

# EVALUASI KINERJA JEMBATAN INTERCHANGE BETON DENGAN ANALISIS RIWAYAT WAKTU TIDAK LINEAR (PERFORMANCE-BASED EVALUATION OF CONCRETE INTERCHANGE BRIDGES USING NON-LINEAR TIME HISTORY ANALYSIS)

Akhmad Dendi Nosya<sup>1\*)</sup>, Adi Sutrisno<sup>2)</sup>, Mifta Farid<sup>3)</sup>, Nuriana Ilyas Pratama<sup>2)</sup>, Efri Dwiyanto<sup>4)</sup>, Nasril Azmi<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Balai Pelaksanaan Jalan Nasional Bengkulu, Bengkulu, Indonesia

<sup>2)</sup>PT Utama Karya (Persero), Jakarta, Indonesia

<sup>3)</sup>Balai Jembatan Khusus dan Terowongan, Bandung, Indonesia

<sup>4)</sup>Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

<sup>\*)</sup>akhmad.nosya@pu.go.id

Diterima: 05 Juli 2024; direvisi: 24 November 2024; disetujui: 01 Desember 2024;

## ABSTRAK

Salah satu elemen material dalam struktur jembatan adalah beton prategang. Evaluasi kinerja jembatan diperlukan untuk menentukan metode perbaikan jika terdapat potensi kegagalan konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau desain jembatan beton prategang menggunakan perangkat lunak midas Civil. Struktur jembatan dimodelkan beserta beban yang bekerja, yang meliputi Dead Load (DL), Super Imposed Dead Load (SIDL), dan beban gempa sesuai dengan SNI 1725:2016 dan SNI 2833:2016. Penelitian ini menggunakan metode analisis riwayat waktu tidak linear (non-linear time history analysis) sesuai dengan acuan NCHRP 44 dan 949. Perangkat lunak midas Civil digunakan untuk analisis. Parameter desain diambilkan dari kedua acuan, yang mencakup regangan material beton, tulangan baja, dan drift pada elemen penahan lateral (pilar jembatan) yang disusun dari material beton bertulang. Jembatan Interchange (IC) Terbanggi Besar STA. 139+925 di Jalan Tol Bakauheni – Terbanggi Besar di Provinsi Lampung digunakan sebagai fokus studi. Dengan metode analisis yang ditetapkan, penelitian ini mengidentifikasi batas kerusakan struktur jembatan pada saat pascagempa untuk menentukan kinerja struktur. Tujuh pasang ground motion dipasang, yang mewakili kondisi pada lokasi jembatan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tingkat kinerja struktur Jembatan IC Terbanggi Besar berada pada tingkat kinerja fully operational. Tingkat tersebut menggambarkan kondisi setelah menerima beban gempa. Kondisi jembatan masih dapat beroperasi secara optimal dan struktur jembatan masih dalam keadaan elastis. Penelitian ini mengusulkan penggunaan metode sejenis pada jembatan lain untuk mengevaluasi kinerja jembatan dan mengantisipasi kegagalan bangunan.

**Kata Kunci:** perencanaan berbasis kinerja, evaluasi kinerja jembatan, Analisis Riwayat Waktu Tidak Linier, gelagar PCI, pilar beton bertulang.

## ABSTRACT

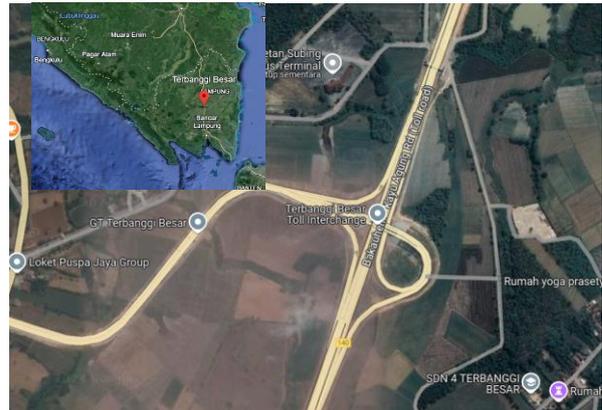
One of the elements in the bridge structure is prestressed concrete. Bridge performance evaluation is needed to determine the repair method for the element if there is a potential for construction failure. This study aims to design a prestressed concrete bridge using midas Civil software. The bridge structure is modelled along with the working loads, which include Dead Load (DL), Super Impose Dead Load (SIDL), and earthquake loads based on SNI 1725:2016 and SNI 2833:2016. This study uses a non-linear time history analysis method (non-linear time history analysis), and design parameters are taken from the NCHRP 44 and 949 references. Midas Civi software is used for the analysis. Design parameters include concrete material strain, steel reinforcement, and drift on lateral retaining elements (bridge pillars) composed of reinforced concrete material. The Terbanggi Besar Interchange Bridge (IC) STA. 139+925 on the Bakauheni – Terbanggi Besar Toll Road in Lampung Province is used as the focus of the study. This study identifies the limits of bridge structural damage during the post-earthquake to determine the performance of the bridge structure. Seven pairs of ground motions were installed, representing the conditions at the bridge site. The results of this study indicate that the performance level of the Terbanggi Besar IC Bridge Structure is at the whole operational performance level. This level describes the condition after receiving the earthquake load. The bridge condition can operate optimally, and the structure is still elastic. This study suggests using similar methods on other bridges to hinder bridge performance and anticipate building failure.

**Keywords:** performance-based design, bridge performance evaluation, Nonlinear Time History Analysis, PCI girder, reinforced concrete column.

## PENDAHULUAN

Jembatan merupakan salah satu infrastruktur penting yang menghubungkan dua titik yang terpisah, yang semula terhalang karena rintangan geografis, antara lain tebing, sungai, dan selat. Jembatan juga merupakan struktur yang rentan terhadap bencana gempa bumi sehingga memerlukan evaluasi kinerja jembatan untuk memastikan bahwa jembatan dapat bertahan bencana. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja jembatan adalah metode *Nonlinear Time History Analysis*. Metode ini merupakan analisis untuk menentukan riwayat waktu respons dinamik struktur bangunan yang berperilaku linear atau nonlinear terhadap gerakan tanah akibat beban gempa (Marsh and Stuart 2013). Metode analisis ini akan menghasilkan nilai gaya geser dan perpindahan yang bervariasi selama terjadi rekaman gempa rencana (Marsh and Stuart 2013). Dengan demikian, dapat ditentukan nilai drift untuk selanjutnya dapat digunakan dalam menentukan level atau tingkat kinerja struktur jembatan.

Dalam penelitian ini dilakukan evaluasi kinerja jembatan dengan studi kasus Jembatan IC Terbanggi Besar yang berada di jalan tol Bakauheni – Terbanggi Besar, Provinsi Lampung. Jembatan LRFD tersebut merupakan jembatan tipe PCI girder, yang direncanakan berdasarkan (BSN 2005) RSNI T-02-2005 tentang Standar Pembebanan untuk Jembatan, dan SNI 2883:2008 tentang Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan. Evaluasi kinerja ini bertujuan untuk mengetahui respons dan kondisi struktur terhadap perkembangan peraturan gempa dan pembebanan jembatan yang berlaku saat ini, yaitu berdasarkan SNI 1725 (BSN 2016) tentang Pembebanan untuk Jembatan dan SNI 2833 (BSN 2016) tentang Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa.



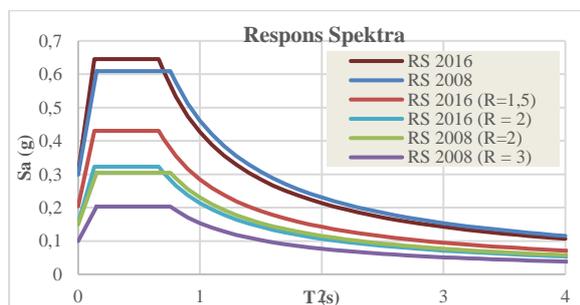
**Gambar 1.** Jalan Tol Bakauheni – Terbanggi Besar.

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, Goutam, and Pradeep. 2021). Perencanaan berbasis kinerja memiliki tujuan untuk mengetahui perilaku dari struktur jika menerima gaya dari 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. *performance based seismic design* menentukan tingkat kinerja jembatan berdasarkan kategori kepentingan jembatan (Marsh and Stuart 2013).

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

Perbandingan respons spektrum gempa saat perencanaan menggunakan peraturan SNI 2833 (BSN 2008) dan respons spektrum

berdasarkan peraturan yang berlaku saat ini SNI 2833 (BSN 2016) ditunjukkan pada Gambar 2. Pada pembebanan gempa Jembatan IC Terbanggi Besar mengalami kenaikan nilai spektra permukaan tanah pada periode pendek (SDS,  $T=0,2$ ) arah memanjang sebesar 41,24%, sedangkan pada arah melintang sebesar 58,89%. Berdasarkan grafik tersebut diketahui bahwa terjadi peningkatan beban gempa sehingga perlu diketahui tingkat kinerja jembatan berdasarkan performance based seismic design menggunakan metode *Non-Linear Time History Analysis* (riwayat waktu tidak linear).



**Gambar 2.** Respons Spektra SNI 2833 (BSN 2008) dan SNI 2833 (BSN 2016) pada Jembatan IC Terbanggi Besar

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, Goutam, and Pradeep. 2021).

## HIPOTESIS

Gaya yang bekerja pada struktur berdasarkan peraturan pada saat perencanaan (RSNI T-02-2005 (BSN 2005) tentang Standar Pembebanan untuk Jembatan, dan peraturan SNI 2833 (BSN 2008) untuk Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan) dievaluasi berdasarkan peraturan yang berlaku saat ini SNI 1725 (BSN 2016) tentang Pembebanan untuk Jembatan dan SNI 2833 (BSN 2016) tentang Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa). Dari evaluasi akan diperoleh data gaya dalam yang bekerja pada struktur, yang selanjutnya dilakukan analisis penampang

dengan bantuan perangkat lunak midas *General Section Designer* (GSD) sehingga diperoleh diagram interaksi tiap pilar jembatan. Hasil menunjukkan bahwa kinerja pilar masih dalam kondisi elastis atau inelastis, serta analisis penampang berupa nilai momen tiap pilar untuk analisis *Capacity Ratio* dari struktur jembatan.

## METODOLOGI

### Lokasi dan Tahapan Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah jembatan IC Terbanggi Besar STA. 139+925 yang merupakan jembatan yang berada di jalan tol Bakauheni – Terbanggi Besar di Provinsi Lampung. Jembatan IC Terbanggi Besar selesai dibangun tahun 2018, namun didesain sebelum tahun 2016. Dalam penelitian ini, akan dilakukan evaluasi kinerja struktur yang terbagi menjadi empat tahap. Tahap pertama adalah pengumpulan data sekunder yang terdiri dari data umum yang berupa data profil jembatan, dan teknis jembatan seperti perhitungan perencanaan, dan gambar rencana teknik akhir. Tahap kedua adalah pemodelan struktur jembatan dengan bantuan aplikasi *midas Civil* sesuai dengan kondisi aktual sehingga perilakunya diharapkan sesuai dengan kondisi di lapangan. Tahap ketiga melakukan analisis struktur jembatan berbasis gaya dengan peraturan pada saat perancangan (SNI T-02-2005 (BSN 2005) tentang Standar Pembebanan untuk Jembatan, dan peraturan SNI 2833 (BSN 2008) untuk beban gempa) dan peraturan yang berlaku saat ini SNI 1725 (BSN 2016) tentang Pembebanan untuk Jembatan). Tahap keempat dilakukan analisis perilaku jembatan berbasis kinerja untuk mengetahui level kinerja jembatan. Dari level kinerja yang didapat, dapat diketahui tingkat kinerja dari jembatan tersebut.

Data-data yang berhubungan dengan proyek didapatkan dari pihak owner yaitu PT Hutama Karya (Persero).

### Pemodelan Jembatan

Pemodelan struktur jembatan IC Terbanggi Besar mengacu pada data sekunder yang telah diperoleh. Jembatan IC Terbanggi Besar terdiri atas dua jalur dan empat lajur, dengan satu jalur dari Kayu Agung mengarah ke exit tol Terbanggi Besar dan satu jalur lagi dari

pintu tol Terbanggi Besar yang mengarah ke Bakauheni. Jembatan ini dibangun pada tahun 2018 dengan panjang bentang 87,4 meter dan lebar 17,8 meter. Jenis bangunan atas menggunakan *PCI Girder*, sistem balok *Simple Beam* dengan jumlah 3 bentang dan ditopang 2 pilar, serta 9 gelagar tiap bentangnya. Jembatan ini menggunakan jenis perletakan *elastomer bearing pad*.

Geometri Jembatan IC Tebanggi Besar yang akan dimodelkan dengan dimensi girder pada bentang 1 panjang 16,6 meter dan tinggi 1.4 meter, bentang 2 panjang 40,6 meter dan tinggi 2,1 meter, serta bentang 3 panjang 25,6 meter dan tinggi 1,6 meter. Tinggi pilar jembatan adalah 7 meter.

## HASIL DAN ANALISIS

### Analisis Pembebanan dan Analisis Penampang

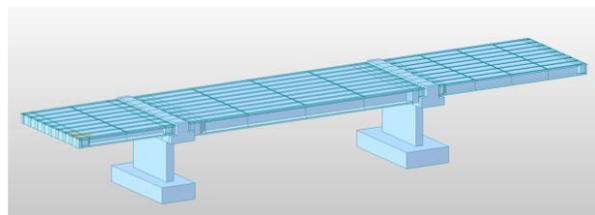
Gaya yang bekerja pada struktur berdasarkan pada peraturan saat perencanaan (SNI T-02-2005 tentang Standar Pembebanan untuk Jembatan, dan peraturan SNI 2833 (BSN 2008) untuk beban gempa) dan peraturan yang berlaku saat ini SNI 1725 (BSN 2016) tentang Pembebanan untuk Jembatan dan SNI 2833 (BSN 2016) tentang Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa). Dari perangkat lunak midas Civil diperoleh gaya-gaya dalam yang bekerja pada struktur, selanjutnya dilakukan analisis penampang dengan bantuan perangkat lunak midas GSD sehingga diperoleh diagram interaksi tiap pilar jembatan yang menunjukkan apakah pilar masih dalam kondisi elastis atau inelastis. Hasil dari analisis penampang juga akan diperoleh nilai Momen tiap pilar yang akan digunakan untuk analisis *capacity ratio* dari struktur jembatan.

### Material Properties

Material untuk perencanaan struktur jembatan adalah beton prategang dan beton bertulang dengan spesifikasi sebagai berikut.

**Tabel 1.** Karakteristik material

Material	Mutu
1. Beton	
a. PCI girder	50 MPa
b. Pelat lantai	30 MPa
c. Pier head dan pier	30 MPa
d. Pilecap	25 MPa
e. Balok diafragma	30 MPa
2. Tendon Prategang, <i>Low relaxation strand</i> ( $\phi=1/2$ inch = 12,7 mm)	
a. Kuat tarik	1860 MPa
b. Kuat leleh	1560 MPa
c. Modulus elastisitas	195000 MPa
3. Baja Tulangan	
a. Kuat leleh	400 MPa
b. Modulus elastisitas	200000 MPa



**Gambar 3.** Tampak Pemodelan Jembatan pada midas Civil.

### Pembebanan Jembatan

Setelah struktur jembatan dimodelkan, selanjutnya dilakukan *input* pembebanan pada struktur jembatan. Adapun *input* pembebanan didasarkan pada peraturan saat jembatan direncanakan (SNI T-02-2005 (BSN 2005) tentang Standar Pembebanan untuk Jembatan, dan peraturan SNI 2833 (BSN 2008) untuk beban gempa) dan peraturan yang berlaku saat ini (SNI 1725 (BSN 2016) tentang Pembebanan untuk Jembatan dan SNI 2833 (BSN 2016) (BSN 2016) tentang Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa).

Dibandingkan (BSN 2005) RSNI T-02-2005 (BSN 2005), pada SNI 1725 (BSN 2016) terjadi peningkatan beban rem dari 50,18 kN menjadi 125 kN, atau mengalami kenaikan sebesar 148,07%. Sementara itu, perubahan pada pembebanan gempa, yaitu peta gempa dan faktor modifikasi respons gempa. Pada SNI 2833 (BSN 2008) menggunakan Peta Zona Gempa Indonesia Pusat Litbang Teknologi Sumber Daya Air periode ulang 500 tahun dengan faktor modifikasi respons gempa untuk pilar tipe dinding 2 (sumbu kuat) dan 3 (sumbu lemah), sedangkan pada peraturan yang berlaku saat ini, yaitu SNI 2833 (BSN 2016) Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017 dengan periode

ulang 1000 tahun dengan faktor modifikasi respons gempa sebesar 1,5 untuk pilar tipe dinding.

Dalam peraturan pembebanan jembatan, terdapat kombinasi pembebanan dan faktor beban. Analisis struktur jembatan perlu diperhitungkan kombinasi pembebanan yang mungkin bekerja pada struktur selama umur rencana untuk mengetahui kombinasi pembebanan yang paling berpengaruh terhadap struktur. Kombinasi pembebanan mengatur perkalian nilai beban yang bekerja pada struktur jembatan dengan faktor beban yang telah ditentukan dalam peraturan terkait.

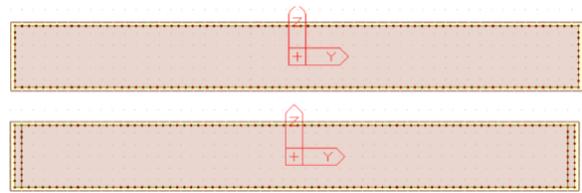
Kombinasi pembebanan gempa pada (BSN 2005) RSNI T-02-2005 (BSN 2005) tidak memperhitungkan beban lalu lintas, sedangkan pada SNI 1725 (BSN 2016) memperhitungkan. Peningkatan beban lalu lintas memengaruhi kondisi jembatan, dengan meningkatnya beban lalu lintas maka semakin rendah *load rating* jembatan.

### Pemodelan Penampang Pier Jembatan

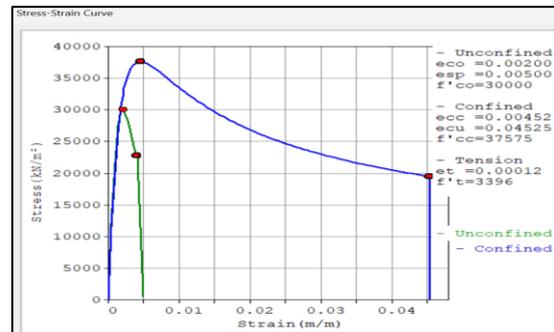
Dalam analisis evaluasi kinerja dari jembatan IC Terbanggi Besar, selain menghitung gaya dalam yang bekerja pada jembatan, diperlukan juga perhitungan kapasitas penampang dari pier jembatan. Perhitungan kapasitas penampang didapatkan dari perangkat lunak midas dengan memodelkan bentuk geometri beserta properti material. Properti material pada penelitian ini menggunakan kurva tegangan – regangan model Mander untuk material beton dan model Minegotto – Pinto untuk material tulangan baja. Material elemen pier dimodelkan sebagai *unconfined* (untuk selimut beton) dan *confined* mengikuti bentuk penampang yang terkekang oleh tulangan pengikat sengkang. Berikut ditampilkan parameter-parameter yang dimasukkan dalam pemodelan penampang pier 1 dan pier 2 jembatan IC Terbanggi Besar:

**Tabel 2.** Deagregasi Jembatan IC Terbanggi Besar.

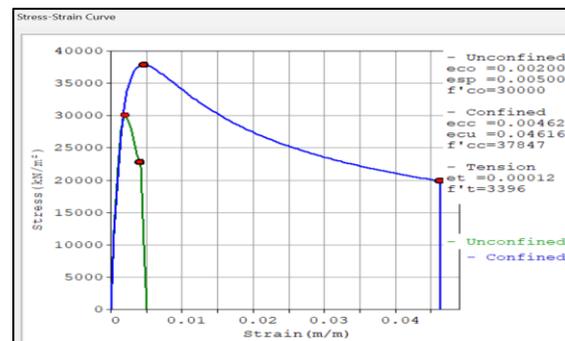
Sumber Gempa	Periode Ulang 100 Tahun		Periode Ulang 1000 Tahun	
	Magnitude (M)	Jarak (R) km	Magnitude (M)	Jarak (R) km
Benioff	6.4 - 6.6	150 -200	7 - 7.2	150 -200
Sesar Dangkal	6 - 6.2	80 -100	6 - 6.2	80 -100
Megathrust	7.8 - 8	200 -250	8.4 - 8.6	200 -250



**Gambar 4.** Ilustrasi penampang pier 1 dan pier 2.



(a)

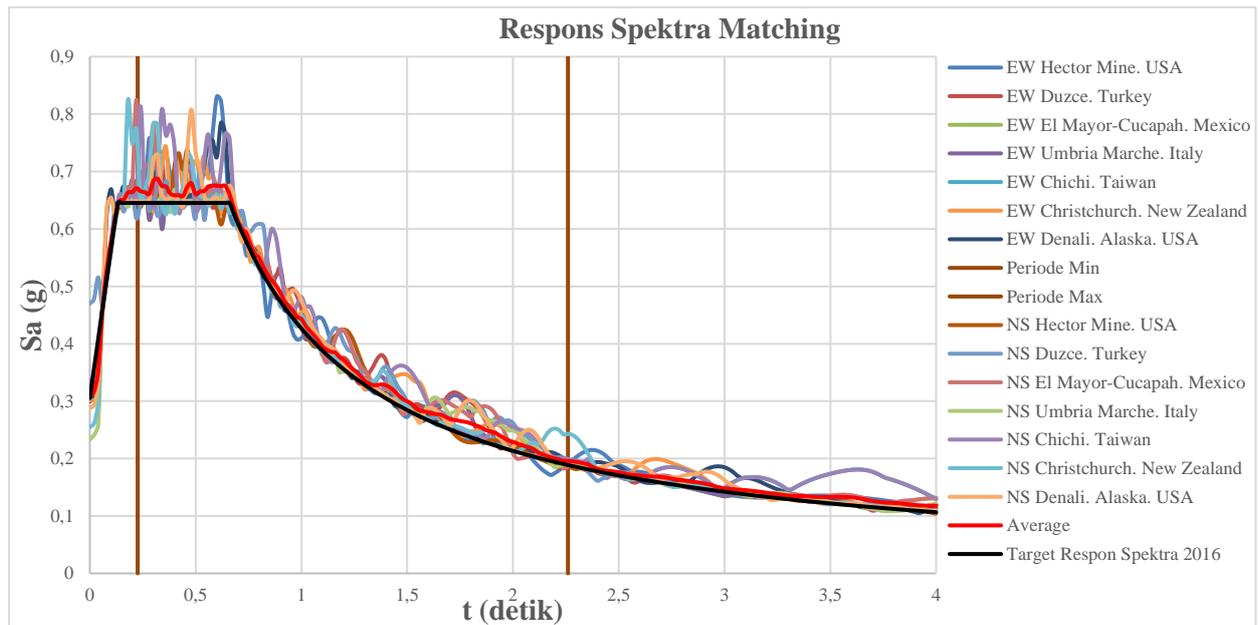


(b)

**Gambar 5.** Stress – Strain Curve pada : (a) Pier 1; (b) Pier 2.

### Pemilihan Rekaman Percepatan Tanah

Pada SNI 2833 (BSN 2016), AASHTO *Load and Resistance Factored Design (LRFD) Bridge Design Specifications 2020* dan FHWA 2006 disebutkan bahwa untuk melakukan analisis nonlinier riwayat waktu disyaratkan jika minimum menggunakan 7 rekaman percepatan tanah maka diambil respon rata-rata dari setiap arah gempa. Untuk melakukan pemilihan gerakan tanah yang sekiranya sesuai dengan karakteristik lokasi struktur jembatan yang ditinjau, perlu dilakukan proses deagregasi bahaya gempa.



**Gambar 6.** Hasil Penskalaan Respon Spektra 7 Ground Motion.

Proses deagregasi bahaya gempa didasarkan pada *mean source Magnitude* (M) dan *mean source distance* (R) ketika kedua parameter ini dianggap memberikan kontribusi yang terbesar terhadap percepatan puncak yang dihasilkan. Nilai pasangan M dan R ini selanjutnya digunakan untuk mencari suatu pencatatan rekaman gerak tanah akibat gempa yang mempunyai kemiripan M dan R lokasi struktur yang ditinjau.

Pada buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa tahun 2022 terdapat peta deagregasi untuk M dan R dengan 3 (tiga) buah sumber gempa, yaitu *benioff*, *shallow crustal* (sesar dangkal), dan *megathrust* dengan periode getar dan berbagai kemungkinan

periode ulang gempa dengan *damping ratio* 5%. Untuk kepentingan evaluasi jembatan pada penelitian ini maka pemilihan peta deagregasi mengacu pada periode ulang 100 tahun dan 1.000 tahun dengan mengambil rentang pada periode 0,2 detik (periode Jembatan IC Terbanggi Besar = 1,13 detik). Hasil deagregasi untuk lokasi Jembatan IC Terbanggi Besar dapat dilihat pada Tabel 2.

Dengan parameter deagregasi tersebut maka dapat dicari 7 (tujuh) pasang gerak tanah (*ground motion*) yang mewakili setiap mekanisme gempa dengan nilai magnitudo (M) dan jarak (R) yang sesuai. Pencarian rekaman gerak tanah dasar horizontal berupa data akselerogram diperoleh dari *PEER ground motion database* dan *Engineering Strong Motion Database* dengan hasil pada Tabel 3.

**Tabel 3.** *Ground Motion* untuk NLTHA

Nama Gempa	Stasiun	Tahun	M	Mekanisme Gempa	Jarak (km)
Hector Mine, USA	12440 Imperial Hwy North Grn	1999	7.13	<i>Benioff</i>	176.59
Duzce, Turkey	Ambarli	1999	7.14	<i>Benioff</i>	187.99
El Mayor-Cucapah, Mexico	Desert Hot Springs	2010	7.2	<i>Benioff</i>	161.52
Umbria Marche, Italy	Aquilpark-Citta	1997	6	Sesar Dangkal	83.48
Chichi, Taiwan	CHY016	1999	6.2	Sesar Dangkal	88.27
Christchurch, New Zealand	CECS	2011	6.2	Sesar Dangkal	89.68
Denali, Alaska, USA	Eagle River - AK Geologic Mat	2002	7.9	<i>Megathrust</i>	246.24

### Level Kinerja Berdasarkan Drift

Penerapan level kinerja berdasarkan dokumen (Marsh and Stuart 2013) dilakukan pada penelitian ini. Kriteria desain yang digunakan berupa nilai *drift* pada elemen pier akibat pembebanan variasi gempa *upper-level*. Respons yang ditinjau dalam analisis ini berupa perpindahan arah lateral serta gaya geser dasar pier jembatan. Perpindahan lateral dikontrol pada titik tengah *pierhead* pada pier yang

ditinjau, yaitu pier 1 dan pier 2. Nilai *drift* yang akan ditinjau dibagi menjadi 2, yaitu arah longitudinal dan arah transversal yang akan didapatkan dengan cara membagi nilai deformasi yang terjadi terhadap tinggi pier. Sesuai dengan penjelasan sebelumnya, analisis akan dilakukan dua kali. Analisis pertama akan disimbolkan dengan “(1)”, sedangkan analisis kedua akan disimbolkan dengan “(2)” pada akhir keterangan penamaan gambar atau tabel.

**Tabel 4.** Hasil Analisis Level Kinerja Berdasarkan Nilai *Drift* (1).

Nama Gempa	Jenis	Displacement arah-x (m)		Displacement arah-y (m)	
		P1	P2	P1	P2
Hector Mine, USA	1	0.037	0.042	0.00049	0.00031
	2	0.013	0.014	0.00112	0.00095
Duzce, Turkey	1	0.039	0.040	0.00039	0.00043
	2	0.014	0.013	0.00125	0.00135
El Mayor-Cucapah, Mexico	1	0.037	0.039	0.00035	0.00041
	2	0.014	0.013	0.00112	0.00132
Umbria Marche, Italy	1	0.033	0.035	0.00045	0.00045
	2	0.012	0.012	0.00120	0.00117
Chichi, Taiwan	1	0.036	0.038	0.00045	0.00040
	2	0.013	0.013	0.00137	0.00117
Christchurch, New Zealand	1	0.038	0.040	0.00051	0.00037
	2	0.014	0.014	0.00135	0.00116
Denali, Alaska, USA	1	0.039	0.037	0.00039	0.00035
	2	0.014	0.012	0.00114	0.00127
<b>Rata-rata (m)</b>		0.025	0.026	0.0008	0.0008
<b>Tinggi Pier (m)</b>		7	7	7	7
<b>DRIFT RATIO (%)</b>		0.366	0.375	0.0118	0.0113

**Tabel 5.** Hasil Analisis Level Kinerja Berdasarkan Nilai *Drift* (2).

Nama Gempa	Jenis	Displacement arah-x (m)		Displacement arah-y (m)	
		P1	P2	P1	P2
Hector Mine, USA	1	0.038	0.042	0.0005	0.0004
	2	0.015	0.014	0.0014	0.0015
Duzce, Turkey	1	0.035	0.041	0.0004	0.0004
	2	0.014	0.014	0.0012	0.0012
El Mayor-Cucapah, Mexico	1	0.035	0.045	0.0004	0.0003
	2	0.014	0.015	0.0012	0.0010
Umbria Marche, Italy	1	0.038	0.038	0.0004	0.0003
	2	0.014	0.013	0.0014	0.0012
Chichi, Taiwan	1	0.043	0.037	0.0004	0.0004
	2	0.016	0.013	0.0013	0.0012
Christchurch, New Zealand	1	0.041	0.037	0.0003	0.0003
	2	0.015	0.012	0.0013	0.0010
Denali, Alaska, USA	1	0.037	0.038	0.0004	0.0003
	2	0.014	0.013	0.0011	0.0011
<b>Rata-rata (m)</b>		0.026	0.027	0.0009	0.0008
<b>Tinggi Pier (m)</b>		7	7	7	7
<b>DRIFT RATIO (%)</b>		0.3824	0.3853	0.0124	0.0115

### Level Kinerja Berdasarkan Regangan Material Beton

Penerapan level kinerja berdasarkan dokumen (Ian G. et al. 2020) juga dilakukan pada penelitian ini. Kriteria desain yang digunakan berupa nilai regangan material beton dan tulangan baja pada elemen pier akibat

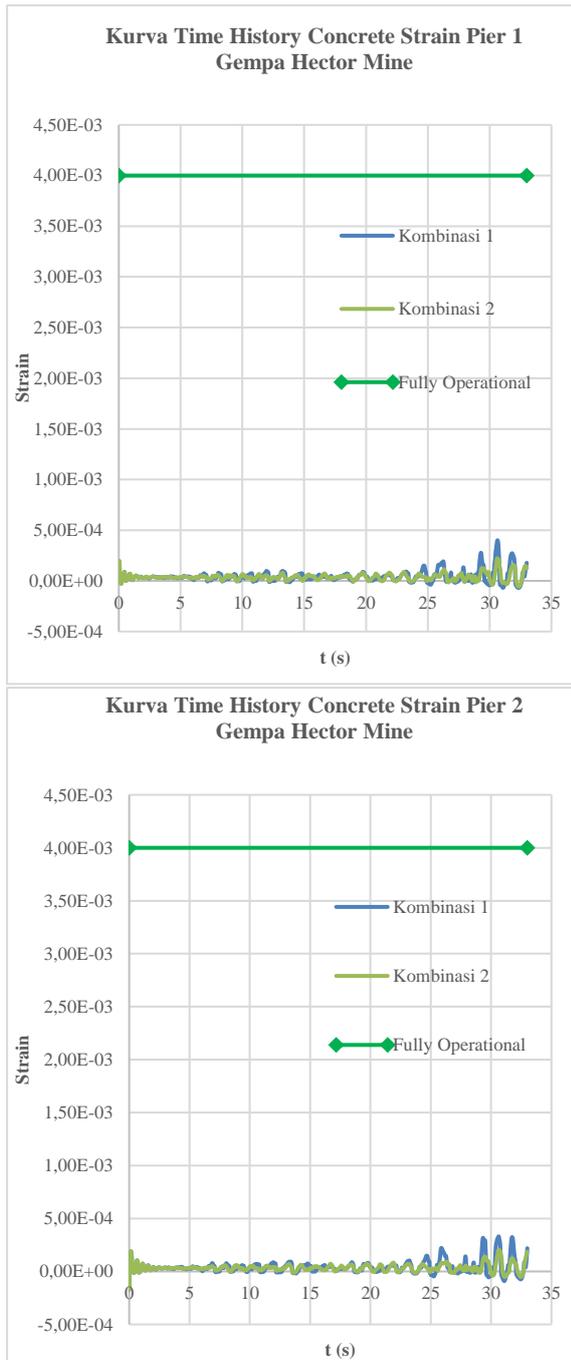
pembebanan variasi gempa di lokasi struktur jembatan. Pada Gambar 7 ditampilkan kurva histerisis regangan material beton pada penampang pier Struktur Jembatan IC Terbanggi Besar beserta rangkuman hasil regangan maksimum material beton pada Tabel 6 dan Tabel 7.

**Tabel 6.** Rangkuman Hasil Regangan Maksimum Material Beton Pier 1 dan Pier 2 (1).

Nama Gempa	Jenis	Regangan Material Beton		Performa Struktur
		P1	P2	
Hector Mine, USA	1	0.00037	0.00041	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00021	0.00024	<i>Fully Operational</i>
Duzce, Turkey	1	0.00034	0.00036	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00019	0.00024	<i>Fully Operational</i>
El Mayor-Cucapah, Mexico	1	0.00034	0.00037	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00015	0.00024	<i>Fully Operational</i>
Umbria Marche, Italy	1	0.00033	0.00032	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00017	0.00024	<i>Fully Operational</i>
Chichi, Taiwan	1	0.00034	0.00038	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00018	0.00024	<i>Fully Operational</i>
Christchurch, New Zealand	1	0.00035	0.00038	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00016	0.00024	<i>Fully Operational</i>
Denali, Alaska, USA	1	0.00029	0.00032	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00017	0.00024	<i>Fully Operational</i>
<b>Rata-rata (m)</b>		0.00026	0.00030	<i>Fully Operational</i>

**Tabel 7.** Rangkuman Hasil Regangan Maksimum Material Beton Pier 1 dan Pier 2 (2).

Nama Gempa	Jenis	Regangan Material Beton		Performa Struktur
		P1	P2	
Hector Mine, USA	1	0.00040	0.00033	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00022	0.00020	<i>Fully Operational</i>
Duzce, Turkey	1	0.00036	0.00039	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00019	0.00019	<i>Fully Operational</i>
El Mayor-Cucapah, Mexico	1	0.00034	0.00038	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00019	0.00019	<i>Fully Operational</i>
Umbria Marche, Italy	1	0.00031	0.00036	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00021	0.00020	<i>Fully Operational</i>
Chichi, Taiwan	1	0.00033	0.00036	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00019	0.00020	<i>Fully Operational</i>
Christchurch, New Zealand	1	0.00030	0.00032	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00019	0.00019	<i>Fully Operational</i>
Denali, Alaska, USA	1	0.00032	0.00040	<i>Fully Operational</i>
	2	0.00019	0.00019	<i>Fully Operational</i>
<b>Rata-rata (m)</b>		0.00027	0.00028	<i>Fully Operational</i>

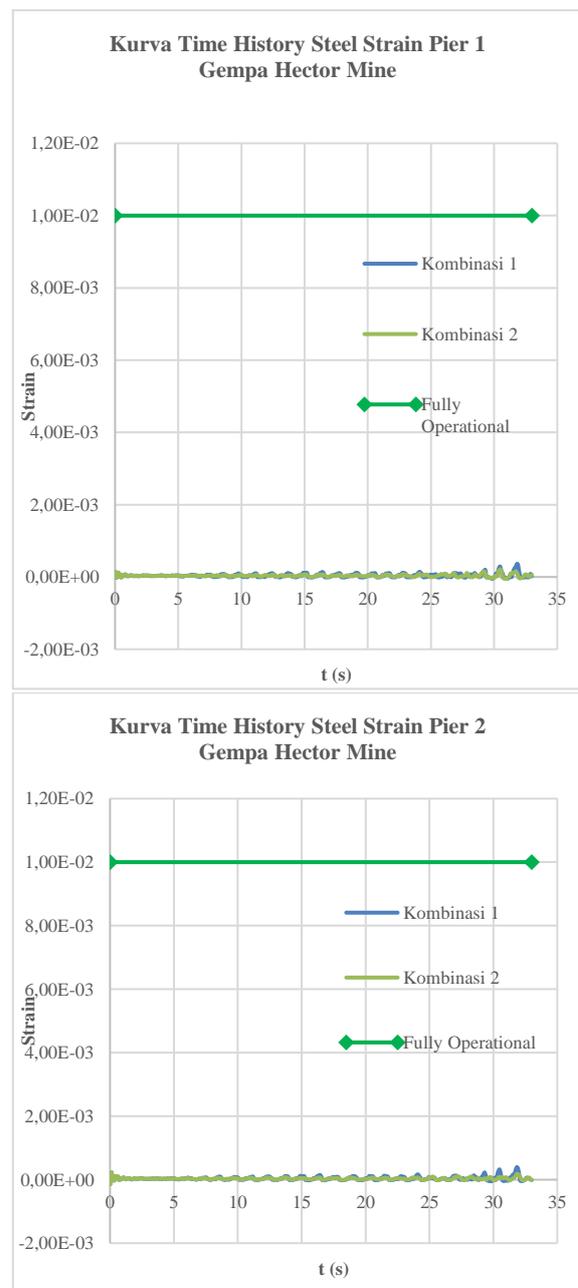


**Gambar 7.** Kurva Histerisis Regangan Material Beton Penampang Pier Gempa Hector Mine (1).

Berdasarkan Tabel 6 dan Tabel 7, Level kinerja yang didapatkan adalah *fully operational*. Hasil tersebut didapatkan dari pengamatan nilai regangan pada serat terluar pada penampang pier dan berada pada daerah tarik yang menghasilkan regangan maksimum.

### Level Kinerja Berdasarkan Regangan Material Baja

Langkah yang sama dilakukan dengan meninjau nilai regangan material tulangan baja pada elemen pier akibat pembebanan variasi gempa *upper-level* (periode ulang 1.000 tahun) di lokasi Kabupaten Lampung Tengah dengan tipe tanah sedang (SD). Berikut merupakan kurva histerisis regangan material tulangan baja pada penampang pier Struktur Jembatan IC Terbanggi Besar:



**Gambar 8.** Kurva Histerisis Regangan Material Tulangan Baja Penampang Pier Gempa Hector Mine (1).

**Tabel 8.** Rangkuman Hasil Regangan Maksimum Material Tulangan Baja Pier 1 dan Pier 2 (1).

Nama Gempa	Jenis Kombinasi	Regangan Material Tulangan Baja		Performa Struktur
		P1	P2	
		Hector Mine, USA	1	
	2	0.000213	0.000229	<i>Fully Operational</i>
Duzce, Turkey	1	0.000329	0.000352	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000192	0.000229	<i>Fully Operational</i>
El Mayor-Cucapah, Mexico	1	0.000330	0.000361	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000147	0.000229	<i>Fully Operational</i>
Umbria Marche, Italy	1	0.000322	0.000309	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000173	0.000229	<i>Fully Operational</i>
Chichi, Taiwan	1	0.000332	0.000365	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000185	0.000229	<i>Fully Operational</i>
Christchurch, New Zealand	1	0.000341	0.000365	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000165	0.000229	<i>Fully Operational</i>
Denali, Alaska, USA	1	0.000286	0.000315	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000169	0.000230	<i>Fully Operational</i>
<b>Rata-rata (m)</b>		0.000253	0.000290	<b><i>Fully Operational</i></b>

**Tabel 9.** Rangkuman Hasil Regangan Maksimum Material Tulangan Baja Pier 1 dan Pier 2 (2).

Nama Gempa	Jenis Kombinasi	Regangan Material Tulangan Baja		Performa Struktur
		P1	P2	
Hector Mine, USA	1	0.000387	0.000318	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000190	0.000196	<i>Fully Operational</i>
Duzce, Turkey	1	0.000349	0.000374	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000189	0.000184	<i>Fully Operational</i>
El Mayor-Cucapah, Mexico	1	0.000336	0.000365	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000189	0.000185	<i>Fully Operational</i>
Umbria Marche, Italy	1	0.000302	0.000353	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000217	0.000196	<i>Fully Operational</i>
Chichi, Taiwan	1	0.000326	0.000348	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000189	0.000202	<i>Fully Operational</i>
Christchurch, New Zealand	1	0.000290	0.000309	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000189	0.000185	<i>Fully Operational</i>
Denali, Alaska, USA	1	0.000308	0.000391	<i>Fully Operational</i>
	2	0.000190	0.000184	<i>Fully Operational</i>
<b>Rata-rata (m)</b>		0.000261	0.000271	<b><i>Fully Operational</i></b>

## PEMBAHASAN

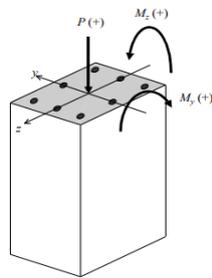
### Level Kinerja Berdasarkan *Drift*

Dari hasil pembebanan kombinasi 1 (100%Eqx + 30%Eqy) dan kombinasi 2 (30%Eqx + 100% Eqy) pada analisis pertama dan kedua didapatkan rata-rata *drift ratio* pada pier P1 dan P2 kurang dari 1%. Dengan demikian, berdasarkan nilai *drift* yang terjadi, level kinerja jembatan berada pada level kinerja *Fully Operational*, yaitu setelah gempa terjadi kerusakan yang terjadi dapat diabaikan dan layanan penuh tersedia untuk semua kendaraan setelah pemeriksaan dan pembersihan puing-puing. Kerusakan dapat diperbaiki tanpa mengganggu lalu lintas.

### Level Kinerja Berdasarkan Regangan Material Beton

Berdasarkan pengamatan, dapat disimpulkan parameter tinjauan kritis untuk penentuan level kinerja dapat dilakukan pengecekan pada daerah tarik dan lokasi terjauh dari sumbu netral penampang sehingga menghasilkan regangan retak tercapai terlebih dahulu. Hal ini sudah sesuai dengan mekanisme kelelahan pada beton bertulang dimana kelelahan pertama akan terjadi saat tegangan lentur berada pada lokasi terjauh dari sumbu netral dan menghasilkan tegangan untuk kondisi retak dan kelelahan kedua terjadi apabila pada lokasi tersebut regangan sudah mencapai

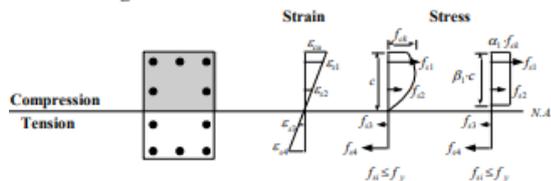
regangan beton ultimit yang dapat diilustrasikan pada Gambar 9. Mekanisme keruntuhan yang terjadi juga dapat dilihat dari nilai momen-kurvatur penampang pier dimana terdapat 3 tahapan tinjauan, yaitu ketika momen mencapai nilai momen retak, momen mencapai momen leleh, dan momen mencapai batas regangan ultimit pada material beton. Berdasarkan SNI 2833 (BSN 2016) tentang perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan, apabila menggunakan 7 percepatan gempa, respons struktur rata-rata yang akan diambil sebagai hasil acuan (SNI, Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa, 2833:2016). Berdasarkan hasil rata-rata nilai regangan yang didapatkan, level kinerja struktur jembatan berdasarkan regangan material beton adalah *fully operational*.



#### 1st Yielding (Cracking)

$$\text{cracking moment : } M_{cr} = k\sqrt{f'_c}Z + \frac{Z}{A}P$$

#### 2nd Yielding



Sumber : Midas Civil (2024).

**Gambar 9.** Ilustrasi mekanisme keruntuhan pada penampang beton bertulang.

### Level Kinerja Berdasarkan Regangan Material Baja

Berdasarkan tabel rangkuman, diperoleh bahwa level kinerja yang didapatkan adalah *fully operational*. Hal ini menandakan bahwa walaupun material beton sudah mengalami retak berupa *spalling* (saat *strain limit fully operational* terlampaui), material tulangan baja belum mengalami kelelahan (saat *strain limit fully operational* terlampaui). Jadi, dalam mekanisme keruntuhan penampang pier, material beton yang akan mengalami keretakan

pertama, dilanjutkan dengan kelelahan pada tulangan baja. Berdasarkan hasil rata-rata nilai regangan yang didapatkan dan dokumen *Proposed AASHTO Guidelines for Performance-Based Seismic Bridge Design* (Ian G. et al. 2020), level kinerja struktur jembatan berdasarkan regangan material tulangan baja adalah *fully operational*.

Hasil pengamatan pada tulangan baja longitudinal menghasilkan kesimpulan yang sama dengan material beton dimana regangan maksimum akan terjadi pada serat terluar penampang pier. Mekanisme yang terjadi diawali dengan tercapainya *cracking moment* pada serat beton terluar kemudian ketika regangan ultimit pada material beton tercapai, tegangan yang terjadi pada tulangan baja sudah mencapai nilai yang kurang atau sama dengan tegangan leleh baja seperti ilustrasi pada Gambar 9. Hal ini sudah sesuai dengan hasil analisis, yaitu regangan beton yang akan mengalami keruntuhan pertama.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari hasil analisis yang dilakukan pada jembatan IC Terbanggi Besar, dapat ditarik kesimpulan berikut. Pertama, untuk tinjauan terhadap pembebanan saat perencanaan, yaitu berdasarkan peraturan (BSN 2005) RSNI T-02-2005 (BSN 2005) dan SNI 2833 (BSN 2016), nilai *capacity ratio* pada seluruh pilar bernilai kurang dari 1 ( $R < 1$ ) sehingga struktur masih dalam kondisi elastis.

Kedua untuk tinjauan terhadap pembebanan saat ini, yaitu berdasarkan peraturan SNI 1725 (BSN 2016) dan SNI 2833 (BSN 2016), nilai *capacity ratio* pada seluruh pilar juga bernilai kurang dari 1 ( $R < 1$ ) sehingga struktur masih dalam kondisi elastis.

Ketiga tulangan transversal untuk *confinement* pada pilar eksisting jembatan tidak memenuhi persyaratan AASHTO Load and Resistance Factored Design (LRFD) Bridge Design Specifications 2020.

Dari hasil analisis untuk metode *nonlinear time history analysis* nilai *drift* adalah 0,3853%. Berdasarkan (Marsh and Stuart 2013), nilai tersebut menunjukkan level kinerja struktur jembatan yang diperoleh berada pada kategori *fully operational*. Sementara itu, hasil analisis

regangan maksimum material beton adalah 0,000281 dan regangan maksimum material tulangan baja adalah 0,00029, berdasarkan (Ian G. et al. 2020) level kinerja struktur jembatan yang diperoleh juga berada pada kategori *fully operational*. Kategori tersebut menggambarkan kondisi bahwa setelah gempa terjadi kerusakan yang terjadi dapat diabaikan dan layanan penuh tersedia untuk semua kendaraan setelah pemeriksaan dan pembersihan puing-puing. Kerusakan dapat diperbaiki tanpa mengganggu lalu lintas. Hasil ini juga mengonfirmasi analisis awal bahwa struktur masih dalam keadaan elastis.

### Saran

Penulis memberikan beberapa saran untuk penelitian lanjutan agar dilakukan pemodelan elemen-elemen struktur sesuai dengan mutu material berdasarkan hasil pengujian di lapangan serta pelaksanaan studi. pembandingan pada struktur jembatan lainnya, diperlukan untuk memverifikasi hasil dari penelitian ini.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Allah Swt. yang telah memberikan rezeki, kesehatan jasmani dan rohani sehingga penelitian ini dapat disusun dengan baik. Penulis juga berterima kasih kepada Bapak Dr.Suhu

Ing. Ir. Ediansjah Zulkifli, S.T., M.T. yang telah memberikan waktu dan kritik serta saran yang membangun. Terima kasih juga kepada Institut Teknologi Bandung dan Kementerian PUPR atas bantuan dalam menyelesaikan penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 9<sup>th</sup> Edition. 2020. Washington DC.

Awasthi, Jitendra, Goutam Ghosh, and Pradeep Kumar Mehta. "Seismic Design of a Curved Bridge as per Performance Based Criteria." *Materials Today: Proceedings* 38 (2021):

3014–18.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.324>.

Badan Standardisasi Nasional (BSN). *RSNI T-02-2005 Standar Pembebanan Untuk Jembatan*. 2005. Jakarta.

\_\_\_\_\_. *SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan*. 2016. Jakarta.

\_\_\_\_\_. *SNI 2833:2008 Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Jembatan*. 2008. Jakarta.

\_\_\_\_\_. *SNI 2833:2016 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa*. 2016. Jakarta.

Federal Highway Administration (FHWA). *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 – Bridges*. Publication No. FHWA-HRT-06-032. 2006. Virginia.

Ian G. Buckle University of Nevada Reno, Nicolas Luco U.S. Geological Survey, and Mervyn Kowalsky North Carolina State University. "Proposed AASHTO Guidelines for Performance-Based Seismic Bridge Design," August 21, 2020. <https://doi.org/10.17226/25913>.

Marsh, M. Lee, and Stuart J. Stringer. "Performance-Based Seismic Bridge Design," March 28, 2013. <https://doi.org/10.17226/22632>.

Sinatra, Frans, Muhammad Riyansyah, dan Made Suarjana. "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, no. 1 (April 14, 2020): 51–60. <https://doi.org/10.5614/jts.2020.27.1.6>.

Suarjana, Made, Daniel Dixon Octora, dan Muhammad Riyansyah. "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, no. 3 (June 25, 2020): 343–69. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.3.4>.