

Analisis Kerentanan Seismik pada Jembatan Beton Bertulang Eksisting dengan Kolom Pendek: Tinjauan Terkini

Ireng Guntorojati

Program Studi Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132.
E-mail: iguntorojati@gmail.com

Abstrak

Struktur jembatan beton bertulang eksisting yang direncanakan berdasarkan peraturan lama umumnya belum mempertimbangkan konsep perencanaan tahan gempa dan belum mengaplikasikan detailing seismik yang memadai. Hal ini menjadi perhatian bagi jembatan eksisting dengan kolom pendek yang memiliki aspek rasio (a/h) di bawah 2.5 dan berpotensi mengalami mekanisme keruntuhan geser atau geser-lentur. Mekanisme keruntuhan tersebut mengakibatkan performa struktur jembatan akibat gempa memiliki tingkat ketidakpastian yang tinggi. Analisis kerentanan seismik pada struktur jembatan eksisting dapat dilakukan dengan mengembangkan kurva kerentanan menggunakan incremental dynamic non-linear time history analysis yang mampu menghasilkan nilai probabilitas kerusakan pada berbagai intensitas gempa. Penelitian terdahulu umumnya mengembangkan kurva kerentanan berdasarkan idealisasi perilaku sendi plastis pada kolom jembatan yang mengalami mekanisme keruntuhan lentur akibat beban gempa. Studi ini menyampaikan tinjauan terkini (state-of-the-art) yang meliputi penelitian struktur jembatan beton bertulang dengan kolom pendek, khususnya yang perilaku keruntuhan tidak didominasi oleh mekanisme lentur. Tinjauan ini juga mengusulkan kerangka kerja untuk penilaian risiko seismik dan pengembangan kurva kerentanan yang lebih sesuai untuk struktur jembatan dengan kolom pendek. Hasil tinjauan ini dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai risiko seismik yang dihadapi oleh jembatan dengan kolom pendek, serta menunjukkan potensi penelitian lanjutan yang dapat dilakukan untuk pengembangan kurva kerentanan yang lebih akurat dan relevan.

Kata-kata Kunci: Analisis kerentanan seismik, jembatan beton bertulang eksisting, kolom pendek, kurva kerentanan, mekanisme keruntuhan geser

Abstract

Existing reinforced concrete bridge structures designed based on older regulations often do not consider seismic design concepts and lack adequate seismic detailing. This issue is particularly concerning for existing bridges with short columns and aspect ratio (a/h) below 2.5, which has the potential of shear or flexural-shear failure mechanisms. These failure mechanisms result in a high level of uncertainty in the seismic performance of bridge structures. Seismic fragility analysis of existing bridge structures can be performed by developing fragility curves using the incremental dynamic non-linear time history analysis method, which is capable of providing damage probability for various levels of seismic intensity. Previous studies typically developed fragility curves based on idealized plastic hinge behavior in bridge columns subjected to flexural failure mechanisms. This study presents a state-of-the-art review of reinforced concrete bridge structures with short columns, especially those whose failure behavior are not dominated by flexure mechanism. This review also proposes a framework for seismic risk assessment and for the development of more suitable fragility curves for bridge structures with short columns. The findings of this study can provide an understanding of the seismic risk in bridges with short columns, while also highlighting the potential for future research to develop more accurate and relevant fragility curves.

Keywords: Seismic fragility analysis, existing reinforced concrete bridges, short columns, fragility curves, shear failure mechanisms

1. Pendahuluan

Jembatan beton bertulang eksisting dengan kolom pendek yang memiliki mekanisme keruntuhan kritis-geser (*shear critical*), atau lentur-geser (*flexural-shear*), khususnya untuk jembatan di Indonesia yang direncanakan dan dikonstruksi berdasarkan peraturan perancangan gempa yang lama berpotensi memiliki

performa kinerja seismik yang tidak memadai karena konsep perencanaan tahan gempa yang tidak sesuai, detail penulangan yang minim dan perilaku mekanisme keruntuhan geser yang tidak sepenuhnya diperhitungkan dalam peraturan perencanaan gempa yang lama. Definisi struktur jembatan dengan kolom pendek berdasarkan *American Association of State Highway and Transportation* (AASHTO) adalah

* Penulis Korespondensi: iguntorojati@gmail.com



Gambar 1. Keruntuhan jembatan akibat kegagalan geser pada kolom pendek. (a) Nimitz Freeway (Mitchell dkk, 1991); (b) Jembatan Wu-shi (Buckle & Hwang SJ, 1999); (c) Jembatan Gaoliao (NCREE, 2022)

kolom dengan aspek rasio a/d , yaitu perbandingan tinggi bersih kolom (a) dengan dimensi terluar kolom (d) di bawah 2.5 sesuai dengan dokumen AASHTO LRFD (2020). Beberapa literatur juga membatasi rasio kolom dengan nilai a/d di bawah 2,0 dimana pengaruh perilaku geser menjadi dominan (Li dkk, 2016).

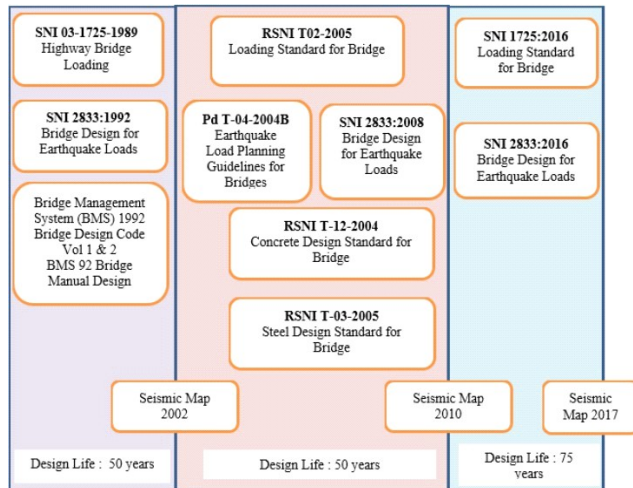
Keruntuhan jembatan akibat kegagalan kolom pendek akibat mekanisme kegagalan geser, telah terobservasi pada beberapa kejadian gempa besar. **Gambar 1** menunjukkan keruntuhan geser pada kolom jembatan di bagian bawah dari jalan tol dua tingkat Nimitz Freeway akibat Gempa Loma Prieta di Amerika Serikat pada tahun 1989 dari Mitchell dkk (1991); keruntuhan Jembatan Wu-shi di Taiwan akibat gempa Chi-chi pada tahun 1999 dari Buckle & Hwang SJ (1999); dan Keruntuhan Jembatan Gaoliao di Taiwan akibat gempa Taitung pada tahun 2022 berdasarkan laporan *National Center for Research on Earthquake Engineering* / NCREE (2022). Seluruh kasus tersebut melibatkan jembatan dengan kolom beton bertulang pendek yang direncanakan dengan peraturan gempa lama yang belum sepenuhnya mengakomodasi ketentuan yang dianut oleh peraturan gempa terkini.

Berdasarkan hasil penelitian Nugroho dkk (2022), ketentuan perencanaan infrastruktur di Indonesia, khususnya untuk struktur jembatan, terhadap bahaya gempa bumi selalu mengalami perkembangan dan perubahan. Setidaknya terdapat lima periode perkembangan Standar Nasional Indonesia (SNI) terkait kegempaan dan empat periode perkembangan SNI terkait perancangan jembatan terhadap beban gempa sejak pertama kali diterapkan pada tahun 1970-an. Pembaruan SNI tersebut hampir selalu memberikan tingkat bahaya gempa (*seismic hazard*) yang lebih tinggi akibat dari penambahan data historis gempa maupun indentifikasi sesar-sesar gempa baru. Peningkatan bahaya dan risiko gempa ini menimbulkan kekhawatiran terhadap kinerja struktur jembatan eksisting terutama yang direncanakan menggunakan konsep desain dan peraturan kegempaan yang lama. Selain itu jembatan yang direncanakan dengan peraturan gempa terdahulu sebelum SNI 2833-

2016, belum sepenuhnya mengakomodasi detiling tahan gempa yang memadai. Menurut Simanjuntak dkk (2023) kekurangan dari peraturan sebelumnya misalnya terkait pemenuhan rasio tulangan pengekang dan spasi minimum antar tulangan transversal hal ini menyebabkan kinerja seismik jembatan lama akan lebih rendah dibandingkan jembatan yang telah direncanakan dengan peraturan terbaru.

Metodologi terkini yang dapat digunakan untuk melakukan evaluasi kerentanan seismik adalah dengan pengembangan kurva fragilitas struktur yang diperoleh dari analisis dinamik inkremental (*Incremental Dynamic Analysis*, IDA) yang dikembangkan oleh Vamvatsikos dan Cornell (2002). Metode ini telah diterapkan oleh Cripstyani dkk (2019) untuk mengevaluasi struktur jembatan di Indonesia. Simanjuntak dkk (2023) juga menunjukkan besarnya nilai probabilitas suatu tingkat kerusakan yang terjadi pada jembatan akibat berbagai level intensitas gempa telah dikembangkan untuk berbagai era perencanaan dan konstruksi jembatan di Indonesia. Studi-studi tersebut umumnya menggunakan analisa riwayat waktu non-linier (*nonlinear time history analysis*) dengan mengasumsikan perilaku sendi plastis (*inelastic hinge properties*) pada pier jembatan yang berfungsi sebagai elemen penahan gempa berdasarkan idealisasi bentuk kurva tulang-belakang (*backbone curve*) dengan asumsi kolom yang mengalami keruntuhan lentur akibat pembebanan siklik.

Studi terbaru oleh Opabola dan Mangalathu (2023) justru menekankan untuk memberikan perhatian khusus pada jembatan dengan kolom pendek yang perilaku keruntuhannya didominasi oleh mekanisme geser atau geser-lentur, karena kolom dengan mekanisme keruntuhan geser-lentur memiliki tingkat kerentanan seismik yang lebih tinggi dibandingkan kolom dengan mekanisme lentur saja. Penelitian oleh Simon dan Vigh (2016) juga menunjukkan bahwa jembatan panjang dengan pier pendek memiliki risiko kegagalan geser yang lebih tinggi, sehingga memerlukan tindakan retrofitting untuk mencapai tingkat keandalan minimal yang disyaratkan.



Gambar 2. Perkembangan peraturan perencanaan jembatan di Indonesia (Simanjuntak dkk, 2023)

Beberapa penelitian oleh Leborgne & Ghannoum (2014), Yu dkk (2016) dan Li&Hwang (2017) telah membahas secara intensif perilaku dan mekanisme keruntuhan kolom beton bertulang pendek yang didominasi oleh mekanisme keruntuhan geser, meskipun sebagian besar tidak secara spesifik dikembangkan untuk struktur kolom jembatan. Massa dkk (2022) melakukan penelitian mengenai pengaruh geser pada respons seismik kolom jembatan yang dimodelkan secara numerik dengan tingkat akurasi yang memadai yang juga dibandingkan dengan prediksi peraturan jembatan termuktahir. Meskipun penelitian mengenai perilaku kolom pendek dan keruntuhan geser telah banyak tersedia, literatur mengenai validasi perilaku keruntuhan geser tersebut terhadap kinerja struktur jembatan dan risiko seismiknya masih terbatas. Untuk menjawab permasalahan tersebut, validasi empiris terhadap perilaku non-linear pier jembatan beton bertulang eksisting dengan kolom pendek, khususnya yang dikonstruksi menggunakan peraturan perencanaan yang lama perlu diteliti lebih lanjut.

Tulisan ini menyampaikan tinjauan terkini (*state-of-the-art*) yang meliputi penelitian struktur jembatan beton bertulang dengan kolom pendek, terutama yang perilaku keruntuhannya tidak didominasi oleh mekanisme lentur. Selain itu, tulisan ini juga mengusulkan kerangka kerja

Tabel 1. Perubahan nilai PGA untuk perencanaan jembatan pada wilayah Kota Jakarta

No	Peta gempa	Periode ulang (tahun)	Nilai PGA
1	Tahun 2002	475 tahun	0.15 g
2	Tahun 2010	475 tahun	0.20 – 0.25 g
3	Tahun 2017	975 tahun	0.25 – 0.30 g

untuk penilaian risiko seismik dan pengembangan kurva kerentanan yang lebih sesuai untuk struktur jembatan dengan kolom pendek. Hasil tinjauan ini dapat memberikan pemahaman yang lebih jelas mengenai risiko seismik yang dihadapi oleh jembatan dengan kolom pendek, serta mengidentifikasi potensi penelitian lanjutan yang dapat dilakukan untuk pengembangan kurva kerentanan yang lebih akurat dan relevan.

2. Perkembangan Peraturan Perancangan Jembatan terhadap Gempa di Indonesia

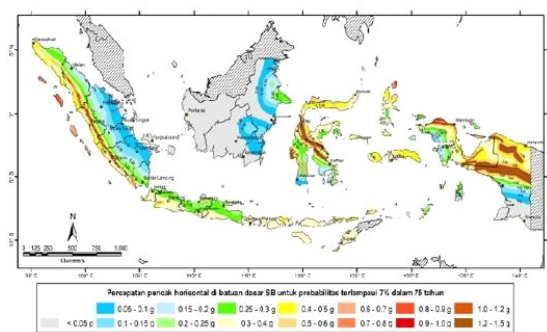
Perencanaan bangunan dan infrastruktur di Indonesia juga terhadap gempa selalu mengalami perkembangan. Hal ini tercermin dari peningkatan hazard gempa yang ditetapkan pada peta sumber dan bahaya gempa Indonesia yang dikeluarkan pada tahun 2002, 2010 dan 2017. Ketentuan mengenai kinerja rencana, risiko struktur jembatan terhadap gempa selama umur layannya juga mengalami peningkatan dari kemungkinan terlampaui 10% untuk umur layan 50 tahun (periode ulang gempa 475 tahun) pada Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan SNI 2833-2008, menjadi kemungkinan terlampaui 7% untuk umur layan 75 tahun (periode ulang gempa 975 tahun) pada SNI 2833-2016. Perkembangan peraturan perencanaan jembatan gempa di Indonesia ditunjukkan pada **Gambar 2**, dan perbandingan peta sumber bahaya gempa untuk kedua peraturan tersebut ditunjukkan pada **Gambar 3**.

Nilai intensitas gempa yang merupakan ukuran percepatan gempa pada batuan dasar (*Peak Ground Acceleration / PGA*) umumnya bertambah pada setiap pembaruan peta sumber bahaya gempa tersebut. Misalnya untuk wilayah kota Jakarta dan sekitarnya, perubahan nilai PGA untuk perencanaan jembatan



Gambar 6 Wilayah gempa Indonesia untuk periode ulang 500 tahun

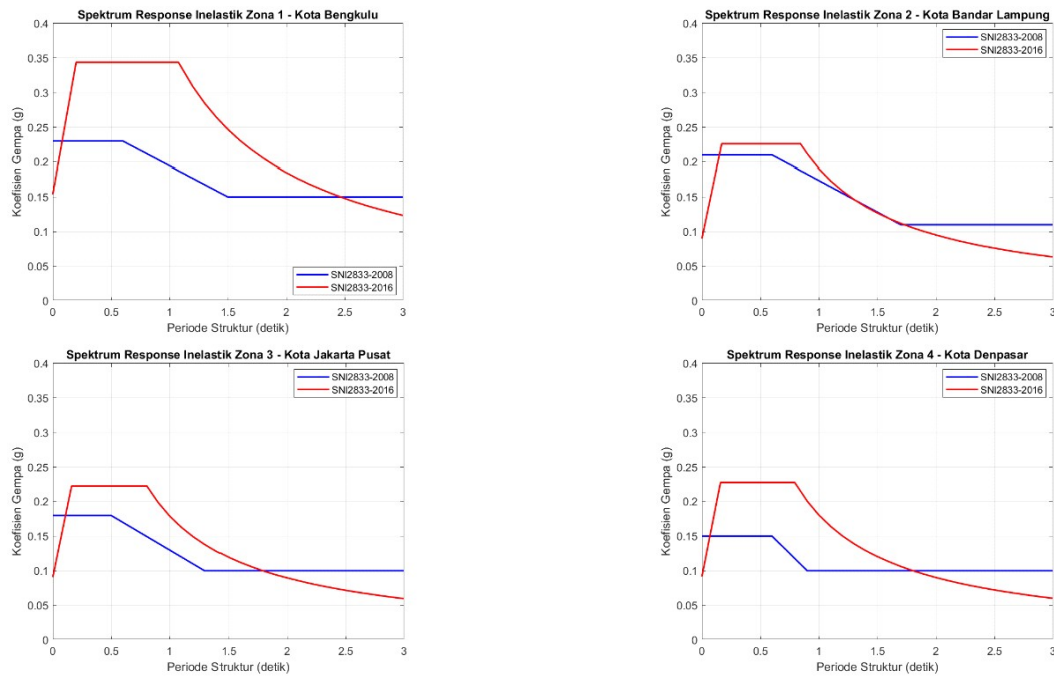
SNI 2833-2008



Gambar 1 - Peta percepatan puncak di batuan dasar (PGA) untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

SNI 2833-2016

Gambar 4. Spektrum response desain inelasis berdasarkan SNI 2833-2008 dan SNI 2833- 2016 untuk 4 kota dengan zona gempa berbeda di Indonesia



Gambar 4. Spektrum response desain inelastis berdasarkan SNI 2833-2008 dan SNI 2833- 2016 untuk 4 kota dengan zona gempa berbeda di Indonesia

terhadap perkembangan peta gempa ditunjukkan pada **Tabel 1**. Akibat peningkatan risiko gempa dari perubahan peta gempa dan peraturan perencanaan jembatan tersebut, spektrum response desain juga mengalami perubahan. **Gambar 4** menunjukkan perbedaan spektrum response desain inelastis dengan asumsi faktor modifikasi *response* gempa (R) rata-rata sebesar 4 dan redaman 5% antara SNI 2833-2008 dan SNI 2833-2016 untuk 4 kota berbeda (Bengkulu, Bandar Lampung, Jakarta Pusat dan Denpasar) yang terletak di 4 zona gempa yang berbeda di Indonesia.

Peningkatan bahaya dan risiko gempa ini menimbulkan kekhawatiran terhadap kinerja struktur jembatan eksisting terutama yang direncanakan menggunakan konsep desain dan peraturan kegempaan yang lama. Menurut Simanjuntak dkk (2023), jembatan yang direncanakan dengan peraturan gempa terdahulu sebelum SNI 2833-2016, belum sepenuhnya mengakomodasi detail tahan gempa yang memadai. Kekurangan dari peraturan sebelumnya misalnya terkait pemenuhan rasio tulangan pengekang dan spasi minimum antar tulangan transversal, hal ini menyebabkan kinerja seismik jembatan lama akan lebih rendah dibandingkan jembatan yang telah direncanakan dengan peraturan terbaru.

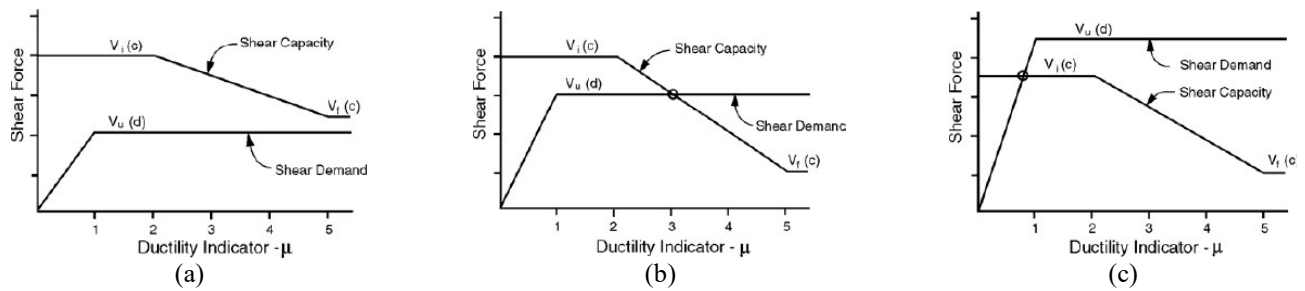
Selain itu, peta gempa yang digunakan dalam Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan SNI 2833-2016 masih berbasis bahaya (*hazard-based*). Peta gempa ini menyajikan tingkat bahaya gempa dengan probabilitas terlampaui tertentu, misalnya 7% dalam 75 tahun, tanpa mempertimbangkan secara langsung kerentanan struktur jembatan terhadap gempa tersebut. Pendekatan ini berbeda dengan peta gempa yang digunakan dalam peraturan perencanaan Gedung terhadap gempa (SNI 1727-2019) yang telah

menggunakan konsep peta gempa berbasis risiko (*risk-targeted*). Pengembangan peta gempa berbasis risiko yang khusus untuk jembatan di Indonesia perlu dilakukan agar dapat menggambarkan tingkat risiko gempa secara lebih akurat. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah dengan mengevaluasi kerentanan struktur jembatan eksisting terhadap gempa, khususnya jembatan yang direncanakan menggunakan peraturan kegempaan terdahulu.

3. Perilaku Keruntuhan Geser pada Kolom Beton Bertulang

Literatur mengenai perilaku kolom beton bertulang akibat gempa, baik berdasarkan tinjauan analitik maupun eksperimen, digunakan untuk menjelaskan berbagai teori dan metode penentuan kapasitas kolom beton bertulang yang relevan untuk dijadikan rujukan dalam penelitian ini. Secara umum terdapat dua teori utama dalam penentuan kapasitas geser kritis kolom beton bertulang, khususnya kolom pendek, yaitu teori kapasitas penampang dan teori model rangka. Perbedaan dan penelitian terkait teori-teori ini dibutuhkan untuk memahami pengaruh dari masing-masing pendekatan terhadap hasil evaluasi jembatan beton bertulang dengan kolom pendek.

Kolom pada sistem struktur jembatan beton bertulang merupakan elemen struktur yang tidak hanya menanggung beban vertikal gravitasi dari struktur atas, tapi juga merupakan elemen penahan beban lateral akibat gempa. Terdapat tiga mekanisme keruntuhan utama pada kolom jembatan beton bertulang yaitu keruntuhan lentur, keruntuhan lentur-geser, dan keruntuhan geser murni. Klasifikasi mekanisme keruntuhan pada kolom tersebut, ditentukan berdasarkan perbandingan kapasitas geser dan beban



Gambar 5. Mekanisme keruntuhan pada elemen kolom. (a) keruntuhan lentur; (b) keruntuhan lentur-geser; (c) keruntuhan geser (FHWA, 2006)

(demand) geser serta nilai daktilitas yang dapat dicapai oleh kolom tersebut sebelum kehilangan kemampuannya untuk menahan beban gravitasi vertikal.

Kolom beton bertulang yang memiliki kekangan memadai dapat mencapai daktilitas tinggi dan mendisipasi energi dengan baik, sehingga keruntuhan geser dapat dihindari. Pada mekanisme ini, kolom mengalami keruntuhan lentur setelah mencapai perpindahan tertentu akibat efek tekuk tulangan longitudinal. Mekanisme keruntuhan lentur ini sangat dikehendaki dalam desain struktur tahan gempa karena memungkinkan respons yang lebih aman dan terkendali. Perilaku tersebut ditunjukkan melalui hubungan antara respons gaya geser, kapasitas geser, dan daktilitas kolom pada mekanisme lentur.

Sebaliknya, detail penulangan yang kurang memadai dapat menyebabkan mekanisme keruntuhan lentur-geser atau bahkan keruntuhan geser yang getas. Mekanisme lentur-geser terjadi ketika elemen mengalami kelelahan lentur sebelum kegagalan geser, menghasilkan daktilitas sedang namun berpotensi kehilangan kapasitas beban secara tiba-tiba. Pada mekanisme keruntuhan geser, elemen struktur gagal sebelum mencapai kelelahan lentur, menyebabkan perilaku getas dengan daktilitas rendah dan minim disipasi energi. Keruntuhan ini sering ditemukan pada struktur dengan perencanaan gempa lama, yang tidak memenuhi detail penulangan tahan gempa. *Federal Highway Administration* (FHWA) dalam dokumen *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures* (2006), memberikan ilustrasi ketiga mekanisme keruntuhan pada elemen penahan gempa tersebut pada Gambar 5 di atas ini.

Penentuan kapasitas geser kolom beton bertulang bisa ditentukan oleh beberapa peraturan internasional yang umum digunakan untuk perencanaan bangunan dan jembatan, termasuk di Indonesia. Spesifikasi AASHTO LRFD 2020 untuk perencanaan jembatan memberikan prosedur desain kolom jembatan beton bertulang terhadap beban gempa. Prosedur ini meliputi pendekatan desain kapasitas untuk menentukan kapasitas geser, prosedur penentuan jumlah tulangan geser, dan penentuan volume tulangan pengekang pada lokasi sendi plastis untuk memastikan perilaku daktil. Pada AASHTO LRFD 2020, kapasitas geser nominal penampang, V_n , terdiri atas kontribusi penampang beton V_c , dan kontribusi tulangan geser, V_s . Persamaan untuk menentukan kapasitas nominal geser kolom beton

bertulang (tanpa prategang dan untuk beton dengan berat normal) adalah sebagai berikut :

$$V_n = V_c + V_s \leq 0.25 f'_c b_v d_v \quad (1)$$

$$V_c = 0.083 \beta \sqrt{f'_c} b_v d_v \quad (2)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d_v}{s} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (3)$$

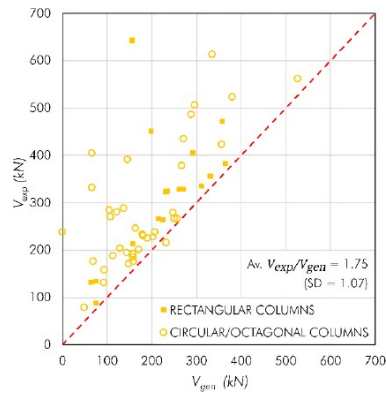
Persamaan-persamaan (1)-(3) di atas berlaku untuk elemen vertikal yang diklasifikasikan sebagai kolom yaitu yang memiliki rasio tinggi bersih dibandingkan dengan dimensi penampangnya tidak kurang dari 2,5. AASHTO LRFD 2020 memberikan ketentuan khusus perhitungan kapasitas geser untuk elemen pier-dinding (*wall-pier*), dimana kategori elemen dinding adalah elemen struktur dengan rasio tinggi bersih dan dimensi penampang lebih kecil dari 2,5. Ketentuan ini juga dapat digunakan untuk perencanaan dan penentuan kapasitas geser pada elemen kolom pendek yang memenuhi rasio tersebut. Meskipun demikian ketentuan terhadap kapasitas geser pier-dinding masih berdasarkan data yang terbatas berkaitan dengan perilaku inelastic pier-dinding.

Persamaan untuk menentukan kapasitas geser pier-dinding menurut AASHTO sebagai berikut :

$$V_n = [0.166 \sqrt{f'_c} + \rho_h f_y] b d \leq 0.66 \sqrt{f'_c} b d$$

Untuk persamaan (1)-(4), V_n merupakan kapasitas geser nominal kolom (N), yang terdiri dari kontribusi geser beton (V_c) dan tulangan geser (V_s). Parameter material mencakup f'_c (kuat tekan beton, MPa) dan f_y (kuat leleh tulangan geser, MPa). Dimensi penampang meliputi b_v (lebar efektif, mm), d_v (kedalaman efektif geser, mm), dan A_v (luas tulangan geser, mm²). Faktor-faktor tambahan adalah β dan θ (sesuai AASHTO 5.7.3.4), α (sudut tulangan geser), serta ρ_h (rasio luas tulangan geser terhadap luas penampang beton vertikal).

Massa, dkk. (2022) melakukan pemeriksaan reliabilitas terhadap hasil perhitungan kapasitas geser kolom beton bertulang dengan hasil eksperimen untuk berbagai jenis kolom yang datanya diperoleh dari *PEER Structural Performance Database*. Dari evaluasi terhadap 40 data kolom bulat / octagonal, dan 17 kolom persegi, dapat disimpulkan bahwa penggunaan AASHTO LRFD 2020 untuk perhitungan tahanan geser menghasilkan prediksi yang konservatif (*lower-bound value*), baik untuk prosedur umum, prosedur yang disimplifikasi maupun

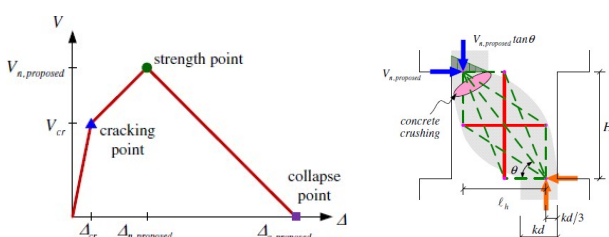


Gambar 6. Perbandingan perhitungan kapasitas geser berdasarkan AASHTO LRFD 2020 dengan hasil eksperimen (Massa dkk,2022)

untuk prosedur dengan menggunakan persamaan kapasitas geser pier-dinding. Prediksi terbaik untuk prediksi kapasitas geser adalah dengan menggunakan prosedur umum. Gambar 6 menunjukkan pemeriksaan dan rasio antara kapasitas geser yang diperoleh dari data eksperimen (V_{exp}) dengan kapasitas geser yang diperoleh menggunakan prosedur umum AASHTO 2020 (V_{gen}), diperoleh nilai rata-rata $V_{exp} / V_{gen} = 1,75$.

Perhitungan kapasitas geser penampang berdasarkan AASHTO 2020, khususnya yang berkaitan dengan elemen pier-dinding / kolom pendek, walaupun konservatif namun mengabaikan efek perilaku inelastik dan nilai daktilitas rencana kolom akibat dari pembentukan sendi plastis pada saat gempa. Untuk jembatan-jembatan yang direncanakan pada zona gempa 2,3 dan 4, AASHTO juga secara eksplisit merekomendasikan untuk mengacu pada spesifikasi termuktahir yang dapat digunakan untuk perencanaan struktur yang baru maupun perkuatan struktur eksisting.

Li & Hwang (2017) mengajukan model trilinear berdasarkan teori model rangka (*Compressive strut theory*) untuk memprediksi perilaku dan hubungan gaya lateral – deformasi pada kolom pendek beton bertulang yang mengalami kegagalan geser, ditunjukkan pada Gambar 7. Hubungan yang diajukan digunakan untuk mensimulasikan perilaku seismik kolom pendek beton bertulang dengan rasio tinggi-lebar (*height-to-depth ratio*) kurang dari 2. Model yang diajukan mampu memprediksi titik kekuatan pada saat terjadi retak geser, kapasitas geser, kekakuan lateral, degradasi kekuatan dan perilaku keruntuhan pada kolom pendek dengan akurasi yang dapat diterima. Model ini menggabungkan berbagai titik balik perilaku kolom



Gambar 7. Model trilinear dan softened strut-and-tie (Li & Hwang,2017)

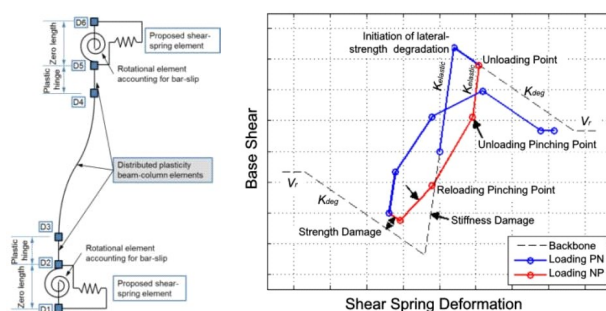
yaitu retak geser, kapasitas geser ultimate dan titik keruntuhan. Model ini juga menggunakan persamaan-persamaan sesuai dengan standar yang berlaku ACI 318-14 dan ASCE/SEI 41-13, yang disempurnakan dengan model *softened strut-and-tie* untuk memperkirakan kapasitas geser.

Data-data hasil eksperimen digunakan untuk memvalidasi akurasi dari model yang diusulkan yang menitikberatkan pentingnya memperhitungkan perubahan kekakuan akibat retak geser dan juga memperhitungkan deformasi geser pada kasus kolom pendek. Penelitian ini juga menyimpulkan, bahwa model yang diusulkan, meskipun menggunakan pendekatan yang sederhana, dapat menghasilkan estimasi perilaku kolom pendek yang lebih akurat dan dapat digunakan untuk kepentingan praktis rekayasa.

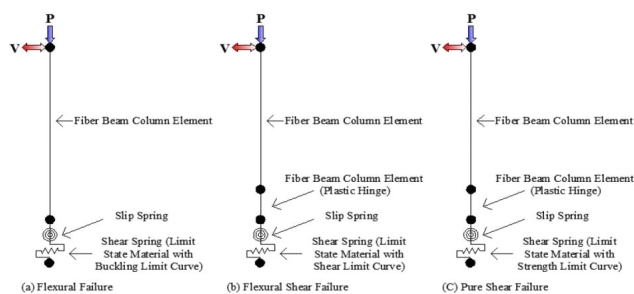
4. Model Analisis untuk Kolom Jembatan Pendek

Literatur mengenai model analitis kolom jembatan beton bertulang yang dikembangkan untuk evaluasi struktur terhadap beban gempa dinamik, digunakan untuk menentukan metode modeling yang paling sesuai dalam memprediksi perilaku kolom pendek terhadap beban gempa. Berdasarkan dua teori utama mengenai perilaku kolom, hanya penelitian model analitis berdasarkan teori kapasitas penampang yang tersedia. Sedangkan untuk teori model rangka, masih perlu dikembangkan model analitis yang sesuai untuk kebutuhan.

Leborgne & Ghannoum (2014) mengajukan model analitis untuk kolom beton bertulang yang menggunakan tulangan transversal rendah dan mengalami keruntuhan geser setelah mengalami kelelahan lentur. Model yang diusulkan mampu merepresentasikan degradasi kekakuan dan kekuatan akibat jalur pembebanan siklis dan mampu menyesuaikan dengan berbagai perubahan kondisi batas kolom termasuk akibat perubahan beban aksial, rasio gaya geser terhadap momen, dan besaran rotasi plastis. Model elemen yang diusulkan terdiri dari pegas geser tanpa panjang (*zero-length-shear-spring*) yang ditempatkan secara seri dengan elemen balok lentur untuk mensimulasikan perilaku siklis pada elemen kolom dan dapat diimplementasikan pada *open sources analytical software* (OpenSEES). Sebagai bagian dari studi ini, data eksperimen dari 32 pengujian kolom beton bertulang dievaluasi khususnya untuk kolom



Gambar 8. Model elemen (kiri) dan hubungan konsistif non-linear pegas geser (kanan) (Leborgne & Ghannoum, 2014)



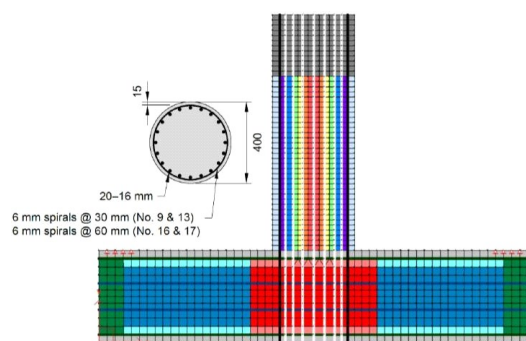
Gambar 9. Model analitis untuk masing-masing tipe keruntuhan: lentur, geser-lentur dan geser murni (Witarto, 2013)

yang mengalami kelelahan lentur sebelum kegagalan geser, sehingga mampu memberikan wawasan mendalam dalam memahami mekanisme kegagalan geser. **Gambar 8** menunjukkan aplikasi dari model elemen yang diusulkan dan hubungan konstitutif non-linear yang merepresentasikan perilaku dari elemen pegas geser.

Witarto (2013), mengusulkan model-model analitis komposit dari beberapa definisi perilaku penampang dan elemen untuk memprediksi perilaku kolom jembatan beton bertulang. Model analitis tersebut dikembangkan dalam perangkat lunak OpenSees dengan kemampuan untuk merepresentasikan perilaku histeresis umum kolom jembatan beton bertulang akibat siklik statis termasuk memperhitungkan efek *pinching* dan degradasi kekuatan. Tiga model diusulkan untuk mengakomodasi tiga mekanisme kegagalan yang umum terjadi pada kolom jembatan beton bertulang yaitu kegagalan lentur akibat tekuk pada tulangan longitudinal, kegagalan lentur-geser, dan kegagalan geser murni.

Model analitis komposit yang diusulkan terdiri atas beberapa model nonlinear dengan elemen serat (*fiber element*) yang merepresentasikan kolom jembatan dan pegas (*springs*) yang dirangkai secara seri pada ujung bawah kolom untuk memperhitungkan perilaku-perilaku seperti kehilangan kekuatan lekat (*bond slip*), degradasi kapasitas lateral akibat tekuk pada tulangan longitudinal (pada model dengan mekanisme keruntuhan lentur), dan degradasi kapasitas lateral akibat kegagalan geser (pada model dengan mekanisme keruntuhan geser-lentur dan geser murni).

Akurasi dari model yang diusulkan diverifikasi oleh 12 data uji eksperimental statis dengan beban siklik yang hasilnya menunjukkan bahwa model yang diusulkan



Gambar 10. Model elemen hingga nonlinear (kiri) dan hasil analisis elemen hingga untuk kolom dengan keruntuhan geser (kanan) (Massa dkk, 2022)

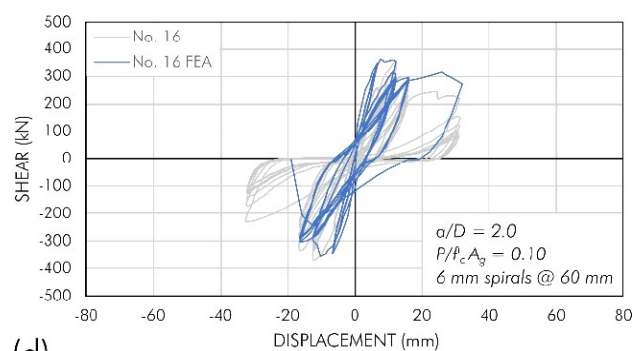
dapat mensimulasikan secara memadai perilaku nonlinier akibat mekanisme keruntuhan lentur dan mekanisme keruntuhan lentur-geser. Namun, model analitis untuk mekanisme keruntuhan geser murni tetap tidak dapat merepresentasikan kurva histeresis dari data eksperimental dengan baik. Selain analisis statis, analisis dinamis juga dilakukan dan dibandingkan dengan 3 data uji pseudo-dinamik. Hasil model analitis menunjukkan kecocokan yang baik dengan hasil uji berdasarkan analisis riwayat waktu (*time history*). **Gambar 9** menunjukkan model analitis untuk masing-masing tipe keruntuhan: lentur, geser-lentur dan geser murni.

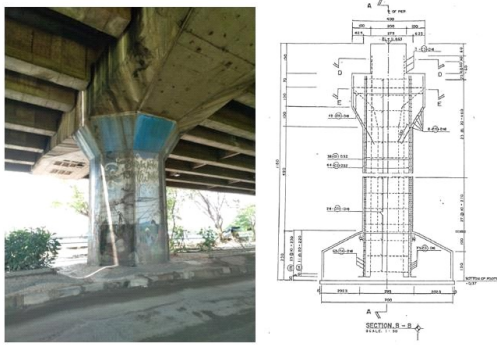
Massa dkk (2022) menginvestigasi efektivitas analisis elemen hingga nonlinier dalam memprediksi respons histeresis dari kolom jembatan akibat beban siklik. Piranti lunak elemen hingga nonlinier dua dimensi, VecTor2 digunakan untuk memprediksi respons kolom akibat seluruh kegagalan dan memperkirakan tingkat daktilitasnya berdasarkan *Modified Compression Field Theory* dan *Disturbed Stress Field Model* dan mampu memprediksi kegagalan dan distorsi akibat geser. **Gambar 10** menunjukkan model elemen hingga nonlinier dan hasil analisis elemen hingga untuk kolom dengan keruntuhan geser.

Analisis elemen hingga nonlinier mampu menjadi metode yang dapat diandalkan untuk memprediksi respons terhadap beban siklik pada kolom jembatan yang mengalami berbagai mekanisme keruntuhan, termasuk mekanisme keruntuhan lentur-geser dan geser murni. Analisis tersebut mengandalkan model perilaku berdasarkan persamaan empiris dalam memprediksi respons akibat beban siklik dan mampu memprediksi efek retak yang terbuka dan tertutup, peluluhan tegangan (*strain softening*), slip pada retak, pembukaan (*spalling*) pada selimut beton, tekuk tulangan, penetrasi leleh, interaksi geser-momen, pengaruh aspek rasio a/d , dan level beban aksial. Penentuan model yang tepat juga perlu mempertimbangkan tujuan dari analisis dan efisiensi durasi analisis. Model elemen hingga umumnya membutuhkan waktu analisis yang jauh lebih lama dibandingkan dengan model komposit biasa.

5. Kurva Kerentanan Seismik untuk Jembatan Eksisting di Indonesia

Literatur terkait kurva kerentanan seismik untuk jembatan eksisting di Indonesia menunjukkan





Gambar 11. (kiri) Kondisi pier 231 (Setiati & Guntorojati, 2020); (kanan) kurva fragilitas dari jembatan tol Cawang-Tanjung Priuk (Simanjuntak dkk, 2023)

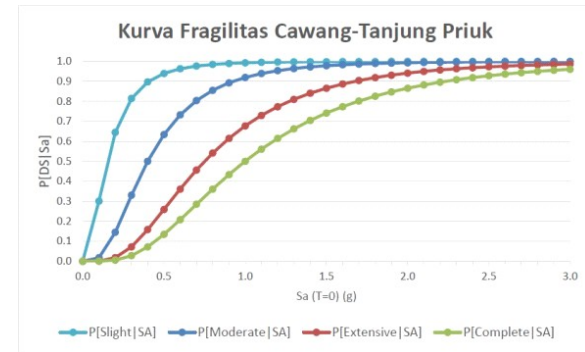
perkembangan penelitian yang belum sepenuhnya mempertimbangkan perilaku kolom beton bertulang, khususnya jembatan dengan kolom pendek yang perilaku keruntuhannya didominasi mekanisme lentur-geser atau geser kritis. Sebagian besar studi sebelumnya masih menggunakan pendekatan yang lebih sesuai untuk bangunan gedung tinggi atau mekanisme keruntuhan lentur murni, yang kurang relevan untuk struktur jembatan dengan kolom pendek.

Cripstyani dkk. (2019). mengembangkan metodologi umum yang dapat digunakan untuk menilai risiko seismik pada jembatan eksisting menggunakan prosedur analisis dinamik nonlinier dan penilaian kerentanan seismic, serta melakukan studi kasus untuk contoh jembatan eksisting yang berada di Indonesia. Silitonga dan Imran (2019), mengembangkan kurva kerentanan dengan metode HAZUS (Hazard United States) sebagai definisi dari hubungan antara nilai probabilitas terjadinya suatu tingkat kerusakan (*damage stage*) pada struktur dengan nilai intensitas gempa (*intensity measure*) yang umumnya diambil dalam bentuk percepatan puncak tanah di batuan dasar (*peak ground acceleration*) sebagai nilai kumulatif dari distribusi lognormal yang diekspresikan dalam persamaan berikut :

$$P[DS | PGA] = \Phi \left[\frac{\ln(PGA) - \ln(\mu_{PGA})}{\beta_{DS}} \right] \quad (5)$$

Variabel dalam persamaan ini meliputi $P[DS|PGA]$, yaitu probabilitas terjadinya atau terlampaunya tingkat kerusakan tertentu pada nilai PGA; PGA adalah percepatan puncak tanah di batuan dasar; $(PGA)_{median}$ adalah nilai median PGA untuk mencapai tingkat kerusakan tertentu; β_{DS} adalah standar deviasi lognormal PGA untuk tingkat kerusakan tersebut; dan Φ merupakan fungsi distribusi kumulatif normal standar.

Simanjuntak dkk. (2023) melakukan penelitian evaluasi kerentanan seismik untuk memastikan keamanan jembatan yang ada di Indonesia. Analisis kerentanan seismik dilakukan terhadap berbagai level intensitas gempa. Dalam studi ini, kurva kerentanan analitik dikembangkan untuk jembatan eksisting Ruas Jembatan Cawang- Tanjung Priuk (Jalan Lingkar Dalam Jakarta pada era sebelum 1990 yang merupakan jembatan beton multi-span girder sebagai tipe jembatan



dengan jumlah populasi terbesar di wilayah DKI Jakarta. Momen-rotasi dengan efek beban siklik (PEER/ATC 72-1) dihitung dengan memodifikasi parameter kurva backbone monotonik dari XTRACT untuk melihat daktilitas struktural. *Non Linear Time History Analysis* (NLTHA) dilakukan pada MIDAS Civil untuk mendapatkan respon jembatan.

Penelitian ini menggunakan perpindahan (*drift*) sebagai *Engineering Demand Parameter* (EDP) yang terjadi pada komponen jembatan pier yang berperilaku sebagai *Earthquake Resisting Element* (ERE). Analisis kerentanan jembatan eksisting dikembangkan secara lebih holistik sesuai variabilitas material berdasarkan data aktual material di Indonesia untuk penentuan ketidakpastian kapasitas struktur β_c . Dari hasil analisis, potensi keruntuhan (*collapse*) yang terjadi pada Jembatan Era sebelum 1990 adalah pada Peak Surface Acceleration (PSA) = 0.93 g. Struktur tersebut masuk dalam kategori kinerja *Life Safety* dan diidentifikasi mengalami kerusakan dalam tingkatan sedang, akibat beban gempa berdasarkan peta kegempaan wilayah Jakarta pada tahun 2017.

Setiati & Guntorojati (2020) meninjau lokasi-lokasi jembatan dengan pier kolom pendek pada ruas Jembatan Cawang-Tanjung Priuk, salah satu contoh lokasi pier pada ditunjukkan pada gambar lokasi Pier 231 dengan tinggi bersih 4.9 m dan dimensi terluar kolom oktagon 2.75 m, sehingga aspek rasio kolom jembatan tersebut sebesar 1.78. Penelitian tersebut juga menunjukkan mitigasi seismik yang dilakukan terbatas pada perilaku struktur dengan asumsi mekanisme keruntuhan lentur. Gambar 11 menunjukkan kondisi dan data Pier 231 serta kurva fragilitas dari jembatan tol Cawang-Tanjung Priuk.

6. Tantangan dan Arah Penelitian Lanjutan

Tinjauan literatur terkini yang telah dilakukan memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai risiko seismik yang dihadapi oleh jembatan dengan kolom pendek khususnya yang berpotensi mengalami mekanisme keruntuhan geser dan lentur-geser. Berikut ini merupakan ringkasan dari tinjauan literatur terkini yang telah disampaikan pada bagian sebelumnya:

Tabel 2. Ringkasan dari tinjauan literatur terkini

Aspek yang dikaji	Ringkasan Tinjauan Terkini (<i>State-of-the-Art</i>)	Referensi
Tingkat kerentanan seismik pada jembatan dengan kolom pendek	Kolom dengan mekanisme keruntuhan geser-lentur memiliki tingkat kerentanan seismik yang lebih tinggi dibandingkan kolom dengan mekanisme lentur saja Jembatan panjang dengan pier / kolom pendek memiliki risiko kegagalan geser yang lebih tinggi, sehingga memerlukan tindakan retrofitting untuk mencapai tingkat keandalan minimal yang disyaratkan	(Opabola & Mangalathu, 2023) (Simon & Vigh, 2016)
Perilaku keruntuhan geser pada kolom beton bertulang	Penggunaan peraturan terkini AASHTO LRFD 2020 untuk perhitungan tahanan geser menghasilkan prediksi yang konservatif (<i>lower-bound value</i>) Model trilinear dengan pendekatan softened strut-and-tie mampu untuk memprediksi perilaku dan hubungan gaya lateral – deformasi pada kolom pendek beton bertulang yang mengalami kegagalan geser.	(Massa, dkk., 2022) (Li & Hwang, 2017)
Model analisis untuk kolom jembatan pendek	Model analitis komposit untuk kolom beton bertulang yang terdiri atas beberapa model nonlinear dengan elemen serat (<i>fiber element</i>) dan pegas (<i>springs</i>) mampu mensimulasikan secara memadai perilaku nonlinier akibat mekanisme keruntuhan lentur dan lentur-geser. Model ini dikembangkan dan diimplementasikan pada software OpenSEES Model elemen hingga nonlinier menggunakan VecTor2 mampu memprediksi respons histeresis dari kolom jembatan akibat beban siklik.	(Leborgne & Ghannoum, 2014) (Witarto, 2013) (Massa, dkk., 2022)
Kurva Kerentanan Seismik untuk Jembatan Eksisting di Indonesia	Metodologi umum yang dapat digunakan untuk menilai risiko seismik pada jembatan eksisting menggunakan prosedur analisis dinamik nonlinier dan penilaian kerentanan seismictelah dilakukan untuk beberapa studi kasus jembatan eksisting yang berada di Indonesia Salah satu contoh evaluasi kerentanan seismik pada jembatan eksisting di Indonesia misalnya yang dilakukan pada ruas Jembatan Cawang-Tanjung Priuk terbatas pada perilaku struktur dengan asumsi mekanisme keruntuhan lentur	(Cripstyani dkk. 2019) (Silitonga & Imran, 2019) (Simanjuntak, et al., 2023) (Setiati & Guntorojati, 2020)

Penelitian terkait kerentanan seismik pada jembatan beton bertulang eksisting dengan kolom pendek masih menghadapi berbagai tantangan dan kekosongan penelitian. Tantangan dan rumusan masalah utama meliputi:

- Ketidakpastian kinerja seismik pada struktur jembatan eksisting dengan kolom pendek yang direncanakan berdasarkan peraturan kegempaan terdahulu.
- Keterbatasan model analitis dan numerik yang belum sepenuhnya mampu menggambarkan perilaku non-linier dari struktur jembatan kolom pendek, khususnya yang berpotensi mengalami mekanisme keruntuhan lentur-geser dan geser kritis.
- Keterbatasan data eksperimental yang relevan yang dapat digunakan untuk memvalidasi model perilaku non-linier pada jembatan dengan kolom pendek.
- Kekurangsesuaian kurva kerentanan jembatan yang telah dikembangkan sebelumnya, khususnya pada beberapa penelitian di Indonesia yang mengasumsikan mekanisme keruntuhan lentur murni dan tidak relevan ketika diterapkan pada jembatan dengan kolom pendek

Upaya penelitian lanjutan diperlukan untuk menjawab tantangan dan kekosongan penelitian yang telah diidentifikasi sebelumnya. Arah penelitian lanjutan perlu direncanakan dan dilakukan dengan terintegrasi dan

setidaknya terdiri atas beberapa metodologi di bawah ini :

- Studi literatur lanjutan dan pengumpulan data lebih detil mengenai perilaku kolom pendek misalnya dari sumber data yang relevan seperti yang tersedia di *Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Structural Performance Database*. Data-data jembatan eksisting di Indonesia yang direncanakan dengan peraturan terdahulu dan berpotensi mengalami keruntuhan geser-lentur atau geser murni juga dapat digunakan sebagai studi kasus.
- Analisis parameter dengan metode non-linier *incremental dynamic analysis* (IDA), yang dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak baik yang open source seperti OpenSees atau perangkat lunak komersil lainnya. Analisis ini mampu mengkonfirmasi model perilaku kolom pendek yang relevan dan mengembangkan kurva kerentanan yang sesuai.
- Pengujian eksperimental pada spesimen kolom pendek, baik dengan beban siklik maupun pseudodynamic, dengan variabel utama berupa aspek rasio kolom dan detail penulangan berdasarkan peraturan terdahulu khususnya peraturan di Indonesia atau standard nasional yang relevan. Data dari pengujian ini, seperti gaya, perpindahan, dan regangan, akan dianalisis untuk memvalidasi model numerik dan kurva kerentanan yang dikembangkan. Metode

pengujian yang dilakukan dapat menggunakan pengujian dengan beban siklik, maupun pengujian dengan beban pseudo-dinamik.

7. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari tinjauan literatur terkini dan usulan metodologi yang telah disampaikan sebelumnya adalah sebagai berikut:

1. Studi tinjauan terkini terhadap kerentanan seismik jembatan beton bertulang eksisting dengan kolom pendek yang telah dilakukan telah mengidentifikasi kekosongan dalam literatur terkait perilaku jembatan dengan kolom pendek yang berpotensi mengalami mekanisme keruntuhan geser dan lentur-geser, hal ini juga sangat relevan untuk infrastruktur jembatan eksisting di Indonesia yang direncanakan dengan peraturan terdahulu.
2. Pendekatan yang saat ini umum digunakan untuk mengevaluasi kerentanan seismik jembatan dan mengembangkan kurva kerentanan masih belum sepenuhnya sesuai untuk diterapkan pada jembatan dengan kolom pendek. Asumsi perilaku keruntuhan lentur murni yang banyak digunakan dalam penelitian sebelumnya tidak dapat menggambarkan dengan baik mekanisme keruntuhan geser atau kombinasi lentur-geser yang sering terjadi pada kolom pendek. Selain itu, keterbatasan model analitis dan numerik dalam menggambarkan perilaku non-linier, serta minimnya data eksperimental yang relevan untuk memvalidasi model-model tersebut, menimbulkan ketidakpastian dalam mengevaluasi risiko seismik pada jembatan eksisting yang direncanakan dengan peraturan terdahulu.
3. Studi ini mengusulkan arah penelitian lanjutan yang terintegrasi dan mencakup studi literatur, analisis numerik, pengujian eksperimental yang bertujuan mengembangkan kurva kerentanan seismik yang lebih sesuai. Metodologi yang diusulkan perlu mengembangkan model perilaku kolom pendek yang mampu menggambarkan dengan akurat mekanisme keruntuhan geser-lentur dan geser kritis. Selain itu, diperlukan validasi menggunakan data empiris yang diperoleh dari hasil pengujian eksperimental untuk memastikan keakuratan model dan kurva kerentanan yang dikembangkan.
4. Usulan penelitian yang disampaikan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam memahami risiko seismik jembatan eksisting dengan kolom pendek. Hasil dari penelitian tersebut dapat menjadi dasar dalam pengembangan peraturan peta gempa berbasis risiko untuk jembatan yang akan menjadi instrumen penting dalam pengambilan keputusan terkait infrastruktur dan kebijakan publik.

Daftar Pustaka

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020). *LRFD Bridge Design Specifications*.

American Society of Civil Engineers (ASCE). (2017). *ASCE/SEI, 41-17, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*.

Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2016). *Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa, Standar Nasional Indonesia SNI 2833:2016*.

Buckle, Ian and Hwang, S.J. *Bridge Performance in the 921 Earthquake Chi-Chi Taiwan*. Proceedings of the 15th US-Japan Bridge Engineering Workshop, Tsukuba, Japan, November 1999.

Cripstyani, M., Monteiro, R., Perdomo, C. (2019). *Seismic Risk Assessment For Structural Upgrading of RC Bridges In Indonesia*. Proceeding of the Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics (SECED) Conference, London, 9-10th September 2019.

LeBorgne, M.R., Ghannoum, W.M. (2014). *Calibrated analytical element for lateral-strength degradation of reinforced concrete columns*. Engineering Structures 81, 35–48.

Li, Y.-A., Hwang, S.-J. (2017). *Prediction of Lateral Load Displacement Curves for Reinforced Concrete Short Columns Failed in Shear*. J. Struct. Eng. 143, 04016164.

Massa, R.J., Cook, W.D., Mitchell, D. (2022). *Predicting the Influence of Shear on the Seismic Response of Bridge Columns*. Applied Sciences 12, 10910.

Massa, R.J., Shemy, O., Cook, W.D., Mitchell, D. (2022). *Shear Strength of Short Rectangular Bridge Columns*. J. Bridge Eng. 27, 04021110.

Mitchell, D., Tinawi, R., Sexsmith, R.G. (1991). *Performance of bridges in the 1989 Loma Prieta earthquake – lessons for Canadian designers*. Can. J. Civ. Eng. 18, 711–734.

National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE). (2022). *Reconnaissance Report on Seismic Damage Caused by Guanshan Earthquake and Chihshang Earthquake, Taiwan, 2022*.

Nugroho, W.O., Sagara, A., Imran, I. (2022). *The evolution of Indonesian seismic and concrete building codes: From the past to the present*. Structures 41, 1092–1108.

Opabola, E.A., Mangalathu, S. (2023). *Seismic fragility assessment of bridges with as-built and retrofitted splice-deficient columns*. Bull Earthquake Eng 21, 583–603.

Pacific Earthquake Engineering Research Center & Applied Technology Council. (2010). *PEER / ATC 72-1 Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings*.

- Sezen, H., Moehle, J.P. (2004). *Shear Strength Model for Lightly Reinforced Concrete Columns*. J. Struct. Eng. 130, 1692–1703.
- Setiati, N.R., Guntorojati, I. (2020). *Earthquake hazard mitigation analysis of the pier 231 Harbour Road Bridge*. E3S Web Conf. 156, 05001.
- Silitonga, D.R., Imran, I. (2019). *Penilaian Kerentanan Seismik pada Jembatan Box Girder Beton Prategang Menerus Bentang Majemuk Eksisting melalui Pengembangan Kurva Fragilitas Analitik*. Jurnal Teknik Sipil 26(1):47.
- Simanjuntak, V.C., Imran, I., Moestopo, M., Setio, H.D., (2023). *The Evolution of Seismic Design Provisions in Indonesia's National Bridge Code*. J. Eng. Technol. Sci. 54, 220614.
- Simanjuntak, V.C., Imran, I., Moestopo, M., Setio, H.D., (2023). *The development of the seismic fragility curves of existing bridges in Indonesia (Case study: DKI Jakarta)*. Structural Monitoring and Maintenance 10.
- Simon, J., Vigh, L.G., (2016). *Seismic fragility assessment of integral precast multi-span bridges in areas of moderate seismicity*. Bull Earthquake Eng 14, 3125–3150.
- US Department of Transportation Federal Highway Administration (FHWA). (2004). *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures*. Publication no. FHWA-HRT-05-067.
- Vamvatsikos, D., Cornell, C.A. (2002). *Incremental dynamic analysis*, Earthq Engng Struct Dyn 31, 491–514. Wang, P.-H., Chang, K.-C., Cheng, W.-C., 2023. *Deteriorated Hysteresis Behaviors of Reinforced Concrete Bridge Columns*, ACI Structural Journal 120(2).
- Witarto, W. (2013). *Analytical Models for Seismic Assessment of Reinforced Concrete Bridge Pier*. MS Thesis, National Taiwan University.

