

## Evaluasi kinerja pilar Jembatan Lemah Ireng II berdasarkan *performance based seismic design*

Farah Amrina<sup>1,\*</sup>, Muhammad Riyansyah<sup>2</sup>, Aris Aryanto<sup>3</sup>, dan Erwin Lim<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

---

### Article Info

#### Article history:

Received: May, 09 2023

Revised: May, 26 2023

Accepted: May, 29 2023

Available online: May, 31 2023

---

### Keywords:

*Performance-based design*

*Performance level*

*Non-linear time history analysis*

---

### Corresponding Author:

Farah Amrina

25021023@mahasiswa.itb.

ac.id

### Abstract

*Lemah Ireng II Bridge is a box-girder balanced cantilever bridge in Semarang Regency, Central Java, completed in 2014. The renewal of bridge loading regulations in 2016 consisted of SNI 1725:2016 for standard load and SNI 2833:2016 for earthquake load. Changes in earthquake loading regulations resulted in an increase in the ground surface spectra value in the short period ( $S_d$ ,  $T=0.2$  second) in the longitudinal direction by 38.47% and the transverse direction by 45.39% because of updating the earthquake map and the earthquake response modification factor. The Non-Linear Time History Analysis (NLTHA) method was used to determine the level of bridge performance against the applicable earthquake regulations based on the pier structure parameters. The NLTHA method uses seven deaggregated ground motion records to represent the ground motions at the bridge site. Parameter limits at the pier to determine the performance level of the bridge based on NCHRP Synthesis 440 and NCHRP Research Report 949. According to the results of the performance-based analysis, the bridge pier structure meets the Fully Operational performance level based on the parameters of drift, the compressive strain of concrete, and the tensile strain of steel reinforcement. At this level of performance, the structure suffers very little damage after an earthquake, so no repairs are needed, and the bridge can function immediately after the earthquake.*

Copyright © 2023 Universitas Islam Indonesia  
All rights reserved

---

### Pendahuluan

Indonesia adalah negara dengan intensitas gempa yang cukup tinggi. Hal tersebut diakibatkan Indonesia berada pada pertemuan empat lempeng yaitu Lempeng Benua Eurasia, Lempeng Samudera Indo-Australia, Lempeng Samudera Pasifik, dan Lempeng Laut Filipina. Upaya meminimalisir dampak beban seismik atau gempa bumi adalah mendesain jembatan tahan terhadap gempa sesuai dengan level kinerja rencana. Perkembangan penelitian gempa yang telah dilakukan menghasilkan pembaharuan peraturan pembebanan jembatan pada tahun 2016 yaitu SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan dan SNI

2833:2016 tentang Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa (Badan Standardisasi Nasional, 2016a, 2016b).

Jembatan Lemah Ireng II merupakan jembatan tipe *balance cantilever* atau integral tiga bentang dengan total panjang jembatan 300 meter ditunjukkan pada Gambar 1. Jembatan tipe integral merupakan jembatan tanpa sambungan antara superstruktur (girder) dan sub struktur (pier) memiliki kelebihan mengurangi biaya perawatan akibat siar muai dan tumpuan (Sigdel dkk., 2021). Jembatan tersebut selesai dibangun pada tahun 2014 terletak di Ruas Tol Semarang-Solo KM. 400, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah. Jembatan tersebut direncanakan

berdasarkan peraturan RSNI T-02-2005 tentang Standar Pembebanan untuk Jembatan (Badan Standardisasi Nasional, 2005), SNI 2833:2008 tentang Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan (Badan Standardisasi Nasional, 2008) dan Standar Specifications for Highway Bridge 17<sup>th</sup> Edition (AASHTO, 2002).



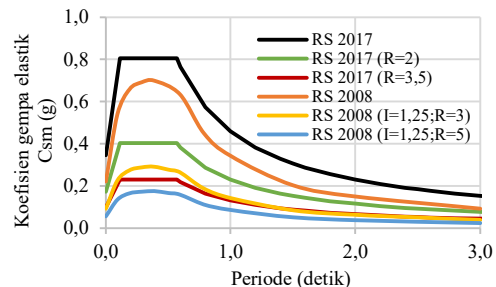
Gambar 1. Jembatan Lemah Ireng II

Jembatan khusus yang dibangun sebelum berlakunya SNI 1725:2016 dan SNI 2833:2016 direkomendasikan untuk dilakukan analisis ulang menggunakan peraturan tersebut untuk mengantisipasi kemungkinan kerusakan atau kegagalan yang terjadi (Sinatra dkk., 2020). Baik kerusakan maupun perubahan peraturan pada masa layan dapat menyebabkan struktur tidak lagi memenuhi persyaratan sehingga perkuatan dibutuhkan untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas jembatan (Suarjana dkk., 2020).

Kombinasi pembebanan gempa pada RSNI T-03-2005 tidak memperhitungkan beban lalu lintas, sedangkan pada SNI 1725:2016 memperhitungkan. Peningkatan beban lalu lintas mempengaruhi kondisi jembatan, dengan meningkatnya beban lalu lintas maka semakin rendah *load rating* jembatan (Riyansyah dkk., 2020). Perubahan pada pembebanan gempa yaitu peta gempa dan faktor modifikasi respon gempa. Pada SNI 2833:2008 menggunakan Peta Zona Gempa Indonesia Pusat Litbang Teknologi Sumber Daya Air periode ulang 500 tahun dengan faktor modifikasi respon gempa untuk kolom tunggal sebesar 3-4 dan kolom majemuk sebesar 5-6 sedangkan pada peraturan yang berlaku yaitu SNI 2833:2016 Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017 dengan periode ulang 1000 tahun dengan faktor modifikasi respon gempa sebesar 2 untuk kolom tunggal dan 3,5 untuk kolom majemuk.

Perbandingan respon spektrum gempa saat perencanaan menggunakan peraturan SNI 2833:2008 dan respon spektrum berdasarkan

peraturan yang berlaku saat ini SNI 2833:2016 ditunjukkan pada Gambar 2. Pada pembebanan gempa Jembatan Lemah Ireng II mengalami kenaikan nilai spektra permukaan tanah pada periode pendek (SDS,  $T=0,2$ ) arah memanjang (kolom majemuk) sebesar 38,47% sedangkan pada arah melintang (kolom tunggal) sebesar 45,39%. Berdasarkan grafik tersebut diketahui terjadi peningkatan beban gempa sehingga perlu diketahui tingkat kinerja jembatan berdasarkan *performance based seismic design* menggunakan metode *Non-Linear Time History Analysis*.



Gambar 2. Respon spektrum SNI 2833:2008 dan SNI 2833:2016 pada Jembatan Lemah Ireng II

Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja (*performance based seismic design*) adalah perencanaan struktur sesuai dengan level kinerja yang diinginkan ketika terjadi gempa sehingga dapat dihasilkan struktur yang efisien. Metode *performance based design* memberikan kontrol dan pengelolaan risiko yang lebih baik, dan menghilangkan asumsi yang tidak realistis (Awasthi dkk., 2020).

Aspek yang perlu diperhatikan dalam pemilihan level kinerja yaitu risiko keselamatan, kesiapan pakai, dan kerugian harta benda setelah terjadi gempa. Perencanaan berbasis kinerja bertujuan untuk mengetahui perilaku struktur jika dikenai berbagai macam intensitas gempa. Perencanaan berbasis kinerja dapat digunakan pada tahapan perencanaan, pelaksanaan, dan perawatan. Hal tersebut bertujuan untuk memprediksi tingkat kerusakan sesuai dengan rencana gempa dan dapat menentukan langkah perbaikan yang diperlukan (National Cooperative Highway Research Program, 2013). *Performance based seismic design*

menentukan tingkat kinerja jembatan berdasarkan kategori kepentingan jembatan pada *upper level ground motion* (gempa periode ulang 1000 tahun) dan *lower level ground motion* (gempa periode ulang 100 tahun) dengan parameter yang ditinjau pada pier (National Cooperative Highway Research Program, 2020). Pier merupakan elemen kritikal jembatan untuk perlindungan keselamatan jiwa pengguna, tingkat kerusakan pier jembatan telah didefinisikan dengan baik dalam berbagai peraturan (Zhang & Alam, 2019). Parameter pada pier yang ditinjau sebagai kriteria penentuan tingkat kerja antara lain berdasarkan NCHRP Synthesis 440 adalah simpangan horizontal pier, dan berdasarkan NCHRP Research Report 949 adalah regangan tekan beton dan regangan tarik tulangan baja (National Cooperative Highway Research Program, 2013, 2020).

### Metode Penelitian

Jembatan Lemah Ireng II merupakan obyek penelitian ini dimana pembangunan jembatan tersebut selesai pada tahun 2014. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja Jembatan Lemah Ireng II berbasis kinerja terhadap peraturan perencanaan yang berlaku yaitu SNI 1725:2016 dan SNI 2833:2016.

Metodologi dalam panellation ini dilakukan pada tiga tahap yaitu tahap pengumpulan data, tahap pemodelan jembatan, dan tahap analisis kondisi jembatan berbasis kinerja (*performanced based*). Batasan penelitian ini fondasi dan interaksi antara tanah dan struktur tidak dianalisis.

### Data Penelitian

Data sekunder terdiri dari properti material, *as built drawing*, data tanah dan literatur-literatur terkait evaluasi kinerja jembatan. Data teknis Jembatan Lemah Ireng II adalah sebagai berikut:

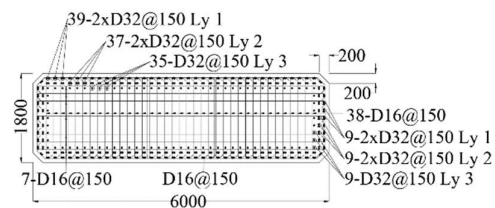
Bangunan atas : Box girder balance cantilever  
 Bangunan bawah : Bor pile  
 Panjang jembatan : 300 meter (83,75m +132,5m +83,75m)  
 Lebar jembatan : 25,2 meter

Jumlah jalur : 4 lajur 2 arah  
 Jumlah pilar : 4 buah (2 buah 11,5 m dan 2 buah 22 m)  
 Jenis peletakan : Pot bearing

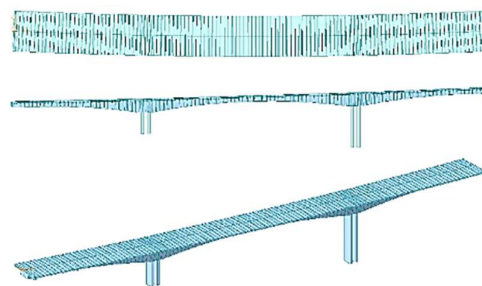
Berikut properti material, penampang pier, tampak atas, tampak samping, dan tiga dimensi Jembatan Lemah Ireng II:

Tabel 1. Propertis material jembatan

| Beton ( <i>cast in place</i> )                               |                     |
|--|---------------------|
| Box girder   | $f'_c = 40$ MPa     |
| Pier   | $f'_c = 35$ MPa     |
| Tendon prategang girder<br>(19 strand $\varnothing 15,2$ mm) |                     |
| Kuat tarik   | $f'_s = 1860$ MPa   |
| Kuat leleh   | $f_{py} = 1680$ MPa |
| Modulus elastisitas  | $E_s = 195.000$ MPa |
| Baja tulangan ( $D \geq 13$ mm)                              |                     |
| Kuat leleh   | $f_y = 420$ MPa     |
| Modulus elastisitas  | $E_s = 200.000$ MPa |



Gambar 3. Tipikal dimensi dan tulangan pier



Gambar 4. Tampak Jembatan Lemah Ireng II

### Pembebanan Jembatan

Pada *Non-linear Time History Analysis* berfokus pada kombinasi pembebanan ekstrem I berdasarkan SNI 2833:2016. Jembatan Lemah Ireng II termasuk kategori jembatan penting, dengan kombinasi pembebanan sebagai berikut:

Kombinasi 1 =  $1DL + 0,3LL + 1EQ_{x(ns)} + 1EQ_{y(ew)}$

Kombinasi 2 =  $1DL + 0,3LL + 1EQ_{x(ew)} + 1EQ_{y(ns)}$

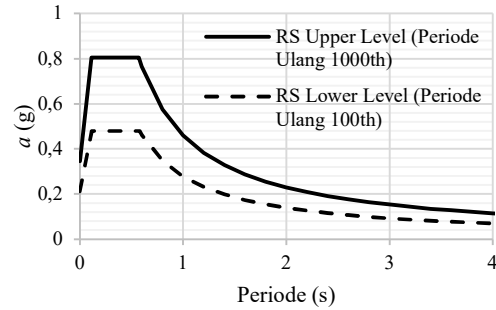
dengan kombinasi tersebut maka beban yang digunakan adalah beban mati, beban mati tambahan, pengaruh prategang, beban lajur "D" berdasarkan SNI 1725:2016 tentang Tabel 2.

Pada *performance based seismic design* beban gempa ditinjau menggunakan gempa riwayat waktu pada *upper level ground motion* (gempa periode ulang 1000 tahun) dan *lower level ground motion* (gempa periode ulang 100 tahun). Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia 2017 yang tersedia pada gempa periode ulang 1000 tahun (PusGen, 2017), maka untuk penskalaan gempa periode ulang 100 tahun dilakukan berdasarkan Eurocode 8: Part 2 *Design of Structure Earthquake Resistance* (European Committee for Standardization, 2005) menurut Pers. (1).

$$\frac{a_{g,c}}{a_{g,R}} = \left(\frac{T_{Rc}}{T_{NRC}}\right)^k \quad (1)$$

dengan  $a_{g,c}$  = parameter percepatan tanah pada periode ulang rencana,  $a_{g,R}$  = parameter percepatan tanah pada periode ulang target,  $T_{Rc}$  = periode ulang rencana,  $T_{NRC}$  = periode ulang target, dan  $k = 0,3$ . Sehingga dihasilkan target respon spektrum ditunjukkan pada Gambar 5.

Pembebanan untuk Jembatan ditunjukkan pada Grafik hasil pencocokan spektra gempa ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 5. Grafik target respon spektrum

### Deagregasi Rekaman Gerak Tanah

Berdasarkan pembacaan Peta Deagregasi Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa (PusGen, 2022) didapatkan hasil deagregasi yang ditunjukkan pada Tabel 3. Menurut hasil deagregasi dipilih tujuh rekaman gempa melalui PEER NGA WEST dan COSMOS Strong Motion Center. Tujuh rekaman gempa yang dipilih ditunjukkan pada Tabel 4. Grafik hasil pencocokan spektra gempa ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

Tabel 2. Pembebanan Jembatan Lemah Ireng II

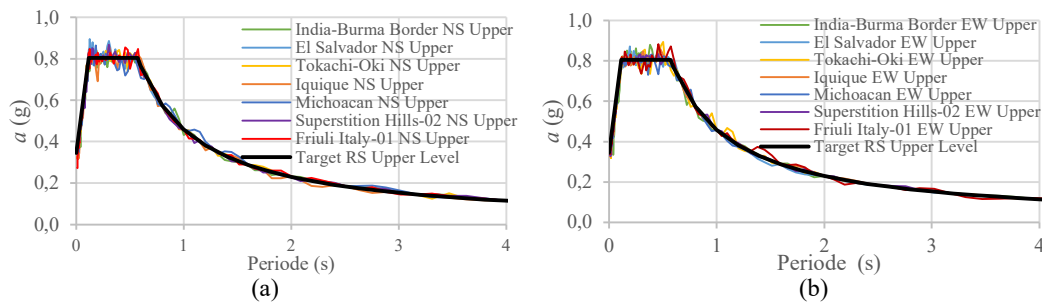
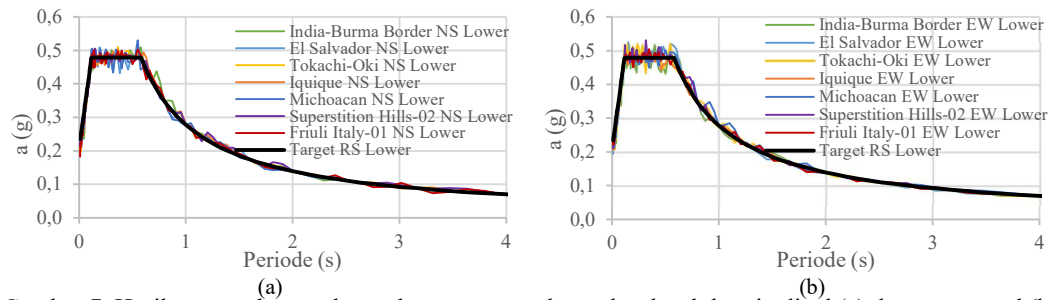
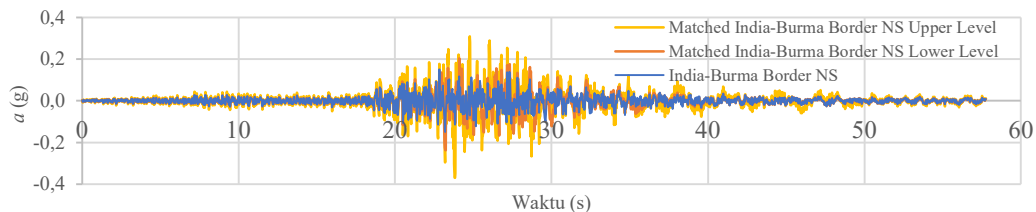
| Beban               | Besaran   |
|---------------------|---|
| Beban mati          | Beton $f_c' 35 \text{ MPa}$ , $\gamma_{c1} = 24 \text{ kN/m}^3$<br>Beton $f_c' 40 \text{ MPa}$ , $\gamma_{c2} = 24 \text{ kN/m}^3$<br>Baja $\gamma_s = 78,5 \text{ kN/m}^3$ |
| Beban mati tambahan | Aspal tebal 5 cm, $\gamma_a = 22 \text{ kN/m}^3$<br>Beton $f_c' 35 \text{ MPa}$ , $\gamma_{c1} = 24 \text{ kN/m}^3$   |
| Pengaruh prategang  | Tegangan tarik izin maksimum = $0,7 \times f_{pu} = 1302 \text{ MPa}$   |
| Beban lajur         | Beban terbagi rata (BTR) = $4,95 \text{ kN/m}^2$<br>Beban garis terpusat (BGT) = $63,7 \text{ kN/m}$  |

Tabel 3. Hasil deagregasi di lokasi Jembatan Lemah Ireng II

| Parameter Pemilihan Gerak Tanah   | Nilai           |         |
|-----------------------------------|-----------------|---------|
| Magnitud Gempa ( $M_w$ )          | Benioff         | 7,2-7,6 |
|                                   | Megathrust      | 8,6-8,8 |
|                                   | Shallow crustal | 6-6,6   |
| Jarak lokasi ke sumber gempa (km) | Benioff         | 120-200 |
|                                   | Megathrust      | 150-200 |
|                                   | Shallow crustal | 20-40   |

Tabel 4. Data rekaman gempa berdasarkan hasil deagregasi

| Sumber Gempa    | Nama Kejadian         | Tanggal    | M    | R (km) | Time (s) |
|-----------------|-----------------------|------------|------|--------|----------|
| Benioff         | India-Burma Border    | 6/8/1988   | 7,3  | 189,9  | 57,76    |
| Benioff         | El Salvador           | 13/1/2001  | 7,6  | 151,8  | 49,325   |
| Megathrust      | Tokachi-Oki           | 25/9/2003  | 8,2  | 156,5  | 247      |
| Megathrust      | Iquique               | 1/4/2014   | 8,2  | 171    | 282      |
| Megathrust      | Michoacan             | 19/9/1985  | 8    | 186,2  | 89,4     |
| Shallow crustal | Superstition Hills-02 | 24/11/1987 | 6,54 | 23,85  | 60       |
| Shallow crustal | Friuli Italy-01       | 6/5/1976   | 6,5  | 33,32  | 40       |

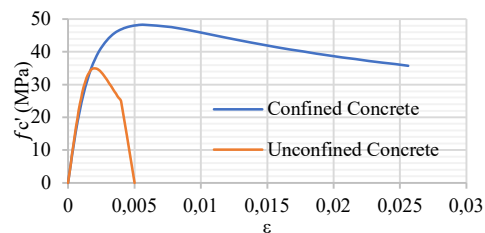
Gambar 6. Hasil pencocokan spektra rekaman gempa *upper level* arah longitudinal (a) dan transversal (b)Gambar 7. Hasil pencocokan spektra rekaman gempa *lower level* arah longitudinal (a) dan transversal (b)

Gambar 8. Hasil pencocokan rekam gempa India-Burma Border arah utara-selatan (memanjang jembatan)

### Pemodelan non linier pier

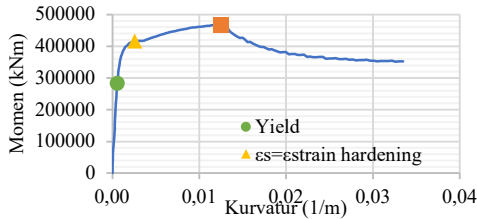
Pada evaluasi kinerja jembatan menggunakan metode *Nonlinear Time History Analysis* dilakukan pemodelan sendi plastis pada elemen pilar. Pemodelan sendi plastis berdasarkan hubungan momen dan kurvatur penampang dengan memperhatikan properti non linier material. Properti non linier material beton memperhitungkan kondisi beton *confined* dan *unconfined* menggunakan Metode Mander (Mander dkk., 1988)

ditunjukkan pada Gambar 9. Sedangkan pada tulangan baja berdasarkan Metode Menegotto-Pinto (Menegotto & Pinto, 1973).

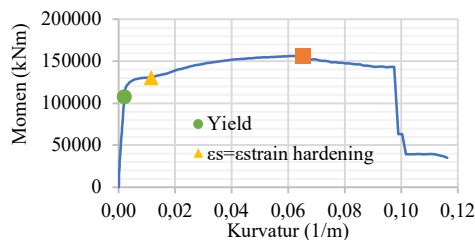


Gambar 9. Properti non linier material beton

Berikut momen kurvatur penampang pier arah longitudinal dan transversal jembatan berdasarkan properti non linear material:



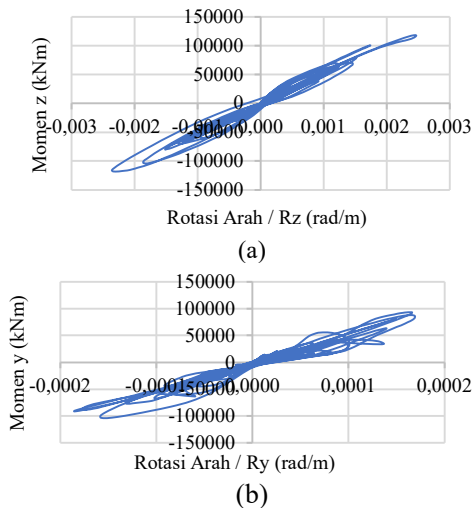
Gambar 10. Momen kurvatur penampang pier arah longitudinal jembatan



Gambar 11. Momen kurvatur penampang pier arah transversal jembatan

**Analisis data**

Pemodelan sendi plastis pada setiap pier menghasilkan kurva histerisis hubungan momen dan rotasi baik arah longitudinal dan transversal jembatan, berikut kurva histerisis pier 1.a akibat rekam gempa India-Burma Border 1 periode ulang 1000 tahun.



Gambar 12. Kurva histerisis Pier 1.a pada rekam gempa India-Burma Border 1 periode ulang 1000 tahun arah longitudinal (a) dan arah transversal jembatan (b)

Jembatan Lemah Ireng II termasuk kategori jembatan penting sehingga disyaratkan memenuhi tingkat kinerja *Fully Operational* pada *lower level ground motion* (periode ulang gempa 100 tahun) dan tingkat kinerja *Operational* pada *upper level ground motion* (periode ulang gempa 1000 tahun) (National Cooperative Highway Research Program, 2020).

Kriteria parameter tingkat kinerja jembatan ditentukan berdasarkan NCHRP Synthesis 440 *Performance-Based Seismic Bridge Design* untuk parameter simpangan horizontal pier dan NCHRP Research Report 949 *Proposed AASHTO Guidelines for Performance-Based Seismic Bridge Design* untuk parameter regangan tekan beton dan regangan tarik tulangan baja (National Cooperative Highway Research Program, 2013, 2020).

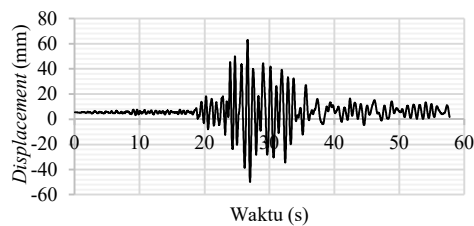
**Hasil dan Pembahasan**

**Kinerja Jembatan Berdasarkan Simpangan Horizontal (Drift) Pier**

Kriteria tingkat kinerja Jembatan Lemah Ireng II berdasarkan *drift* pier pada NCHRP Synthesis 440 ditunjukkan pada dengan perhitungan persentase *drift* ditunjukkan pada Pers. (2).

$$Drift = \frac{Displacement}{Tinggi\ Pier} \times 100\% \quad (2)$$

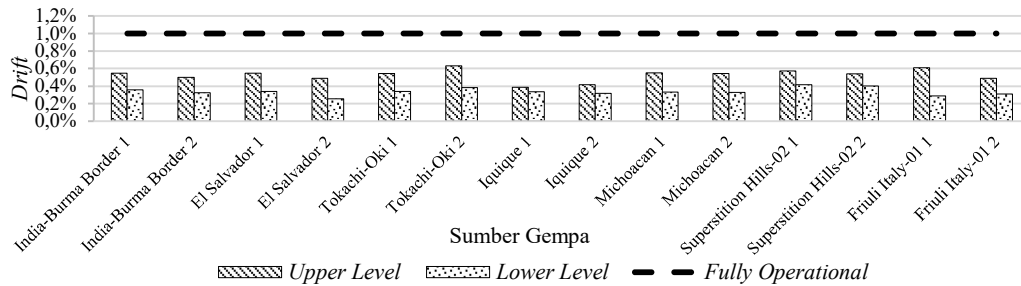
Hasil analisis berupa grafik *displacement* maksimum yang terjadi pada bagian atas pier arah longitudinal dan transversal dengan contoh ditunjukkan pada Gambar 13. Perbandingan grafik *drift* Pier 1.a arah longitudinal dikenai 7 pasang rekaman gempa ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 13. Grafik *displacement* Pier 1.a arah longitudinal pada rekam gempa India-Burma Border 1 periode ulang 1000 tahun

Tabel 5. Batasan kriteria kinerja jembatan berdasarkan *drift* pier pada NCHRP Synthesis 440

| Level | Tingkat Kinerja          | % Drift | Batasan Kriteria Kinerja Jembatan |                          |
|-------|--------------------------|---------|-----------------------------------|--------------------------|
|       |                          |         | Pier 1a dan 1b<br>L=11,5 m        | Pier 2a dan 2b<br>L=22 m |
| I     | <i>Fully operational</i> | <1,0    | < 115 mm                          | < 220 mm                 |
| II    | <i>Operational</i>       | 1       | 115 mm                            | 220 mm                   |
| III   | <i>Life safety</i>       | 3       | 345 mm                            | 660 mm                   |
| IV    | <i>Near collapse</i>     | 5       | 575 mm                            | 1100 mm                  |
| V     | <i>Collapse</i>          | 8,7     | 1001 mm                           | 1914 mm                  |

Gambar 14. Perbandingan *drift* Pier 1.a arah longitudinal terhadap parameter tingkat kinerja berdasarkan NCHRP Synthesis 440Tabel 6. Analisis tingkat kinerja berdasarkan *drift* pada Pier 1.a arah longitudinal jembatan

| Sumber Gempa          | Kombinasi Gempa | Drift Pier 1.a Arah Longitudinal |           |                          |                           |           |                          |
|-----------------------|-----------------|----------------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|
|                       |                 | Upper Level Ground Motion        |           |                          | Lower Level Ground Motion |           |                          |
|                       |                 | D <sub>x</sub> (mm)              | Drift (%) | Performa Struktur        | D <sub>x</sub> (mm)       | Drift (%) | Performa Struktur        |
| India-Burma Border    | 1               | 62,95                            | 0,547%    | <i>Fully Operational</i> | 41,27                     | 0,359%    | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 57,44                            | 0,499%    | <i>Fully Operational</i> | 37,21                     | 0,324%    | <i>Fully Operational</i> |
| El Salvador           | 1               | 62,78                            | 0,546%    | <i>Fully Operational</i> | 39,30                     | 0,342%    | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 56,31                            | 0,490%    | <i>Fully Operational</i> | 29,31                     | 0,255%    | <i>Fully Operational</i> |
| Tokachi-Ok1           | 1               | 62,65                            | 0,545%    | <i>Fully Operational</i> | 39,24                     | 0,341%    | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 72,68                            | 0,632%    | <i>Fully Operational</i> | 44,07                     | 0,383%    | <i>Fully Operational</i> |
| Iquique               | 1               | 44,22                            | 0,385%    | <i>Fully Operational</i> | 38,71                     | 0,337%    | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 47,98                            | 0,417%    | <i>Fully Operational</i> | 36,27                     | 0,315%    | <i>Fully Operational</i> |
| Michoacan             | 1               | 63,15                            | 0,549%    | <i>Fully Operational</i> | 38,49                     | 0,335%    | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 64,80                            | 0,563%    | <i>Fully Operational</i> | 37,72                     | 0,328%    | <i>Fully Operational</i> |
| Superstition Hills-02 | 1               | 65,88                            | 0,573%    | <i>Fully Operational</i> | 47,90                     | 0,417%    | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 61,93                            | 0,539%    | <i>Fully Operational</i> | 46,44                     | 0,404%    | <i>Fully Operational</i> |
| Friuli Italy-01       | 1               | 70,09                            | 0,609%    | <i>Fully Operational</i> | 33,20                     | 0,289%    | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 56,04                            | 0,487%    | <i>Fully Operational</i> | 35,48                     | 0,309%    | <i>Fully Operational</i> |
| Minimal               |                 | 44,22                            | 0,385%    | <i>Fully Operational</i> | 29,31                     | 0,255%    | <i>Fully Operational</i> |
| Maksimal              |                 | 72,68                            | 0,632%    | <i>Fully Operational</i> | 47,90                     | 0,417%    | <i>Fully Operational</i> |
| Rata-rata             |                 | 60,47                            | 0,526%    | <i>Fully Operational</i> | 38,90                     | 0,338%    | <i>Fully Operational</i> |

Tabel 7. Rekapitulasi tingkat kinerja berdasarkan *drift* pier pada *upper level ground motion*

| Pier     | Drift Pier Upper Level Ground Motion |           |                          |                     |           |                          |
|----------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|---------------------|-----------|--------------------------|
|          | Arah Longitudinal                    |           |                          | Arah Transversal    |           |                          |
|          | D <sub>x</sub> (mm)                  | Drift (%) | Performa Struktur        | D <sub>z</sub> (mm) | Drift (%) | Performa Struktur        |
| Pier 1.a | 60,57                                | 0,527%    | <i>Fully Operational</i> | 22,30               | 0,194%    | <i>Fully Operational</i> |
| Pier 1.b | 59,86                                | 0,520%    | <i>Fully Operational</i> | 26,15               | 0,227%    | <i>Fully Operational</i> |
| Pier 2.a | 64,03                                | 0,291%    | <i>Fully Operational</i> | 69,41               | 0,315%    | <i>Fully Operational</i> |
| Pier 2.b | 65,32                                | 0,297%    | <i>Fully Operational</i> | 64,78               | 0,294%    | <i>Fully Operational</i> |

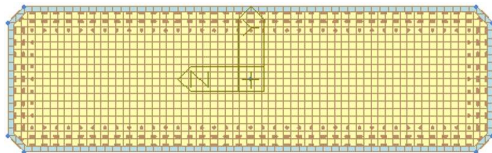
Tabel 8. Rekapitulasi tingkat kinerja berdasarkan *drift* pier pada *lower level ground motion*

| Pier     | Drift Pier Lower Level Ground Motion |           |                          |                     |           |                          |
|----------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|---------------------|-----------|--------------------------|
|          | Arah Longitudinal                    |           |                          | Arah Transversal    |           |                          |
|          | D <sub>x</sub> (mm)                  | Drift (%) | Performa Struktur        | D <sub>z</sub> (mm) | Drift (%) | Performa Struktur        |
| Pier 1.a | 38,37                                | 0,334%    | <i>Fully Operational</i> | 13,10               | 0,114%    | <i>Fully Operational</i> |
| Pier 1.b | 37,14                                | 0,323%    | <i>Fully Operational</i> | 15,61               | 0,136%    | <i>Fully Operational</i> |
| Pier 2.a | 43,97                                | 0,200%    | <i>Fully Operational</i> | 40,83               | 0,186%    | <i>Fully Operational</i> |
| Pier 2.b | 45,22                                | 0,206%    | <i>Fully Operational</i> | 38,11               | 0,173%    | <i>Fully Operational</i> |

Pada SNI 2833:2016, dengan penggunaan 7 rekaman gempa maka penentuan tingkat kinerja jembatan ditentukan berdasarkan nilai rata-rata parameter. Pada Tabel 6 menunjukkan bahwa berdasarkan *drift* Pier 1.a arah longitudinal jembatan, tingkat kinerja jembatan memenuhi kriteria *Fully Operational*. Hasil tingkat kinerja ke empat pier pada *upper* dan *lower level ground motion* ditunjukkan Tabel 7 dan Tabel 8, diketahui bahwa tingkat kinerja jembatan adalah *Fully Operational* baik pada *upper* dan *lower level ground motion*, sehingga memenuhi persyaratan tingkat kinerja jembatan kategori penting.

**Kinerja Jembatan Berdasarkan Regangan Tekan Beton**

Pemodelan penampang pier menggunakan *fiber hinge* dengan melakukan *meshing* sebesar 10 cm x 10 cm ditunjukkan pada Gambar 15, untuk mengetahui regangan dan tegangan maksimum pada beton dan baja tulangan.



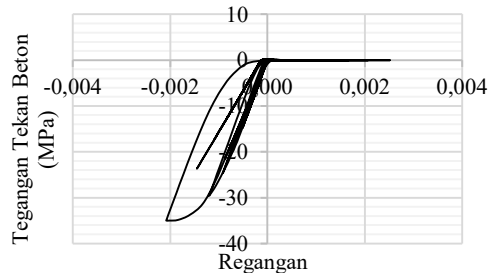
Gambar 15. Pemodelan sendi plastis dengan *fiber hinge*

Batasan kriteria tingkat kinerja berdasarkan regangan tekan beton menurut NCHRP Research Report 949 ditunjukkan pada

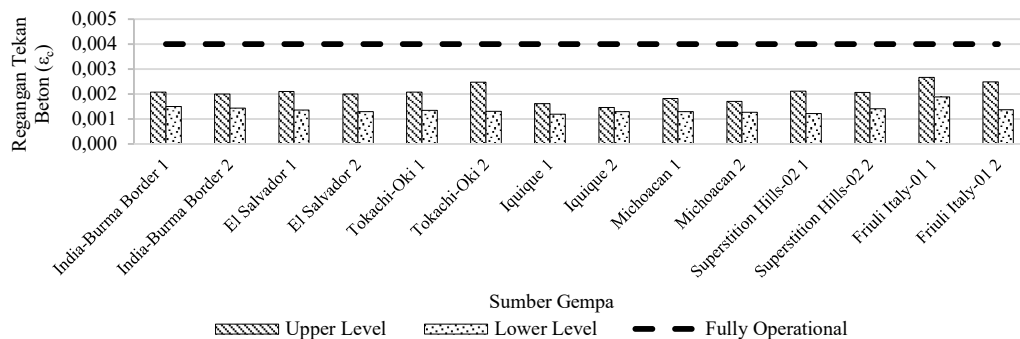
. Hasil analisis berupa grafik tegangan dan regangan tekan maksimum pada beton. Lokasi regangan maksimum ditinjau pada sudut-sudut penampang bawah pier, dengan contoh ditunjukkan pada Gambar 16. Hasil analisis tingkat kinerja Pier 1.a yang dikenai 7 pasang rekaman gempa baik pada *upper level* atau *lower ground motion* ditunjukkan pada Gambar 17 dan Tabel 10.

Tabel 9. Batasan kriteria kinerja berdasarkan regangan tekan beton pada NCHRP Research Report 949

| Tingkat Kinerja        | Parameter   | Nilai        |
|------------------------|---|--------------|
| PL1: Life Safety       | $\epsilon_c = 1,4 \left( 0,004 + 1,4 \frac{\rho_v f_{yh} \epsilon_{su}}{f'_{cc}} \right)$ | $\leq 0,030$ |
| PL2: Operational       | $\epsilon_c = \left( 0,004 + 1,4 \frac{\rho_v f_{yh} \epsilon_{su}}{f'_{cc}} \right)$     | $\leq 0,021$ |
| PL3: Fully Operational | $\leq 0,004$  | $\leq 0,004$ |



Gambar 16. Grafik tegangan regangan beton Pier 1.a pada rekam gempa India Burma Border 1 periode ulang 1000 tahun



Gambar 17. Perbandingan regangan tekan beton Pier 1.a terhadap parameter tingkat kinerja berdasarkan NCHRP Research Report 949



Tabel 10. Analisis tingkat kinerja berdasarkan regangan tekan beton Pier 1.a

| Sumber Gempa          | Kombinasi Gempa | Regangan Tekan Beton Pier 1.a |                   |                           |                   |
|-----------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
|                       |                 | Upper Level Ground Motion     |                   | Lower Level Ground Motion |                   |
|                       |                 | Regangan                      | Performa Struktur | Regangan                  | Performa Struktur |
| India-Burma Border    | 1               | 0,00208                       | Fully Operational | 0,00150                   | Fully Operational |
|                       | 2               | 0,00200                       | Fully Operational | 0,00143                   | Fully Operational |
| El Salvador           | 1               | 0,00210                       | Fully Operational | 0,00136                   | Fully Operational |
|                       | 2               | 0,00200                       | Fully Operational | 0,00130                   | Fully Operational |
| Tokachi-Oki           | 1               | 0,00208                       | Fully Operational | 0,00135                   | Fully Operational |
|                       | 2               | 0,00248                       | Fully Operational | 0,00132                   | Fully Operational |
| Iquique               | 1               | 0,00162                       | Fully Operational | 0,00119                   | Fully Operational |
|                       | 2               | 0,00147                       | Fully Operational | 0,00130                   | Fully Operational |
| Michoacan             | 1               | 0,00182                       | Fully Operational | 0,00130                   | Fully Operational |
|                       | 2               | 0,00171                       | Fully Operational | 0,00128                   | Fully Operational |
| Superstition Hills-02 | 1               | 0,00211                       | Fully Operational | 0,00122                   | Fully Operational |
|                       | 2               | 0,00206                       | Fully Operational | 0,00141                   | Fully Operational |
| Friuli Italy-01       | 1               | 0,00267                       | Fully Operational | 0,00189                   | Fully Operational |
|                       | 2               | 0,00249                       | Fully Operational | 0,00138                   | Fully Operational |
|                       | Minimal         | 0,00147                       | Fully Operational | 0,00119                   | Fully Operational |
|                       | Maksimal        | 0,00267                       | Fully Operational | 0,00189                   | Fully Operational |
|                       | Rata-rata       | 0,00205                       | Fully Operational | 0,00137                   | Fully Operational |

Tabel 11. Rekapitulasi analisis tingkat kinerja jembatan berdasarkan regangan tekan beton pier

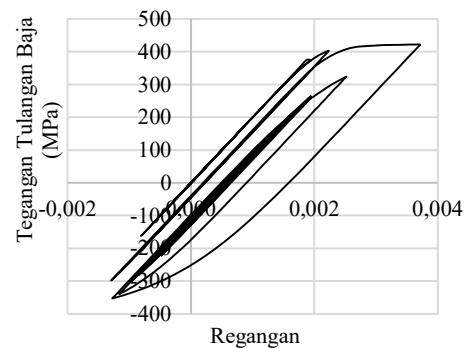
| Pier     | Rata-rata Regangan Tekan Beton |                   |                           |                   |
|----------|--------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
|          | Upper Level Ground Motion      |                   | Lower Level Ground Motion |                   |
|          | Regangan                       | Performa Struktur | Regangan                  | Performa Struktur |
| Pier 1.a | 0,00205                        | Fully Operational | 0,00137                   | Fully Operational |
| Pier 1.b | 0,00273                        | Fully Operational | 0,00173                   | Fully Operational |
| Pier 2.a | 0,00139                        | Fully Operational | 0,00098                   | Fully Operational |
| Pier 2.b | 0,00112                        | Fully Operational | 0,00077                   | Fully Operational |

Analisis tingkat kinerja jembatan berdasarkan regangan tekan beton dilakukan pada ke empat pier dengan metode analisis yang sama. Rekapitulasi hasil analisis pada seluruh pier Jembatan Lemah Ireng II ditunjukkan pada Tabel 11. Berdasarkan tabel tersebut diketahui bahwa Jembatan Lemah Ireng II memenuhi tingkat kinerja *Fully Operational* baik pada analisis kombinasi gempa 1000 tahun dan 100 tahun.

#### **Kinerja Jembatan Berdasarkan Regangan Tarik Tulangan Baja**

Analisis tingkat kinerja jembatan berdasarkan regangan tulangan baja diambil nilai maksimum pada setiap pier jembatan. Nilai maksimum regangan tulangan baja tersebut berada pada tulangan yang berlokasi di sudut-sudut atau tepi di penampang bawah pier. Batasan kriteria tingkat kinerja Jembatan Lemah Ireng II berdasarkan NCHRP Research Report 949

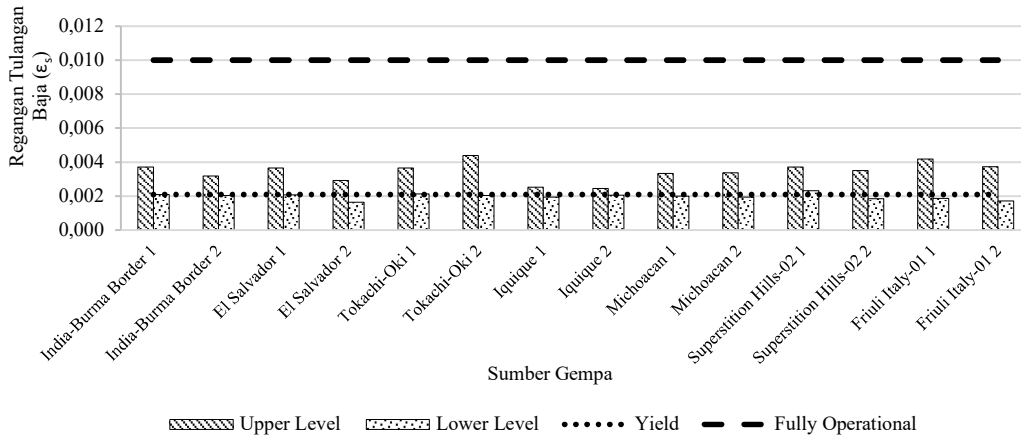
ditunjukkan pada contoh hasil dari analisis tersebut berupa kurva tegangan dan regangan tulangan baja pada Pier 1.a yang ditunjukkan pada Gambar 18, serta analisis berdasarkan kriteria tingkat kinerja NCHRP Research Report 949 ditunjukkan pada Gambar 19 dan Tabel 13.



Gambar 18. Grafik tegangan regangan tulangan baja Pier 1.a pada *time history* India Burma Border 1 periode ulang 1000 tahun

Tabel 12. Batasan kriteria kinerja berdasarkan regangan tarik tulangan baja pada NCHRP Research Report 949

| Tingkat Kinerja               | Parameter   | Nilai Batasan Parameter |              |              |              |
|-------------------------------|---|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                               |   | Pier 1.a                | Pier 1.b     | Pier 2.a     | Pier 2.b     |
| PL1: <i>Life Safety</i>       | $\epsilon_s^{bar\ buckling} = 0.032 + 790\rho_s \frac{f_{yhe}}{E_s} - 0.14 \frac{P}{f_{ce}A_g}$ | $\leq 0,063$            | $\leq 0,053$ | $\leq 0,055$ | $\leq 0,063$ |
| PL2: <i>Operational</i>       | $\epsilon_s = 0.8 \epsilon_s^{bar\ buckling}$   | $\leq 0,050$            | $\leq 0,042$ | $\leq 0,044$ | $\leq 0,050$ |
| PL3: <i>Fully Operational</i> | $\leq 0,010$  | $\leq 0,010$            | $\leq 0,010$ | $\leq 0,010$ | $\leq 0,010$ |



Gambar 19. Perbandingan regangan tarik tulangan baja Pier 1.a terhadap parameter tingkat kinerja berdasarkan NCHRP Research Report 949

Tabel 13. Analisis tingkat kinerja berdasarkan regangan tarik tulangan baja pada Pier 1.a

| Sumber Gempa          | Kombinasi Gempa | Regangan Tarik Tulangan Baja Pier 1.a |                          |                                  |                          |
|-----------------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|
|                       |                 | <i>Upper Level Ground Motion</i>      |                          | <i>Lower Level Ground Motion</i> |                          |
|                       |                 | Regangan                              | Performa Struktur        | Regangan                         | Performa Struktur        |
| India-Burma Border    | 1               | 0,00371                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00209                          | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 0,00318                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00204                          | <i>Fully Operational</i> |
| El Salvador           | 1               | 0,00365                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00208                          | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 0,00293                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00163                          | <i>Fully Operational</i> |
| Tokachi-Oki           | 1               | 0,00365                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00212                          | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 0,00439                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00204                          | <i>Fully Operational</i> |
| Iquique               | 1               | 0,00252                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00195                          | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 0,00245                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00205                          | <i>Fully Operational</i> |
| Michoacan             | 1               | 0,00334                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00200                          | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 0,00337                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00194                          | <i>Fully Operational</i> |
| Superstition Hills-02 | 1               | 0,00372                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00232                          | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 0,00352                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00185                          | <i>Fully Operational</i> |
| Friuli Italy-01       | 1               | 0,00418                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00186                          | <i>Fully Operational</i> |
|                       | 2               | 0,00374                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00172                          | <i>Fully Operational</i> |
|                       | Minimal         | 0,00245                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00163                          | <i>Fully Operational</i> |
|                       | Maksimal        | 0,00439                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00232                          | <i>Fully Operational</i> |
|                       | Rata-rata       | 0,00345                               | <i>Fully Operational</i> | 0,00198                          | <i>Fully Operational</i> |

Tabel 14. Rekapitulasi nilai rata-rata regangan tulangan tarik baja

| Pier     | Rata-rata Regangan Tarik Tulangan Baja |                          |                                  |                          |
|----------|--|--------------------------|----------------------------------|--------------------------|
|          | <i>Upper Level Ground Motion</i>       |                          | <i>Lower Level Ground Motion</i> |                          |
|          | Regangan                               | Performa Struktur        | Regangan                         | Performa Struktur        |
| Pier 1.a | 0,00345                                | <i>Fully Operational</i> | 0,00198                          | <i>Fully Operational</i> |
| Pier 1.b | 0,00331                                | <i>Fully Operational</i> | 0,00185                          | <i>Fully Operational</i> |
| Pier 2.a | 0,00147                                | <i>Fully Operational</i> | 0,00083                          | <i>Fully Operational</i> |
| Pier 2.b | 0,00136                                | <i>Fully Operational</i> | 0,00088                          | <i>Fully Operational</i> |

Tabel 15. Rekapitulasi performa struktur Jembatan Lemah Ireng II

| Parameter Performa<br>Pier      | Level<br>Gempa | Tingkat Kinerja Jembatan |                   |                   |                   |
|---------------------------------|----------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                 |                | Pier 1.a                 | Pier 1.b          | Pier 2.a          | Pier 2.b          |
| Drift Arah<br>Memanjang         | Upper<br>Lower | Fully Operational        | Fully Operational | Fully Operational | Fully Operational |
| Drift Arah Melintang            | Upper<br>Lower | Fully Operational        | Fully Operational | Fully Operational | Fully Operational |
| Regangan Tekan<br>Beton         | Upper<br>Lower | Fully Operational        | Fully Operational | Fully Operational | Fully Operational |
| Regangan Tarik<br>Tulangan Baja | Upper<br>Lower | Fully Operational        | Fully Operational | Fully Operational | Fully Operational |

Analisis tingkat kinerja berdasarkan regangan tulangan tarik baja pada Pier 1.a, Pier 1.b, Pier 2.a, dan Pier 2.b dilakukan dengan metode yang sama, dengan rekapitulasi hasil analisis berdasarkan rata-rata regangan tarik tulangan baja ditunjukkan pada Tabel 14. Berdasarkan tabel tersebut diketahui bahwa tingkat kinerja seluruh pier jembatan memenuhi kriteria *Fully Operational* dengan regangan tarik tulangan baja pada Pier 1.a dan Pier 1.b yang dikenai *upper level ground motion* melewati regangan leleh ( $> 0,002$ ). Tulangan tarik baja yang telah leleh menunjukkan bahwa perilaku tulangan inelastis, sehingga pemodelan non-linier material dan penampang dapat mempresentasikan kondisi tersebut.

Hasil rekapitulasi analisis tingkat kinerja Jembatan Lemah Ireng II ditunjukkan pada Tabel 15. Menurut tabel tersebut diketahui bahwa tingkat kinerja Jembatan Lemah Ireng II pada tingkat *Fully Operational* berdasarkan parameter drift arah memanjang jembatan, drift arah melintang jembatan, regangan tekan beton, dan regangan tarik baja baik pada tingkat gempa *upper level ground motion* dan *lower level ground motion*. Jembatan Lemah Ireng II adalah jembatan penting, berdasarkan NCHRP Research Report 949 persyaratan tingkat kinerja jembatan *Fully Operational* pada *lower level ground motion* dan *Operational* pada *upper level ground motion* sehingga Jembatan Lemah Ireng II memenuhi persyaratan tersebut.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis tingkat kinerja jembatan dengan tinjauan pilar adalah *Fully Operational* baik pada *upper* maupun *lower level ground motion*, sehingga memenuhi persyaratan tersebut. Dengan tingkat kinerja *Fully Operational* maka kondisi jembatan setelah terjadi gempa tidak mengalami kerusakan atau kerusakan terjadi sangat kecil yang tidak membutuhkan penanganan segera sehingga jembatan dapat beroperasi segera setelah gempa.

## Daftar pustaka

- AASHTO. (2002). *Standard specifications for highway bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Awasthi, J., Ghosh, G., & Mehta, P. K. (2020). Seismic Design of A Curved Bridge as per Performance Based Criteria. *Materials Today: Proceedings*, 38, 3014–3018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.324>
- Badan Standardisasi Nasional. (2005). *RSNI T-02-2005 Standar Pembebanan Untuk Jembatan*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 2833:2008 Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016a). *SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan*. Badan Standardisasi Nasional. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)

- Badan Standardisasi Nasional. (2016b). *SNI 2833:2016 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa*. Badan Standardisasi Nasional. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)
- European Committee for Standardization. (2005). *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 2: Bridges*. European Committee for Standardization.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804–1826.
- Menegotto, M., & Pinto, P. E. (1973). Method of analysis for cyclically loaded R.C. plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending. *IABSE Reports of the Working Commissions*, 13. <https://doi.org/10.5169/seals-13741>
- National Cooperative Highway Research Program. (2013). *NCHRP Synthesis 440 Performance-Based Seismic Bridge Design*. Transportation Research Board.
- National Cooperative Highway Research Program. (2020). *NCHRP Research Report 949 Proposed AASHTO Guidelines for Performance-Based Seismic Bridge Design*. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/25913>
- PusGen. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.
- PusGen. (2022). *Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa*. Direktorat Bina Teknik Perumahan dan Permukiman.
- Riyansyah, M., Budi Wijayanto, P., Riyanto Trilaksono, B., Adi Putra, S., & Shona Laila, D. (2020). *Real Time Bridge Dynamic Response: Bridge Condition Assessment and Early Warning System*. 10(1).
- Sigdel, L. D., Al-Qarawi, A., Leo, C. J., Liyanapathirana, S., & Hu, P. (2021). Geotechnical Design Practices and Soil–Structure Interaction Effects of an Integral Bridge System: A Review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 15). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app11157131>
- Sinatra, F., Riyansyah, M., & Suarjana, M. (2020). Performance Evaluation of Existing Special Bridges in Indonesia Based on SNI 1725:2016 and SNI 2833:2016 (Case Study of Dr. Ir. Soekarno Bridge). *Jurnal Teknik Sipil*, 27(1), 51–60.
- Suarjana, M., Octora, D. D., & Riyansyah, M. (2020). Seismic Performance of RC Hollow Rectangular Bridge Piers Retrofitted by Concrete Jacketing Considering the Initial Load and Interface Slip. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 52(3), 343–368. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.3.3>
- Zhang, Q., & Alam, M. S. (2019). Performance-Based Seismic Design of Bridges: A Global Perspective and Critical Review of Past, Present and Future Directions. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(4), 539–554. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1558269>