

EVALUASI KINERJA SAMBUNGAN SIAR MUAI TIPE STRIP SEAL PADA JEMBATAN BAJA CALLENDER HAMILTON

Rusandi Noor¹, Elysa Agustilia²

e-mail: r903@umkt.ac.id¹, 2211102443085@umkt.ac.id²

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur

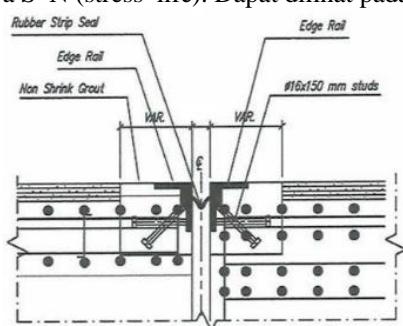
ABSTRAK

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

1. 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

2. METODOLOGI

Metodologi penelitian terdiri dari empat tahap utama:

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.

2.1 Pemetaan Beban Lalu Lintas menjadi Besaran Ekuivalen (ESAL dan Spektrum Sumbu Kendaraaan)

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 *AASHO 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.

2.2 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	Luas Penampang	Titik Luluh	Beban Maksimum	Kuat Luluh		Kuat Tarik	Regangan (%)		
						(mm)	(mm) ²	(Kgf)	(Kgf)	(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	532,9	29,58
2	T-2	40,13 x 30,55	1225,97	45403	66670	37,03	363,3	54,38	533,4	533,4	30,15

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.

Tabel. 2 Plate Thick 12 mm

No	Kode Sample	Dimensi	Luas Penampang	Titik Luluh	Beban Maksimum	Kuat Luluh		Kuat Tarik	Regangan (%)		
						(mm)	(mm) ²	(N)	(N)	(Kgf/mm ²)	(N/mm ²)
1	T-1	39,82 x 11,89	473,46	153084	216661	32,96	323,33	46,65	457,61	457,61	24,49
2	T-2	40,04 x 11,84	474,07	153369	217759	32,98	323,52	46,82	459,34	459,34	28,80

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 (%)	Reduksi Area (%)
						(mm)	(mm) ²	(N)	(N)	(Kgf/mm ²)	(N/mm ²)
1	T-1	15,9	198,56	103936	113935	53,36	523,45	58,49	573,82	37,98	68,37
2	T-2	14,00	153,94	101963	113484	52,41	514,16	58,34	572,27	33,14	72,24

2.3 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:

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

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.

2.4 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 $\Delta\sigma_{100}=100$ MPa, maka untuk beban 80 kN diperoleh $\Delta\sigma_{80}\approx80$ MPa. Nilai-nilai tersebut menjadi dasar perhitungan rasio $(P_i / P_{ref})^m$ dalam penentuan CALF dan perhitungan umur *fatigue* melalui kurva S-N.

2.5 Penggunaan Kurva S-N Material

Kurva S-N (*stress-life curve*) menggambarkan hubungan antara rentang tegangan siklik ($\Delta\sigma$) dan jumlah siklus hingga terjadinya kegagalan (N). Persamaan umum yang digunakan adalah $N \cdot (\Delta\sigma)^m = C$ 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.

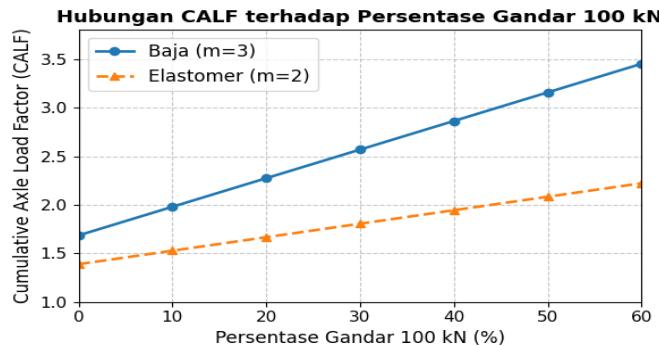
2.6 Analisis Sensitivitas terhadap Variasi Spektrum Beban dan Parameter Fatigue

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 m (2 hingga 5), yang menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai m, semakin sensitif struktur terhadap kehadiran beban berat, karena peningkatan tegangan kecil dapat menyebabkan lonjakan kerusakan yang besar secara eksponensial.

3. Hasil dan Pembahasan

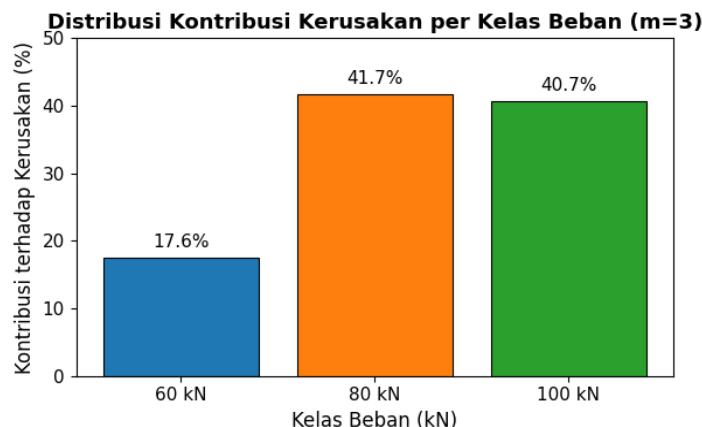
3.1 Perhitungan CALF dan Distribusi Beban

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 pembebanan 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 (orange) – 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).

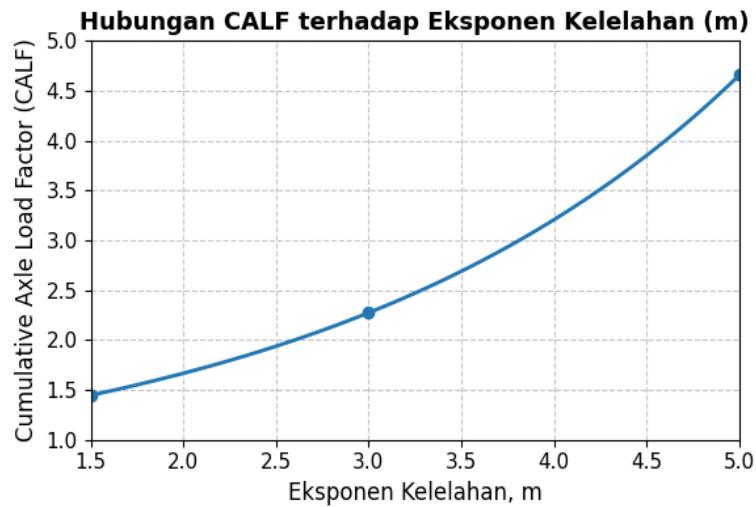


Gambar 4. Distribusi kontribusi kerusakan fatigue

Distribusi kontribusi kerusakan fatigue per kelas beban (60, 80, 100 kN) untuk $m = 3$, dengan asumsi spektrum beban 60/80/100 kN = 40%/40%/20%. Terlihat bahwa meskipun beban 100 kN hanya 20% dari frekuensi lalu lintas, kontribusinya terhadap kerusakan mencapai ~40,7% (hampir sama dengan kelas 80 kN yang ~41,7% dari kerusakan). Sebaliknya, beban ringan 60 kN (40% frekuensi) hanya menyumbang ~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.

3.3 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.

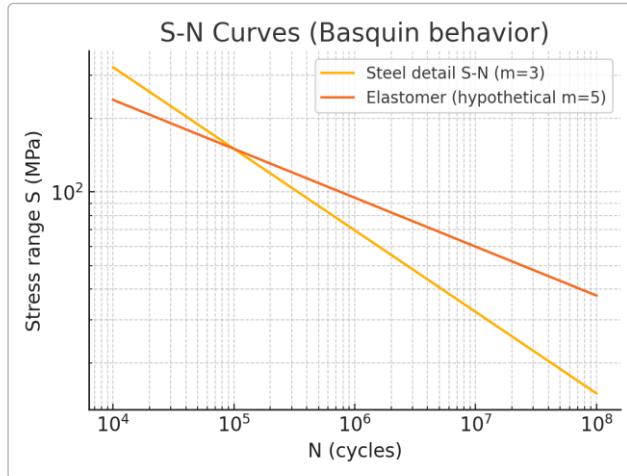


Gambar 5. Hubungan CALF terhadap eksponen kelelahan (m)

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).

3.4 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.

3.5 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 ekuivalen 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

4. 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 pembebanan 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.

Daftar Pustaka Dan Penulisan 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.