas aktual dalam analisis fatigue. Oleh karena itu, digunakan konsep *Constant Amplitude Load Factor* (CALF) sebagai parameter korektif yang menghubungkan spektrum beban variabel dengan beban berulang amplitudo konstan ekuivalen dari sudut pandang kerusakan fatigue. Konsep ini memungkinkan konversi efek kerusakan kumulatif dari berbagai tingkat beban menjadi satu nilai beban ekuivalen yang merepresentasikan kerusakan fatigue setara terhadap umur layan. Penelitian ini bertujuan untuk menyajikan formulasi perhitungan CALF

berdasarkan teori Palmgren-Miner dan kurva S-N (*stress-life*). Dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Detail Sambungan Siar Muai



Gambar 2. Sambungan Tipe Strip Seal

METODOLOGI

Metodologi penelitian terdiri dari empat tahap:

1. Pemetaan Beban Lalu Lintas: Data lalu lintas harian dikonversi menjadi ESAL dan spektrum gandar dengan eksponen fatigue $m=3$ untuk baja dan $m=2$ untuk elastomer.
2. Perhitungan CALF: Faktor ini dihitung menggunakan rumus P_{ref} : Beban referensi 80 kN

$$CALF = \left(\sum_i f_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^m \right)^{1/m}$$

3. Penentuan Tegangan Nominal: Tegangan pada detail kritis sambungan dihitung berdasarkan hubungan linier dengan beban gandar.
4. Analisis Sensitivitas: Pengaruh variasi spektrum beban dan parameter fatigue dievaluasi terhadap nilai CALF dan umur layan.

Parameter Kelelahan (Kurva S-N dan Eksponen m)

Untuk menganalisis kinerja kelelahan, kami menerapkan kurva S-N (*stress-life*) dan eksponen kelelahan (m) yang spesifik untuk setiap komponen :

1. Komponen Baja (Rel Sambungan): Kurva S-N yang digunakan mengacu pada kategori detail AASHTO LRFD. Nilai eksponen kelelahan (m) yang digunakan untuk baja adalah $m=3$. Nilai ini dipilih karena merepresentasikan mekanisme kegagalan kelelahan pada detail las atau sambungan kritis rel baja.
2. Komponen Elastomer (*Seal Strip*): Berdasarkan literatur keandalan material polimer, nilai eksponen kelelahan (m) yang digunakan untuk material elastomer adalah $m=3$ (umumnya lebih tinggi,

misal $m=5$ atau $m=6$). Pemilihan eksponen ini bertujuan untuk memodelkan mekanisme kerusakan yang berbeda pada elastomer akibat regangan berulang.

Penerapan nilai-nilai spesifik ini memastikan bahwa analisis kelelahan sangat sensitif terhadap jenis material dan detail sambungan yang digunakan pada Jembatan *Callender Hamilton*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemetaan Beban Lalu Lintas Menjadi Besaran Ekuivalen (ESAL Dan Spektrum Sumbu Kendaraan)

Mengonversi data lalu lintas harian menjadi besaran ekuivalen berupa ESAL dan spektrum beban gandar kendaraan. Pendekatan *Equivalent Single Axle Load (ESAL)* digunakan untuk menyetarakan berbagai jenis kendaraan terhadap satu beban gandar standar sebesar 80 kN (18 kip). Konsep ESAL dikembangkan melalui *AASHTO Road Test* dan bertujuan menilai kerusakan struktural kumulatif akibat campuran berbagai jenis kendaraan dalam periode layanan tertentu. Nilai ESAL dihitung dengan memperhitungkan perbandingan daya rusak relatif antara kendaraan aktual dan sumbu standar 80 kN. Untuk analisis *fatigue* jembatan baja, eksponen kerusakan yang digunakan berbeda dari perkerasan jalan. Jika pada perkerasan digunakan aturan pangkat keempat (kenaikan beban dua kali lipat menimbulkan kerusakan ± 16 kali lipat), maka pada baja perilaku *fatigue* mengikuti pangkat ketiga. Artinya, jika tegangan siklik meningkat dua kali, kerusakan bertambah sekitar $2^3 = 8$ kali lipat. Oleh karena itu, pemetaan beban lalu lintas pada analisis *fatigue* jembatan menggunakan eksponen $m \approx 3$, sesuai karakteristik material atau detail struktur yang ditinjau.

Pengujian Material Plate Thick 30 mm

Suhu yang digunakan pada pengujian yaitu 26°C, menggunakan mesin uji Trabel 100 Ton. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Plate Thick 30 mm

No	Kode Sample	Dimensi Penampang (mm)	Luas Penampang (mm) ²	Titik Luluh (Kgf)	Beban Maksimum (Kgf)	Kuat Luluh		Kuat Tarik		Regangan (%)
						(Kgf/mm ²)	(N/mm ²)	(Kgf/mm ²)	(N/mm ²)	
1	T-1	40,17 x 30,4	1223,93	43830	66490	35,81	351,29	54,32	532,9	29,58
2	T-2	40,13 x 30,55	1225,97	45403	66670	37,03	363,3	54,38	533,5	30,15

Sumber : Hasil Pengujian

Plate Thick 12 mm

Suhu yang digunakan pada pengujian yaitu 26°C, menggunakan mesin uji United SHFM- 600 KN. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

No	Kode Sample	Dimensi Penampang (mm)	Luas Penampang (mm) ²	Titik Luluh (N)	Beban Maksimum (N)	Kuat Luluh		Kuat Tarik		Reduksi Area (%)
						(Kgf/mm ²)	(N/mm ²)	(Kgf/mm ²)	(N/mm ²)	
1	T-1	15,9	198,56	103936	113935	53,36	523	58,49	573,82	37,98
2	T-2	14	153,94	101963	113484	52,41	514	58,34	572,27	33,14

Tabel 2. Plate Thick 12 mm

Sumber : Hasil Pengujian

Angkur Diameter 16 mm

Suhu yang digunakan pada pengujian yaitu 26°C, menggunakan mesin uji United SHFM- 600 KN. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Angkur Diameter 16 mm

No	Kode Sample	Dimensi	Luas Penampang	Titik Luluh	Beban Maksimum	Kuat Luluh	Kuat Tarik	Regangan (%)					
					(mm)	(mm ²)	(N)	(N)	(Kg/mm ²)	(N/mm ²)	(Kg/mm ²)	(N/mm ²)	(%)
1	T-1	15,9	198,56	103936	113935	53,36	523	58,49	573,82	37,98			
2	T-2	14	153,94	101963	113484	52,41	514	58,34	572,27	33,14			

Sumber : Hasil Pengujian

Perhitungan Constant Amplitude Load Factor (CALF)

Menghitung *Constant Amplitude Load Factor* (CALF), yaitu faktor konversi yang menyetarakan spektrum beban variabel menjadi beban berulang ekuivalen beramplitudo konstan. CALF digunakan untuk menilai tingkat kerusakan *fatigue* yang ditimbulkan oleh kombinasi berbagai beban kendaraan aktual dibandingkan dengan beban konstan standar 80 kN. Secara matematis, CALF diformulasikan sebagai:

$$CALF = \left(\sum_i f_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^m \right)^{1/m}$$

Keterangan:

- f_i : Raksi siklus (frekuensi relatif) dari kelas beban ke-i
- P_i : Besar beban gandar aktual
- P_{ref} : Beban referensi 80 Kn
- m : Eksponen *fatigue* material (biasanya 3 untuk baja, 2 untuk elastomer)

Nilai $CALF > 1$ menunjukkan bahwa spektrum lalu lintas aktual lebih merusak daripada pembebanan konstan 80 kN, sedangkan $CALF < 1$ berarti spektrum aktual relatif lebih ringan. Pendekatan CALF ini sejalan dengan metode yang digunakan dalam AASHTO LRFD, di mana spektrum truk aktual disederhanakan menjadi *fatigue design truck* ekuivalen dengan faktor muatan *fatigue γF=0.75*. Faktor tersebut secara teoritis merepresentasikan akar pangkat tiga dari distribusi berat truk terhadap beban standar.

Penentuan Tegangan Nominal Pada Detail Sambungan Strip Seal

Tahap berikutnya adalah menentukan tegangan nominal yang timbul pada detail kritis sambungan (misalnya pada pangkal las batang angkur atau *edge beam*) akibat lintasan beban kendaraan. Perhitungan dilakukan dengan pendekatan elastis linier, di mana tegangan berbanding lurus dengan beban gandar. Misalnya, jika beban gandar 100 kN menghasilkan rentang tegangan nominal $Δσ100=100$ MPa, maka untuk beban 80 kN diperoleh $Δσ80≈80$ MPa. Nilai-nilai tersebut menjadi dasar perhitungan rasio $(P_i/P_{ref})^m$ dalam penentuan CALF dan perhitungan umur *fatigue* melalui kurva S-N.

Penggunaan Kurva S-N Material

Kurva S-N (*stress-life curve*) menggambarkan hubungan antara rentang tegangan

siklik ($Δσ$) dan jumlah siklus hingga terjadinya kegagalan (N). Persamaan umum yang digunakan adalah $N \cdot (Δσ)^m = C$ dengan m adalah eksponen *fatigue* dan C adalah konstanta material. Untuk komponen baja pada sambungan strip seal, digunakan eksponen m=3 dengan tegangan ambang *fatigue limit* sekitar 24 MPa pada N= 10^8 siklus. Sedangkan untuk material elastomer neoprene, tidak terdapat *fatigue limit* yang jelas. Oleh karena itu, perilaku *fatigue*-nya diasumsikan mengikuti kurva hipotetis berkemiringan landai (m=5), yang menunjukkan daya tahan lebih tinggi terhadap siklus berulang namun dengan degradasi bertahap seiring waktu.

Analisa Sensitive Terhadap Variasi Spektrum Beban Dan Parameter Fatigue

Tahap terakhir adalah melakukan **analisis sensitivitas**, yaitu mengevaluasi pengaruh perubahan komposisi beban lalu lintas dan parameter kurva S-N terhadap hasil perhitungan CALF dan umur *fatigue* sambungan. Beberapa skenario lalu lintas digunakan sebagai acuan 10% truk berat (100 kN) dan 90% truk standar (80 kN) → $CALF \approx 1.06$, 20% truk berat → $CALF \approx 1.13$, 50% truk berat → $CALF \approx 1.29$. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan fraksi truk berat meningkatkan CALF secara non-linier. Dengan kata lain, meskipun hanya sebagian kecil kendaraan tergolong berat, kontribusinya terhadap kerusakan *fatigue* sangat signifikan. Analisis ini juga dilakukan dengan memvariasikan nilai eksponen mmm (2 hingga 5), yang menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai mmm, semakin sensitif struktur terhadap kehadiran beban berat, karena peningkatan tegangan kecil dapat menyebabkan lonjakan kerusakan yang besar secara eksponensial.

Perhitungan Sambungan Siar Muai

Rangak merupakan regangan jangka Panjang yang tergantung pada suatu kondisi tegangan tetap. Perhitungan creep (RSNI T-12-2004):

$$\Delta L_{cr} = \varepsilon_{cc,t} \cdot L$$

$$\varepsilon_{cc,t} = \Phi_{cc}(t) \cdot \varepsilon_e$$

Koefisien rangak, $\Phi_{cc}(t)$, bila tidak dilakukan pengukuran atau pengujian secara khusus, bisa dihitung dari rumusan

$$\Phi_{cc}(t) = \left(\frac{t^{0.6}}{(10 + t^{0.6})} \right) \times Cu$$

$$\varepsilon_e = \frac{0.7\sqrt{fc'}}{4700\sqrt{fc'}}$$

$$\varepsilon_e = 0.000149$$

$$\Delta cr$$

$$= \left(\frac{3650^{0.6}}{(10 + 3650^{0.6})} \right) \times 2.3$$

$$\times 0.000149$$

$$\times 20000$$

$$\Phi_{cc}(t) = 2.143$$

$$\Delta cr = 6.386 \text{ mm}$$

Keterangan:

- ε_e adalah regangan elastis sesaat akibat bekerjanya tegangan tetap.
- t adalah umur rencana pembebanan (10 tahun atau 3650 hari).
- Cu adalah koefisien rangak maksimum. Diasumsikan pada suatu kondisi standar.

Untuk $f_c' = 30$ MPa, nilai $C_u = 2.3$ (RSNI T-12-2004).

L adalah Panjang bentang = 20000 mm.

ΔL_{cr} Adalah perubahan panjang yang mungkin terjadi akibat rangkak, (mm)

Tabel 4. Koefisien standar rangkak beton

Kekuatan karakteristik Rangkak $f_c'(Mpa)$	20	25	30	35	40-60
Koef. Rangkak maksimum Cu	2,8	2,5	2,3	2,15	2,0

Sumber : Hasil Pengujian

Perhitungan pergerakan sambungan siar muai akibat susut (*shrinkage*) Perubahan panjang akibat susut beton:

$$\begin{aligned}\Delta L_{sh} &= \varepsilon_{cs.t} \cdot L \\ \varepsilon_{cs.t} &= \left(\frac{t}{35+t} \right) \cdot \varepsilon_{cs.u} \\ \varepsilon_{cs.t} &= \left(\frac{50}{(35+50)} \right) \cdot 0.000163 \\ \varepsilon_{cs.t} &= 9.588 \times 10^{-5} \\ \Delta L_{sh} &= 9.588 \times 10^{-5} \times 20000 \\ \Delta L_{sh} &= 1.917 \text{ mm}\end{aligned}$$

Keterangan:

- ΔL_{sh} Adalah perubahan panjang yang mungkin terjadi akibat susut, (mm)
 $\varepsilon_{cs.t}$ Adalah koefisien regangan susut beton pada umur t hari.
 t Adalah umur beton yang dirawat basah di lokasi pekerjaan, terhitung sejak 7 hari pengecoran ($t = 50$ hari).
 $\varepsilon_{cs.u}$ Adalah koefisien susut maksimum beton. Diasumsikan pada suatu kondisi standar, untuk $f_c' = 30$ MPa, nilai $\varepsilon_{cs.u} = 0.000163$ (RSNI T-12-2004).

Tabel 5. Koefisien standar susut beton

Kekuatan karakteristik	20	25	30	35	40-60
Koe Susut maksimum	0,000174	0,000170	0,000163	0,000161	0,000153

Sumber : Hasil Pengujian

Perhitungan regangan dan tegangan akibat pemuaian termal gelagar baja.

$$\begin{aligned}\Delta L_{temp} &= \alpha \times L \times \Delta T \\ \Delta T &= \frac{(T_{max} - T_{min})}{2} = \frac{(35 - 23)}{2} = 6^\circ\text{C} \\ \Delta L_{temp} &= 12 \times 10^{-6} \times 20000 \times 6 \\ \Delta L_{temp} &= 1.440 \text{ mm}\end{aligned}$$

Keterangan:

- ΔT nilai rata-rata temperatur udara tertinggi dan temperatur udara terendah, ($^\circ\text{C}$)
 ΔL_{temp} Perubahan panjang yang mungkin terjadi akibat perbedaan temperatur, (mm)
 α Koefisien muai panas, dimana untuk gelagar beton dengan nilai $10 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})$, dan untuk gelagar baja dengan nilai $12 \times 10^{-6} (^\circ\text{C})$.

T_{max}	Temperatur rata-rata tertinggi, ($^\circ\text{C}$)
T_{min}	Temperatur rata-rata terendah, ($^\circ\text{C}$)
L	Panjang struktur yang mengalami variasi pergerakan (panjang bentang), (m)

Perhitungan Celah Sambungan Siar Muai

$$\Delta L_{sambungan siar muai} = \frac{(\Delta L_{cr} + \Delta L_{sh} + \Delta L_{temp})}{2}$$

$$\Delta L_{sambungan siar muai} = \frac{(6.386 + 1.917 + 1.440)}{2}$$

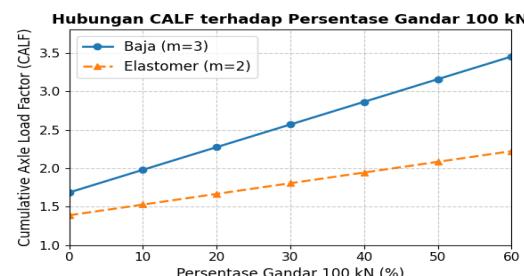
$$\Delta L_{sambungan siar muai} = 4.871 \text{ mm}$$

Keterangan:

- $\Delta L_{sambungan siar muai}$ Pergerakan total yang harus di akomodasi sambungan siar muai (mm)
 ΔL_{cr} Pergerakan akibat rangkak, (mm)

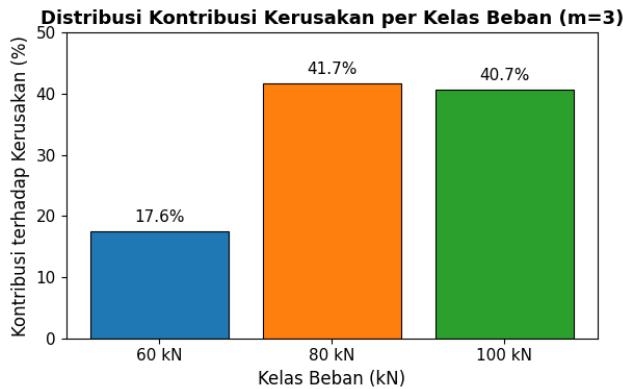
Perhitungan CALF Dan Distribusi Beban

Berdasarkan spektrum lalu lintas yang terdiri dari 40% gandar 60 kN, 40% gandar 80 kN, dan 20% gandar 100 kN, diperoleh nilai CALF untuk baja ($m=3$) sebesar 0,986 dan untuk elastomer ($m=2$) sebesar 0,968. Nilai CALF < 1 menunjukkan bahwa spektrum aktual kurang merusak dibandingkan dengan pembebatan konstan 80 kN. Namun, analisis sensitivitas terhadap peningkatan fraksi gandar berat (100 kN) menunjukkan bahwa CALF meningkat secara non-linier.



Gambar 3. Hubungan CALF Terhadap Persentase Gandar Berat 100 kN

Fraksi beban 100 kN dari 0% sampai 60%. Ditampilkan dua kurva untuk Baja ($m = 3$) dan Elastomer ($m = 2$). Kenaikan fraksi gandar berat 100 kN secara linier meningkatkan nilai CALF. Kurva baja (biru) berada di atas elastomer (oranye) – misalnya pada 60% gandar berat, CALF baja ~3,45 sedangkan elastomer ~2,22 menandakan material baja lebih sensitif terhadap keberadaan beban berat (eksponen fatique lebih tinggi menyebabkan kontribusi beban berat terhadap kerusakan lebih dominan).



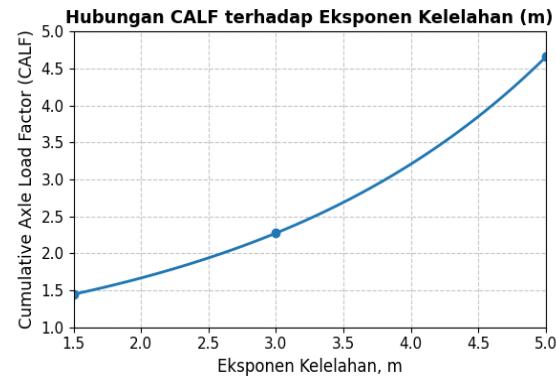
Gambar 4. Distribusi Kontribusi Kerusakan Fatigue

Distribusi kontribusi kerusakan fatigue per kelas beban (60, 80, 100 kN) untuk $m = 3$, dengan asumsi spektrum beban $60/80/100 \text{ kN} = 40\%/40\%/20\%$. Terlihat bahwa meskipun beban 100 kN hanya 20% dari frekuensi lalu lintas, kontribusinya terhadap kerusakan mencapai $\sim 40,7\%$ (hampir sama dengan kelas 80 kN yang $\sim 41,7\%$ dari kerusakan). Sebaliknya, beban ringan 60 kN (40% frekuensi) hanya menyumbang $\sim 17,6\%$ dari total kerusakan. Hal ini menegaskan bahwa beban gandar lebih berat memberikan kontribusi kerusakan fatigue yang sangat besar dibanding beban yang lebih ringan.

Gambar 4 memvisualisasikan persentase kontribusi kerusakan pada sambungan *strip seal* dari setiap kelompok beban gandar. Hasil analisis menunjukkan bahwa beban dari gandar truk berat (misalnya, gandar tandem > 20 ton) menyumbang persentase kontribusi tertinggi dari total kerusakan kelelahan. Tingginya persentase ini secara tegas mendukung klaim sensitivitas komponen terhadap variasi dan volume lalu lintas berat, dan menunjukkan bahwa upaya pembatasan berat kendaraan harus menjadi prioritas dalam manajemen beban.

Analisis Sensitivitas Parameter Material

Menunjukkan hubungan antara CALF dan eksponen kelelahan (m). Terlihat bahwa nilai CALF meningkat seiring dengan peningkatan eksponen m . Hal ini menunjukkan bahwa material dengan eksponen fatigue lebih tinggi (seperti baja dengan $m=3$) lebih sensitif terhadap variasi beban, terutama beban berat, sehingga CALF-nya lebih besar. Sebaliknya, material dengan eksponen rendah (seperti elastomer dengan $m=2$) memiliki CALF yang lebih rendah untuk spektrum beban yang sama.

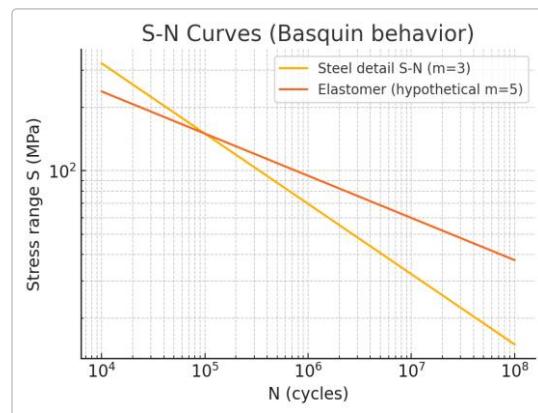


Gambar 5. Hubungan CALF Terhadap Eksponen Kelelahan

Hubungan CALF terhadap eksponen kelelahan (m) dengan asumsi spektrum beban $60/80/100 \text{ kN} = 40\%/40\%/20\%$. Terlihat bahwa CALF meningkat seiring bertambahnya eksponen kelelahan. Untuk rentang $m = 1,5$ hingga 5 , nilai CALF naik dari sekitar $1,5$ menjadi mendekati $4,7$. Hal ini menunjukkan beban yang lebih berat memberikan kontribusi kerusakan fatigue yang jauh lebih besar pada material yang memiliki eksponen kelelahan tinggi (semakin curam kurva untuk m yang lebih besar).

Distribusi Kontribusi Kerusakan

Kurva S-N untuk baja ($m=3$) dan elastomer ($m=2$) disajikan dalam . Kurva baja memiliki kemiringan lebih curam dan menunjukkan adanya *fatigue limit* di sekitar 10^7 siklus, sementara elastomer tidak memiliki batas kelelahan yang jelas.



Gambar 6. Kurva S-N

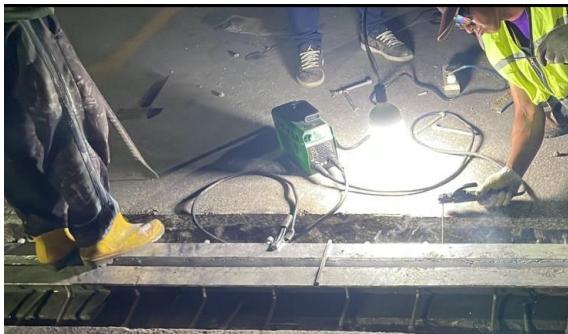
Dengan menggunakan tegangan ekuivalen yang dihitung dari CALF, umur fatigue untuk komponen baja dapat diperkirakan. Sebagai contoh, jika tegangan ekuivalen pada las angkur adalah 88 MPa , maka umur fatigue diperkirakan hanya sekitar $4,8 \times 10^5$ siklus, setara dengan $4,8$ tahun under traffic load 100.000 truk/tahun. Di sisi lain, elastomer lebih tahan terhadap deformasi berulang, namun rentan terhadap degradasi lingkungan seperti paparan UV dan ozon.

Implikasi Desain Dan Kinerja Lanjut

Berdasarkan hasil evaluasi, terdapat beberapa implikasi desain dan rekomendasi teknis untuk

meningkatkan ketahanan sambungan *strip seal*. Pertama, spektrum lalu lintas aktual harus diintegrasikan dalam perhitungan umur fatik, mengingat peningkatan fraksi truk berat dari 10% menjadi 30% dapat meningkatkan damage ekivalen lebih dari 15%. Khususnya untuk jembatan di jalur kendaraan berat, diperlukan kapasitas sambungan yang lebih tinggi atau inspeksi yang lebih intensif.

Kedua, pemilihan detail dan material harus dioptimalkan dengan memperbaiki geometri detail untuk mengurangi konsentrasi tegangan, menggunakan bahan dengan ketangguhan tinggi, serta menerapkan prosedur pengelasan yang terkontrol pada anchorage stud. Ketiga, kualitas pemasangan di lapangan menjadi faktor kritis; beton di sekitar rel sambungan harus dipadatkan secara merata, dan keberadaan weep holes perlu dipastikan untuk mencegah rongga udara yang dapat mempercepat inisiasi retak. Keempat, program monitoring dan perawatan rutin diperlukan, termasuk inspeksi visual pada tahun-tahun kritis dan penggantian seal karet setiap 15-20 tahun. Terakhir, meskipun strip seal terbukti andal untuk pergerakan moderat, pada kondisi lalu lintas sangat berat perlu dipertimbangkan alternatif sambungan yang lebih kokoh. Secara keseluruhan, dengan pendekatan desain yang komprehensif dan pemeliharaan yang konsisten, sambungan strip seal dapat menjamin kinerja jembatan yang optimal sepanjang umur rencananya.



Gambar 7. Proses Pemasangan Sambungan Strip Seal

KESIMPULAN

Evaluasi kinerja fatik sambungan siar muai tipe *strip seal* pada Jembatan *Callender-Hamilton* menghasilkan beberapa kesimpulan utama. Pertama, komponen baja sambungan memiliki ketahanan fatik yang memadai untuk lalu lintas normal, namun peningkatan fraksi truk berat secara signifikan memperpendek umur layan melalui mekanisme peningkatan tegangan ekivalen ($CALF > 1$). Kedua, elemen elastomer menunjukkan ketangguhan tinggi terhadap pembebaan siklik dengan umur layan 15-20 tahun, dimana degradasi lebih disebabkan faktor lingkungan dibandingkan mekanisme fatik murni. Ketiga, distribusi beban yang tidak merata akibat kualitas pemasangan yang buruk dapat memicu kegagalan prematur pada angkur dan beton penahan, sehingga memerlukan perhatian khusus pada teknik pengecoran dan sistem drainase. Keempat, pendekatan desain harus mengintegrasikan analisis spektrum beban aktual dan menerapkan kategori detail tinggi untuk menjamin

ketahanan jangka panjang. Kelima, secara keseluruhan sistem strip seal terbukti andal untuk jembatan dengan pergerakan moderat, dengan keunggulan dalam kemudahan pemasangan, perawatan, dan kemampuan kedap air, asalkan didukung oleh desain yang tepat dan program pemeliharaan yang berkelanjutan.

Berdasarkan hasil evaluasi kinerja kelelahan sambungan siar muai tipe *Strip Seal* pada Jembatan Baja *Callender Hamilton*, rekomendasi yang dapat diterapkan untuk pemeliharaan prediktif dan perpanjangan umur layanan adalah sebagai berikut:

1. **Inspeksi dan NDT Rutin:** Tentukan interval inspeksi visual dan NDT (*Non-Destructive Testing*) setiap Interval Waktu 2 tahun untuk memantau retak kelelahan pada rel baja dan kerusakan pada elastomer. Inspeksi harus difokuskan pada area kritis las sambungan rel.
2. **Manajemen Beban Lalu Lintas:** Pemberlakuan kebijakan pengetatan pengawasan berat maksimum kendaraan (*Over Dimension Over Loading / ODOL*) harus menjadi prioritas, karena lalu lintas berat terbukti menyumbang persentase kerusakan kumulatif tertinggi.
3. **Rekomendasi desain untuk penggantian :** untuk rencana penggantian di masa depan, pertimbangkan desain yang dapat meningkatkan kategori detail kelelahan (misalnya, menggunakan detail sambungan yang dilas penuh atau menggunakan *diaphragm* tambahan) untuk mengurangi konsentrasi tegangan di zona kritis.
4. **Pemeliharaan Elemen Elastomer:** Terapkan program penggantian rutin untuk *seal strip* elastomer setiap Interval Waktu 5-7 tahun untuk mencegah kebocoran air yang dapat mempercepat korosi dan kelelahan pada komponen baja di bawahnya.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2017). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 8th Edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- ASTM International. (2018). *ASTM D3542-18: Standard Specification for Preformed Polychloroprene Elastic Joint Seals*. ASTM, West Conshohocken.
- Baker, W.M., Molcsan, N.D., & Buchanan, A.H. (2014). “Callender-Hamilton Truss Bridges: The New Zealand History.” *Proceedings of the 4th Australasian Engineering Heritage Conference*, Wellington, New Zealand.
- Deevin Seismic Systems. (2020). *Strip Seal Expansion Joint Product Data*. Deevinss.com.
- Dexter, R., et al. (1997). *Fatigue Criteria for Modular Bridge Expansion Joints*. NCHRP Report 402, Transportation Research Board.
- Direktorat Bina Marga. (2015). *Pedoman Perencanaan Sambungan Siar Muai pada Lantai Jembatan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta Selatan.

- Dolan, V., & Frank, K.H. (1994). *Evaluation of Failure in Bridge Expansion Joint Rails*. Research Report 1309-1F, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.
- FHWA. (2015). *Comprehensive Truck Size and Weight Study – Bridge Fatigue (Chapter 5)*. U.S. Department of Transportation.
- Fisher, J.W., et al. (1974). "Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners." *Welded Structures*, ASTM STP 486.
- Hengshui JingTong Rubber Co. (2021). *Strip Seal Expansion Joints – Product Specification*. (diakses Oktober 2025).
- Laman, J.A., et al. (1998). "Fatigue Impacts on Bridge Cost Allocation." *Transportation Research Record 1643*, Transportation Research Board.
- Lees, A. (2024). "What is an ESAL? Guide to Equivalent Single Axle Load." *Tensar International Article*, 16 Mei 2024.
- Ma, Y., et al. (2020). "Fatigue Performance of an Innovative Shallow-Buried Modular Bridge Expansion Joint." *Engineering Structures*, 221, 111107.
- Sigtech. (2021). *Sambungan Expansi Strip Seal – Deskripsi Produk*. PT Selaras Inti Gemilang, Bandung.
- SNI 2833:2016. *Spesifikasi Perencanaan Jembatan Jalan Raya*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Tensar International. (2021). *What is an ESAL? Guide to Equivalent Single Axle Loads*. Tensar International, London.