

Perbandingan Metode Penskalaan Amplitudo dan Pencocokan Spektral terhadap Respons Non-Linear Jembatan Terisolasi dengan LRB: Studi Dampak pada Perilaku Histeresis dan Potensi Akumulasi Kerusakan LRB

Dinda Imas Nurdhyanti

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
E-mail: dindanurdhyanti@gmail.com

Herlien Dwiarti Setio

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, E-mail: herlien@itb.ac.id

Abstrak

Analisis Riwayat Waktu Non-Linear (NLTHA) merupakan metode yang efektif untuk merepresentasikan respons struktural akibat beban gempa secara akurat. Dalam analisis NLTHA, pemilihan metode modifikasi gerak tanah memiliki peran yang krusial, dimana secara umum terdapat dua metode yaitu penskalaan amplitudo dan pencocokan spektral. Data gerak tanah yang akan di modifikasi didapatkan berdasarkan hasil analisis deagregasi untuk wilayah Jakarta dengan periode ulang 1000 tahun. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan dampak pemilihan kedua metode modifikasi gerak tanah terhadap potensi kerusakan elemen non-linear berupa Lead Rubber Bearing (LRB) pada struktur berupa jembatan terisolasi seismik. Untuk tujuan ini, tujuh pasang rekaman gerak tanah diolah dengan penskalaan amplitudo yang mengacu pada standar NZS 1170.5-2004, sedangkan pencocokan spektral dilakukan menggunakan perangkat lunak SeismoMatch. Intensitas Arias (IA) merepresentasikan total energi input gempa yang terserap ke dalam sistem struktur, sehingga dari kedua metode akan dilakukan pengecekan terhadap IA. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa metode pencocokan spektral mencapai kecocokan yang superior terhadap target spektrum. Namun, metode ini mengubah profil akumulasi energi gempa rekaman gerak tanah asli, mengindikasikan terjadinya modifikasi distribusi energi input. Sebaliknya, penskalaan amplitudo berhasil mempertahankan IA yang identik dengan rekaman gerak tanah asli. IA berkorelasi kuat dengan potensi kerusakan kumulatif dan disipasi energi histeresis, sehingga penskalaan amplitudo dinilai lebih relevan untuk memprediksi akumulasi kerusakan LRB.

Kata-kata Kunci: *Jembatan Terisolasi, LRB, Pencocokan Spektral, Penskalaan Amplitudo, Perilaku Histeresis, Intensitas Arias, Respons Non-Linear.*

Abstract

Nonlinear Time History Analysis (NLTHA) is an effective method for accurately representing structural response under seismic loading. In NLTHA, the selection of ground motion modification methods plays a crucial role, with two primary approaches commonly employed: amplitude scaling and spectral matching. The ground motion data to be modified were obtained based on deaggregation analysis for the Jakarta region with a 1000-year return period. This study aims to compare the impact of selecting these two ground motion modification methods on the potential damage of nonlinear elements, specifically Lead Rubber Bearing (LRB), in seismically isolated bridge structures. For this purpose, seven pairs of ground motion records were processed using amplitude scaling following the NZS 1170.5-2004 standard, while spectral matching was performed using SeismoMatch software. Arias Intensity (IA) represents the total seismic input energy absorbed into the structural system; therefore, IA was evaluated for both modification methods. The research results demonstrate that the spectral matching method achieves superior agreement with the target spectrum. However, this method alters the energy accumulation profile of the original ground motion records, indicating modification of the input energy distribution. Conversely, amplitude scaling successfully maintains IA identical to that of the original ground motion records. IA strongly correlates with cumulative damage potential and hysteretic energy dissipation; therefore, amplitude scaling is considered more relevant for predicting LRB damage accumulation.

Keywords: *Isolated Bridge, LRB, Spectral Matching, Amplitude Scaling, Hysteretic Behavior, Arias Intensity, Non-Linear Response.*

* Penulis Korespondensi: dindanurdhyanti@gmail.com

1. Pendahuluan

Selama dua dekade terakhir, studi pascagempa di Indonesia menunjukkan variasi signifikan pada tingkat kerusakan infrastruktur transportasi. Kegagalan jembatan secara khusus dapat berdampak substansial terhadap fungsionalitas kota setelah gempa bumi (Amirsadari dkk, 2019). Untuk memitigasi dampak kerusakan pada jembatan saat terjadi gempa, berbagai desain dan teknologi mitigasi seismik telah dikembangkan, salah satunya adalah penerapan sistem isolasi seismik. Isolasi seismik secara fundamental berbeda dari pendekatan desain seismik konvensional, dimana sistem ini bertujuan untuk mengurangi transmisi percepatan horizontal ke substruktur dengan memperpanjang periode getar alami struktur dan mendisipasi energi seismik melalui mekanisme redaman histeresis (Park dkk, 2002). Pada jembatan terisolasi, perangkat isolator menggantikan perletakan jembatan konvensional. Bantalan ini berfungsi melindungi substruktur dengan membatasi transmisi percepatan horizontal serta mendisipasi energi seismik melalui mekanisme redaman.

Di antara berbagai jenis sistem isolator untuk struktur jembatan, *Lead Rubber Bearing* (LRB) adalah pilihan yang saat ini cukup populer. Untuk mengevaluasi performa jembatan yang menggunakan LRB secara akurat, khususnya di wilayah dengan aktivitas seismik tinggi seperti Jakarta, diperlukan pemilihan metode analisis yang tepat. Dalam konteks ini, Analisis Riwayat Waktu Non-Linear atau *Non-Linear Time History Analysis* (NLTHA) merupakan instrumen yang tepat. Keunggulan NLTHA dibandingkan analisis statik non-linear terletak pada kemampuannya untuk secara akurat merepresentasikan perilaku histeresis aktual dari LRB untuk memprediksi respons non-linear struktur secara komprehensif (Imran dkk, 2021).

NLTHA memerlukan penggunaan serangkaian rekaman gerak tanah untuk mengevaluasi respons struktural secara dinamis. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman mendalam tentang dampak pemilihan dan pengolahan gerak tanah terhadap respons jembatan terisolasi seismik. Standar desain seperti ASCE 7-10 memberikan panduan terkait jumlah rekaman yang diperlukan, mengizinkan penggunaan minimal tiga atau tujuh pasang, baik melalui metode penskalaan amplitudo maupun pencocokan spektral (Vemuri dan Kollaru, 2020; Pant dan Maharjan, 2016).

Pemilihan dan pengolahan rekaman gerak tanah menjadi semakin penting ketika mempertimbangkan disipasi energi dan potensi kerusakan kumulatif. Energi histeresis yang terdisipasi oleh elemen struktural merupakan parameter respons yang

berkorelasi kuat dengan kerusakan struktural kumulatif (Fajfar, 2021). Mengingat bahwa proses pengolahan rekaman gerak tanah memungkinkan terjadinya modifikasi karakteristik energi input, untuk mempertahankan integritas akumulasi energi rekaman gerak tanah asli yang dipilih, diperlukan pengecekan Intensitas Arias (IA) untuk merepresentasikan secara akurat bagaimana energi input hasil pengolahan dari kedua metode akan disalurkan dan didisipasi secara histeresis oleh elemen LRB, sehingga dapat memprediksi potensi akumulasi kerusakan yang realistik pada struktur.

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Li dkk. (2020) gerak tanah yang diproses dengan penskalaan amplitudo menghasilkan estimasi yang tidak bias untuk rata-rata faktor amplifikasi gerak tanah (GMAFs). Di sisi lain, pencocokan spektra memperkenalkan bias yang meningkat secara signifikan ketika variabilitas parameter tanah diperhitungkan. Hal ini menunjukkan metode penskalaan amplitudo lebih dapat diandalkan untuk estimasi GMAFs yang akurat, terutama dalam kondisi di mana variabilitas parameter tanah menjadi faktor krusial.

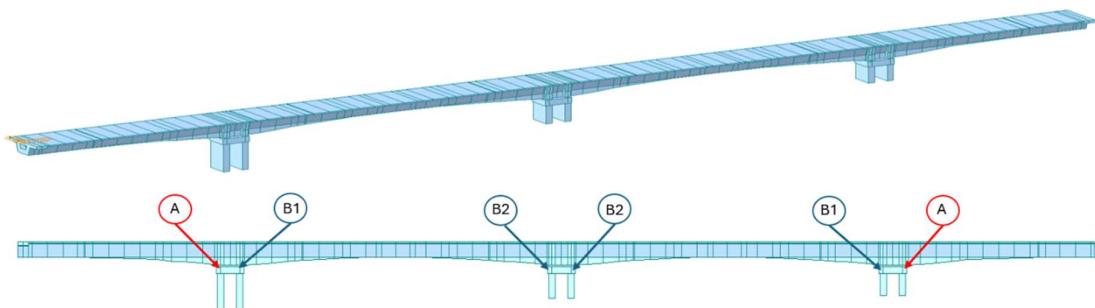
Pentingnya pengolahan gerak tanah gempa untuk analisis respons struktur non-linear masih diiringi dengan kebutuhan signifikan untuk memahami secara lebih mendalam bagaimana perbedaan fundamental antara metode penskalaan amplitudo dan pencocokan spektral memengaruhi representasi karakteristik gempa. Secara khusus, belum banyak studi yang secara komprehensif menganalisis dampak perbedaan profil akumulasi IA yang dihasilkan oleh kedua metode terhadap perilaku histeresis LRB dan potensi akumulasi kerusakan pada jembatan terisolasi.

2. Desain Struktur

2.1. Deskripsi struktur

Dalam penelitian ini, objek studi adalah struktur jembatan bentang kontinu yang dilengkapi dengan sistem isolasi seismik berupa LRB. Jembatan ini dimodelkan untuk lokasi Jakarta, dengan kondisi tanah sedang (SD). Struktur memiliki panjang total bentang 205 meter dan menggunakan deck berupa *box girder* beton dengan variasi ketinggian 2,5 meter hingga 3,7 meter.

Untuk analisis struktur, digunakan perangkat lunak MIDAS Civil 2022, yang memiliki kapabilitas untuk melakukan NLTHA terhadap performa jembatan terisolasi seismik. Pemodelan struktur terdiri dari tiga bentang *box girder* menerus yang didukung oleh tiga pier beton tipe *double-blade* dengan LRB – A, LRB – B1 dan LRB – B2 yang dimodelkan dengan non-linear elemen berupa *general link* dan untuk abutment digunakan tipe jepit atau fixed pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Model Jembatan dan Perletakan LRB

Tabel 1. Spesifikasi LRB

Spesifikasi	Satuan	
LRB – A		
Diameter	670	mm
Kapasitas Aksial	4000	kN
Fy	212	kN
Dbd	162	mm
K1	13600	kN/m
K2	2100	kN/m
Keff	3200	kN/m
LRB – B1 ; B2		
Diameter	920	mm
Kapasitas Aksial	7500	kN
Fy	409	kN
Dbd	203	mm
K1	20700	kN/m
K2	3200	kN/m
Keff	4900	kN/m

Pemodelan LRB

Elemen LRB dalam penelitian ini berfungsi sebagai alat isolasi seismik sekaligus perangkat disipasi energi. Secara struktural, LRB tersusun dari lapisan-lapisan elastometer karet yang direkatkan pada pelat baja, dengan sebuah inti timbal silinder yang terpusat di tengahnya untuk menyediakan redaman histeresis tambahan. Perilaku non-linear dari LRB dapat diidealisasikan dan direpresentasikan secara visual sebagai kurva bilinear, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**.

Tujuan dari penggunaan LRB pada jembatan adalah untuk mengoptimasi deformasi struktur dan gaya gempa yang masuk kedalam elemen struktur agar tetap berada pada kondisi kerusakan yang terkendali

melalui pergeseran periode dan peningkatan redaman (Caltrans, 2019).

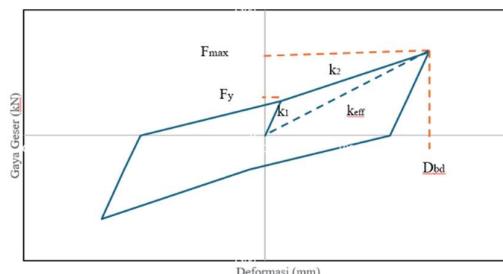
Penentuan properti LRB secara spesifik dilakukan dengan mengevaluasi gaya aksial yang akan diterima kolom di bawah kondisi servis; mencakup beban permanen, beban mati tambahan dan beban hidup nominal yang diperkirakan akan diterima jembatan selama operasional normal.

Dari pemodelan yang telah dilakukan dengan MIDAS Civil, dihasilkan gaya aksial pada masing-masing pier yang menjadi acuan utama dalam penentuan kapasitas LRB berdasarkan spesifikasi dari brosur produk “*OVM - Seismic Mitigation and Isolation Products for Bridge Structure*”. Detail kapasitas LRB yang telah ditentukan dapat dilihat pada **Tabel 1**.

3. Pengolahan Gerak Tanah

3.1. Pemilihan Rekaman Gerak Tanah

Berdasarkan SNI 2833:2016, respons spektra yang kompatibel dengan riwayat waktu harus digunakan berdasarkan rekaman gempa yang mewakili.



Gambar 1. Kurva Bilinear LRB

Kriteria pemilihan meliputi lingkungan tektonik, magnitudo, dan jarak didasarkan pada hasil deagregasi. Kriteria-kriteria tersebut menurut Bozorgnia dkk. (2009) dan ASCE 7-16 dapat direlaksasi dikarenakan keterbatasan basis data yang ada dan pengutamaan kecocokan bentuk spektra dalam pemilihan rekaman gerakan tanah (Asrurifak, 2021). Respon spektra rekaman gerak tanah yang terpilih dari hasil analisis deagregasi ditunjukkan pada **Gambar 3**.

3.2. Metode Pencocokan Spektral

Pencocokan spektral adalah proses memodifikasi gerakan tanah asli agar respons akselerasi spektral yang dihasilkan sesuai dengan spektrum respons yang ditargetkan. Tujuannya adalah untuk mengurangi puncak spektral yang terlalu tinggi atau rendah dari gerakan tanah asli, sambil tetap menjaga karakteristik nonstasioner dari riwayat waktu gerakan tanah aslinya (Atik dan Abrahamson, 2010).

Proses ini biasanya memerlukan beberapa iterasi untuk mencapai konvergensi yang bisa diterima antara spektra respons percepatan dari riwayat waktu gempa dengan target spektrum (SNI 8899:2020). Target spektrum dibuat berdasarkan spektrum desain SNI 2833:2016 untuk periode ulang jembatan 1000 tahun. Dalam penelitian ini, digunakan perangkat lunak SeismoMatch untuk melakukan pencocokan spektral. Hasil rata-rata pencocokan spektral ditampilkan pada **Tabel 2** dan **Gambar 4**.

3.3. Metode Penskalaan Amplitudo

Dalam prosedur penskalaan amplitudo, spektrum arah-maksimum harus dibuat untuk setiap pasang gerak tanah dengan menggunakan dua komponen

gerak horizontal. Setiap pasang gerak tanah harus diskalakan menggunakan faktor skala yang sama untuk kedua komponen horizontal.

Nilai faktor skala yang digunakan harus berada dalam batasan dimana gerak tanah terskala yang dihasilkan masih cukup merepresentasikan karakteristik gerak tanah aktual secara memadai (SNI 8899:2020). Dalam penelitian ini digunakan langkah-langkah metode penskalaan dari NZS 1170.5-2004 dengan target periode adalah $0.4 T_{eff}$ hingga $1.5 T_{eff}$, dimana T_{eff} adalah periode efektif struktur. Nilai faktor skala berupa k_1 dengan syarat $0.33 < k_1 < 3$.

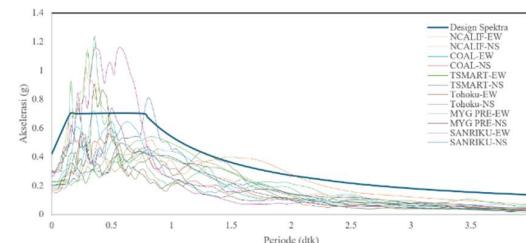
Bagian penting dari proses penskalaan ini adalah kriteria " $D_1 \leq (\log 1.5)$ ". Kriteria ini memastikan bahwa rekaman gerak tanah yang dipilih dapat memberikan keakuratan yang memadai terhadap target spektrum dalam rentang periode yang dituju, seperti yang dijelaskan lebih lanjut pada **Persamaan (1)**.

$$D_1 = \sqrt{\frac{1}{(1.5-0.4)T_1} \int_{0.4T}^{1.5T} \left[\log \left(\frac{k_1 SA_{comp}}{SA_{target}} \right) \right]^2 dT} \quad (1)$$

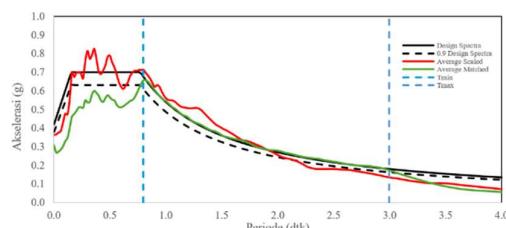
$$\leq \log(1.5)$$

dimana: T_1 = periode efektif struktur (detik), k_1 = faktor skala, SA_{comp} = percepatan gerak tanah asli (g), SA_{target} = percepatan gerak tanah target hasil dari spektra desain (g) menurut SNI 2833:2016. Hasil rata-rata penskalaan amplitudo ditampilkan pada **Tabel 2** dan **Gambar 4**.

Berdasarkan **Gambar 4**, ditunjukkan bahwa metode pencocokan spektral secara signifikan lebih efektif dalam mencapai kecocokan yang presisi dengan target spektrum, terutama dalam rentang periode jembatan terisolasi. Kontras ini menggarisbawahi keunggulan teknis pencocokan spektra dalam memenuhi kriteria kesesuaian target spektrum. Namun, presisi spektrum yang tinggi ini perlu dipertimbangkan bersamaan dengan dampak potensialnya pada distorsi profil IA, yang berkaitan terhadap perilaku histeresis dan potensi akumulasi kerusakan pada LRB.



Gambar 3. Tujuh pasang rekaman gerak tanah terpilih hasil degradasi



Gambar 4. Nilai rata-rata metode pencocokan spektral dan penskalaan amplitudo

4. Intensitas Arias

Intensitas Arias (IA) adalah parameter intensitas gempa bumi yang dikembangkan oleh Arturo Arias (1970) sebagai ukuran energi total yang disalurkan oleh guncangan tanah ke sistem struktur. IA dianggap sebagai ukuran total energi yang tersedia dari suatu gerak tanah untuk didisipasi oleh struktur.

IA didefinisikan sebagai integral kuadrat dari riwayat waktu percepatan tanah absolut selama durasi guncangan gempa yang ditunjukkan pada **Persamaan (2)**.

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} [a_g(t)]^2 dt \quad (2)$$

dimana: I_a = intensitas arias (m/s), g = kecepatan gravitasi (9.81 m/s^2), $a_g(t)$ = riwayat waktu percepatan tanah absolut pada waktu t , t_d = durasi total rekaman.

Salah satu keunggulan utama IA terletak pada korelasinya yang kuat dengan kerusakan kumulatif elemen struktural akibat beban gempa. Kerusakan kumulatif merupakan proses degradasi progresif yang terjadi pada struktur akibat siklus pembebahan berulang selama durasi gempa, yang mengakibatkan penurunan bertahap sifat-sifat material seperti kekakuan, kekuatan, dan kapasitas daktilitas.

Berbeda dengan parameter puncak (PGA) yang hanya menangkap intensitas sesaat, IA mengintegrasikan seluruh riwayat energi gempa yang harus didisipasi oleh struktur. Semakin tinggi nilai IA, semakin besar akumulasi energi yang diserap struktur, yang berkorelasi langsung dengan tingkat kerusakan kumulatif yang akan terjadi.

Karakteristik tersebut menjadikan IA sebagai indikator yang lebih komprehensif dan realistik untuk memprediksi potensi kerusakan struktural dibandingkan hanya mengandalkan PGA, karena IA mencerminkan total energi destruktif yang dialami struktur selama kejadian gempa.

Dalam struktur dengan elemen non-linear, seperti jembatan terisolasi dengan LRB, energi gempa terdisipasi melalui mekanisme histeresis. Luas area di dalam setiap siklus histeresis pada kurva gaya-deformasi merepresentasikan energi yang terdisipasi pada siklus tersebut. Berdasarkan prinsip konservasi energi, total energi histeresis yang didisipasi sepanjang durasi gempa harus seimbang dengan energi input yang disalurkan oleh gerak tanah ke dalam sistem struktur. Oleh karena itu, IA memberikan indikasi kuantitas energi input yang harus didisipasi oleh struktur melalui perilaku histeresis pada elemen non-linear.

Penelitian ini melakukan analisis perbandingan kumulatif IA antara gerak tanah asli dengan hasil modifikasi menggunakan dua metode berbeda: penskalaan amplitudo dan pencocokan spektral. Tujuh pasang rekaman gerak tanah diolah dengan kedua metode tersebut, kemudian nilai IA kumulatif dari masing-masing metode dibandingkan terhadap IA gerak tanah asli untuk mengevaluasi tingkat perubahan yang terjadi. Pengolahan data dan analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB.

Tabel 2. Hasil pengolahan gerak tanah dengan metode pencocokan spektral dan penskalaan amplitudo

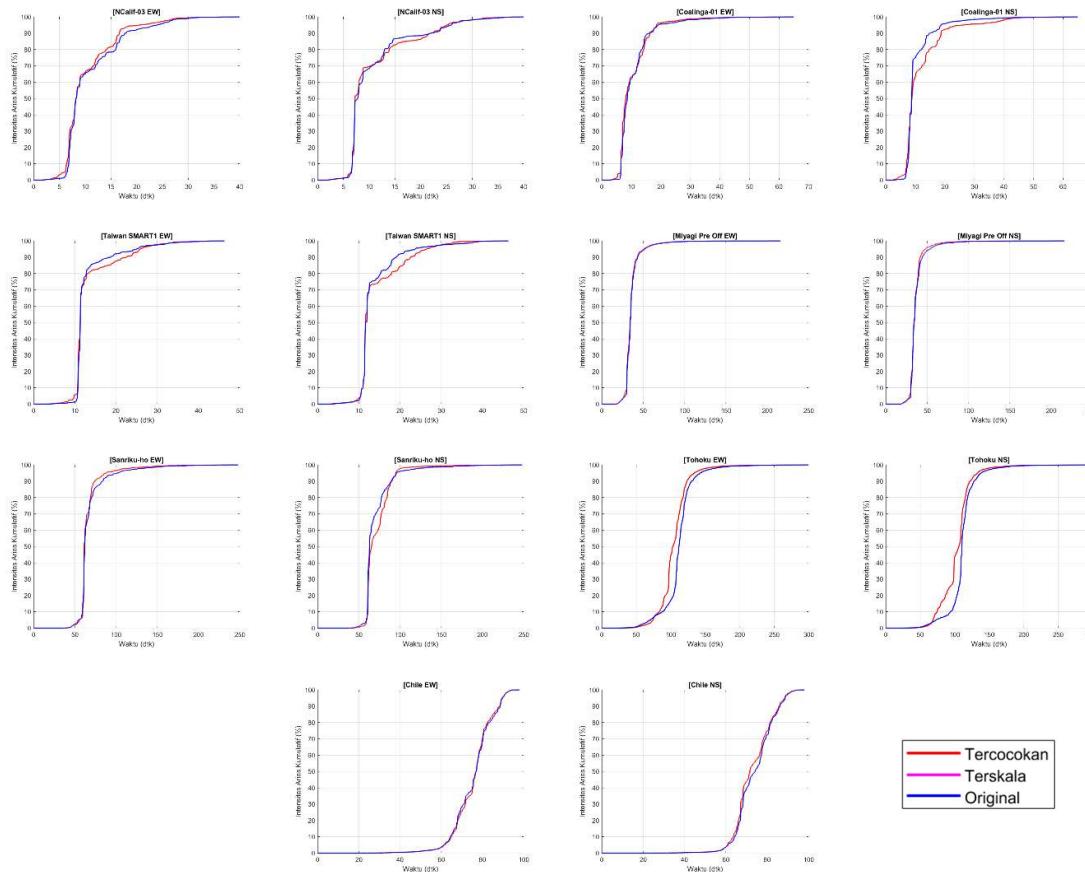
Mekanisme	Gempa	Magnitudo	Jarak (km)	Arah	Pencocokan Spektral		Penskalaan amplitudo	
					PGA (g)	Iterasi	PGA (g)	SF
Shallow Crustal	Northern Calif-03 (1954)	6.5	27.02	EW	0.20	6	0.17	1.02
				NS	0.27	8	0.21	
				EW	0.29	8	0.40	1.75
	Coalinga-01 (1983)	6.36	24.02	NS	0.31	12	0.51	
				EW	0.22	7	0.28	1.26
				NS	0.29	10	0.28	
Benioff	Taiwan SMART1 (1986)	6.32	60.08	EW	0.19	19	0.25	1.39
				NS	0.19	17	0.31	
	Miyagi_Pre Off (2011)	7.15	102.76	EW	0.29	10	0.44	1.50
				NS	0.33	7	0.49	
Sanriku-ho	(1994)	7.76	130.54	EW	0.29	10	0.44	1.50
				NS	0.33	7	0.49	

Tabel 2. Hasil pengolahan gerak tanah dengan metode pencocokan spektral dan penskalaan amplitudo (Lanjutan)

Mekanisme	Gempa	Magnitudo	Jarak (km)	Arah	Pencocokan Spektral		Penskalaan amplitudo	
					PGA (g)	Iterasi	PGA (g)	SF
Megathrust	Tohoku (2011)	8.81	150.42	EW	0.28	9	0.40	1.75
				NS	0.22	8	0.31	
	Chile (2010)	9.12	185.10	EW	0.32	7	0.40	1.26
				NS	0.34	10	0.41	

Berdasarkan hasil pengecekan IA untuk masing-masing tujuh pasang gerak tanah yang didapatkan dari metode pencocokan spektral dan penskalaan amplitudo pada **Gambar 5**, dapat dilihat bahwa hasil kurva kumulatif IA dari metode penskalaan amplitudo memiliki bentuk yang identik dengan rekaman gerak tanah aslinya, menandakan tidak adanya perubahan energi input setelah proses

penskalaan. Namun dari proses pencocokan spektral, terjadi perbedaan dengan grafik kumulatif IA gerak tanah asli, sehingga diketahui terjadinya perubahan energi input selama proses pencocokan akibat algoritma pencocokan spektra yang secara iteratif memodifikasi riwayat waktu percepatan gerak tanah untuk mencapai kecocokan spektral yang presisi dengan target spektrum.



Gambar 5. Kurva analisis intensitas arias kumulatif untuk tujuh pasang gerak tanah

5. Hasil Analisis Riwayat Waktu Non-Linear (NLTHA)

Bab ini menyajikan hasil dari analisis riwayat waktu non-linear (NLTHA) yang dilakukan untuk mengevaluasi kinerja seismik jembatan dengan isolasi seismik berupa LRB di bawah pengaruh rekaman gerak tanah yang telah dimodifikasi. Pembahasan berfokus pada perbandingan antara hasil yang diperoleh dari gerak tanah yang diolah menggunakan metode penskalaan amplitudo dan pencocokan spektral. Hasil yang disajikan mencakup respons deformasi dan gaya geser pada LRB di kedua arah (longitudinal dan transversal) dalam bentuk kurva histeresis, serta analisis profil kumulatif IA untuk mengevaluasi dampak kedua metode modifikasi terhadap distribusi energi input sepanjang durasi gempa.

Dalam penelitian ini, evaluasi kinerja LRB dengan NLTHA menggunakan dua skenario pembebahan gempa. Pendekatan ini dirancang untuk menguji respons jembatan dan kapasitas LRB di bawah berbagai kombinasi eksitasi gempa pada arah longitudinal dan transversal. Skenario pertama (EQ1) melibatkan penerapan rekaman gerak tanah *East-West* (EW) pada arah longitudinal jembatan, dan rekaman gerak tanah *North-South* (NS) pada arah transversal jembatan. Sebaliknya, skenario kedua (EQ2) dibentuk dengan menukar penempatan rekaman gerak tanah tersebut, yaitu rekaman *North-South* (NS) diterapkan pada arah longitudinal jembatan, sementara rekaman *East-West* (EW) diterapkan pada arah transversal jembatan. Implementasi kedua skenario arah gempa ini memungkinkan analisis komprehensif terhadap respons LRB dan memastikan elemen LRB tetap berada dalam kapasitasnya meskipun jembatan terekspos pola pembebahan gempa yang bervariasi.

Gambar 6 untuk LRB – A dan **Gambar 7** untuk LRB – B2 memberikan gambaran visual mengenai perilaku non-linear elemen disajikan dengan kurva histeresis ketujuh rekaman gerak tanah, yang di-plot bersama dengan kurva kapasitas LRB. Dari hasil deformasi maksimum LRB pada kedua skenario yang diakibatkan oleh tujuh rekaman gerak tanah

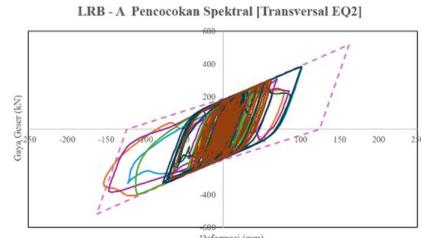
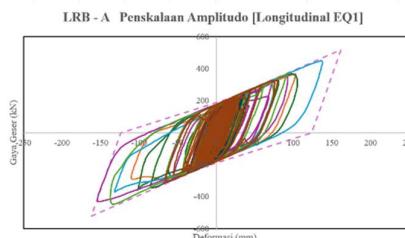
hasil NLTHA dengan masing-masing metode pengolahan gerak tanah, dapat dikonfirmasi bahwa pada dua skenario pembebahan gempa untuk respons deformasi maksimum arah transversal dan longitudinal, rata-rata yang dicapai masih berada dibawah batas deformasi desain LRB.

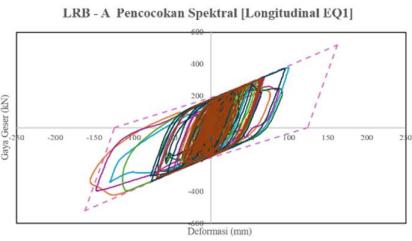
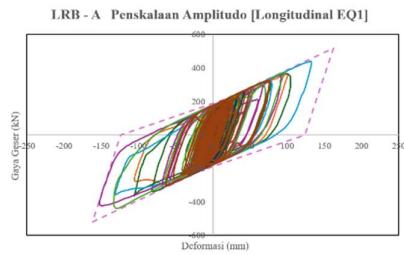
Untuk menganalisis pengaruh kedua metode pengolahan gerak tanah, gempa Tohoku dan Miyagi Pre-Off dipilih sebagai ilustrasi. Untuk gempa Tohoku pada **Gambar 8** menunjukkan perbedaan IA paling signifikan antara pencocokan spektral dan penskalaan amplitudo terhadap rekaman asli, yang disebabkan oleh durasi gempa yang panjang sehingga proses pencocokan spektral mengubah distribusi energi secara substansial. Perubahan profil kumulatif IA ini berkorelasi langsung dengan respons deformasi yang lebih besar pada kurva histeresis dan tercermin dari perbedaan bentuk riwayat waktu serta respons spektral.

Sebaliknya, berdasarkan **Gambar 9** untuk gempa Miyagi Pre-Off menunjukkan hasil yang lebih baik untuk kedua metode pengolahan gerak tanah. Profil kumulatif IA dari pencocokan spektral relatif mirip dengan penskalaan amplitudo dan rekaman asli, menghasilkan kurva histeresis dengan respons gaya geser dan deformasi yang relatif serupa.

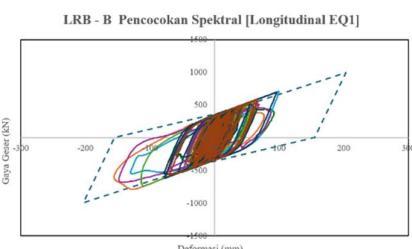
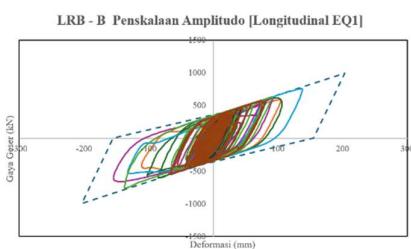
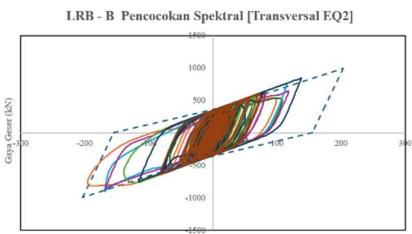
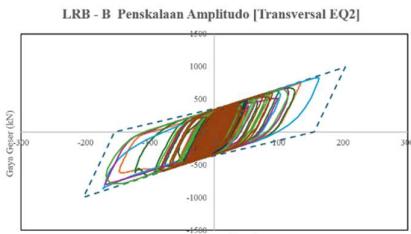
Nilai rata-rata respons deformasi dan gaya geser dari tujuh rekaman gerakan tanah hasil NLTHA untuk LRB – A, LRB – B1, dan LRB – B2 dirangkum dalam **Tabel 3** dan **Tabel 4**. Hasil menunjukkan bahwa deformasi (DY, DZ) dan gaya geser (SY, SZ) pada LRB yang diperoleh dari metode pencocokan spektral secara konsisten lebih besar dari penskalaan amplitudo, dengan rentang selisih persentase antara 2.02% hingga 9.92%.

Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa metode pengolahan gerak tanah memiliki dampak signifikan terhadap pembentukan kurva histeresis serta besarnya respons deformasi dan gaya geser dalam analisis. Dengan demikian, penting untuk memastikan bahwa proses modifikasi gerak tanah tidak mendistorsi energi input dari rekaman asli guna menjaga akurasi prediksi perilaku histeresis dan akumulasi kerusakan pada LRB.

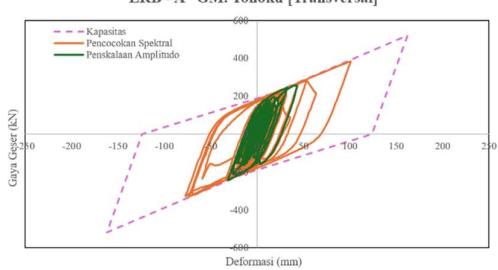
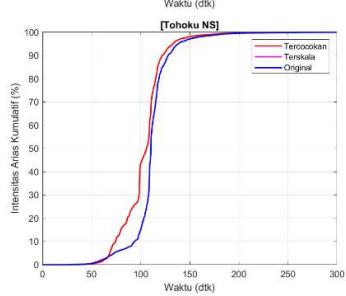
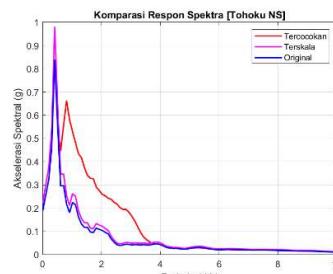
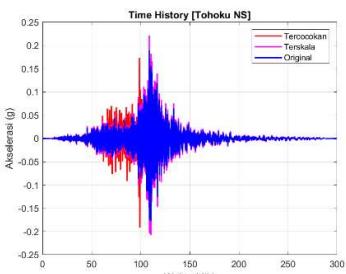




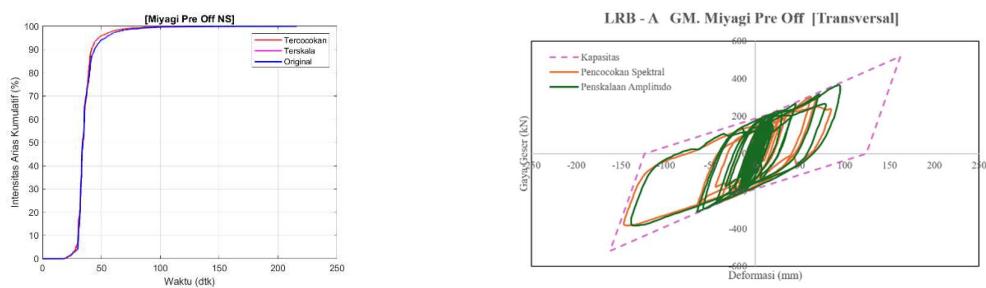
Gambar 6. Kurva histeresis LRB – A



Gambar 6. Kurva histeresis LRB – B2 (Lanjutan)



Gambar 7. Pengaruh intensitas arias kumulatif terhadap gempa Tohoku



Gambar 8. Pengaruh intensitas arias kumulatif terhadap gempa Miyagi Pre Off

Tabel 3. Respons deformasi rata-rata hasil NLTHA

Deformasi Arah Transversal		
LRB	PS* (mm)	PA* (mm)
EQ1		
A	94.02	67.39
B1	96.22	69.03
B2	119.15	84.00
EQ 2		
A	-106.00	-96.10
B1	-108.94	-99.05
B2	-135.34	-130.38
Deformasi Arah Longitudinal		
LRB	PS* (mm)	PA* (mm)
EQ1		
A	-109.06	-104.92
B1	-108.29	-104.55
B2	-109.61	-105.87
EQ2		
A	100.53	72.24
B1	100.35	71.61
B2	101.37	72.91

dimana: PS^* = Pencocokan Spektral, PA^* = Penskalaan Amplitudo

Tabel 4. Respons gaya geser rata-rata hasil NLTHA

Gaya Geser Arah Transversal		
LRB	PS* (kN)	PA* (kN)
EQ1		
A	354.25	284.50
B1	667.02	506.30

Tabel 4. Respons gaya geser rata-rata hasil NLTHA (Lanjutan)

B2	743.83	565.19
EQ 2		
A	-344.90	346.28
B1	-647.53	605.52
B2	-762.25	-687.10
Gaya Geser Arah Longitudinal		
LRB	PS* (kN)	PA* (kN)
EQ1		
A	-355.06	354.74
B1	-645.13	610.13
B2	-638.87	607.56
EQ2		
A	369.33	298.28
B1	678.02	513.86
B2	660.51	-479.39

Berdasarkan **Tabel 3** dan **Tabel 4**, teridentifikasi bahwa respons maksimum untuk deformasi dan gaya geser arah longitudinal jembatan didominasi oleh skenario gempa EQ1. Sementara itu, untuk deformasi dan gaya geser arah transversal jembatan, respons maksimum ditunjukkan oleh skenario

gempa EQ2.

Untuk rekapitulasi selisih dari respons maksimum deformasi dan gaya geser untuk kedua metode pengolahan gerak tanah ditunjukkan pada **Tabel 5** dan **Tabel 6**.

Tabel 5. Respons deformasi maksimum

Deformasi Maksimum Arah Transversal			
LRB	PS* (mm)	PA* (mm)	Selisih (%)
A	-106.00	-96.10	10.30%
B1	-108.94	-99.05	9.98%
B2	-135.34	-130.38	3.80%
Deformasi Maksimum Arah Longitudinal			
LRB	PS* (mm)	PA* (mm)	Selisih (%)
A	-109.06	-104.92	3.95%
B1	-108.29	-104.55	3.58%
B2	-109.61	-105.87	3.53%

Tabel 6. Respons gaya geser maksimum

Gaya Geser Maksimum Arah Transversal			
LRB	PS* (kN)	PA* (kN)	Selisih (%)
A	-344.90	346.28	0.40

Tabel 4. Respons gaya geser maksimum (Lanjutan)

B1	-647.53	605.52	6.94
B2	-762.25	-687.10	10.94
Gaya Geser Maksimum Arah Longitudinal			
LRB	PS* (kN)	PA* (kN)	Selisih (%)
A	-355.06	354.74	0.09
B1	-645.13	610.13	5.74
B2	-638.87	607.56	5.15

Meskipun demikian, pada respons deformasi dan gaya geser di luar respons maksimum pada **Tabel 3** dan **Tabel 4**, teramati adanya selisih yang cukup signifikan pada respons rata-rata deformasi dan gaya geser arah transversal untuk skenario EQ1, serta arah longitudinal untuk skenario EQ2.

Perbedaan respons tersebut terjadi karena Pencocokan Spektra melakukan modifikasi ekstensif pada rekaman gempa untuk mencapai target spektrum. Proses ini mengubah distribusi energi dan dapat mengubah kandungan frekuensi pada riwayat waktu gempa asli, sehingga secara tidak langsung memodifikasi karakteristik energi total gempa.

Sebagai konsekuensinya, rekaman gempa yang dimodifikasi oleh Pencocokan Spektra dapat menghasilkan respons rata-rata dan selisih yang lebih besar ketika diaplikasikan pada struktur jembatan untuk arah transversal dan longitudinal pada skenario EQ1 dan EQ2. Hal ini menegaskan bahwa Penskalaan Amplitudo, mampu mempertahankan profil energi total dari gempa asli serta menghasilkan nilai deformasi dan gaya geser yang lebih stabil dan konservatif namun masih dalam kapasitas desain dari isolator.

Sehingga penting untuk mendapatkan respons perilaku struktur akibat gempa yang sebenarnya, karena respons berupa deformasi dan gaya geser rata-rata dapat mencerminkan efek kumulatif dan disipasi energi sepanjang durasi gempa pada LRB.

6. Kesimpulan dan Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan untuk membandingkan dampak pemilihan kedua metode modifikasi gerak tanah terhadap potensi kerusakan elemen non-linear berupa LRB pada jembatan terisolasi, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Kedua metode, baik penskalaan amplitudo maupun pencocokan spektral, menunjukkan keberhasilan dalam pengolahan gerak tanah yang didukung oleh pemilihan rekaman berdasarkan analisis deagregasi dan kesesuaian dengan target spektrum.

2. Pencocokan spektral menunjukkan keunggulan dalam mencapai kecocokan presisi dengan target spektrum. Namun, dalam metode ini ditemukan memodifikasi profil akumulasi Intensitas Arias (IA) gerak tanah asli, sehingga mengindikasikan perubahan dalam distribusi energi.
3. Sebaliknya, penskalaan amplitudo mempertahankan profil IA yang identik dengan gerak tanah asli, menegaskan kemampuannya mempertahankan karakteristik energi gempa.
4. Hasil analisis NLTHA menunjukkan gerak tanah hasil pencocokan spektral secara konsisten menghasilkan nilai maksimum deformasi dan gaya geser pada LRB yang lebih besar dengan selisih 0.04% hingga 10.94% dibandingkan penskalaan amplitudo. Peningkatan respons ini dikaitkan dengan optimalisasi distribusi energi pencocokan untuk mencapai target spektrum.
5. Meskipun Pencocokan Spektra menawarkan efisiensi dan akurasi yang lebih tinggi terhadap target spektrum, potensi modifikasi profil energi gempa oleh metode ini memerlukan pertimbangan kritis.
6. Mengingat bahwa IA berkorelasi dengan potensi kerusakan kumulatif dan disipasi energi histeresis, metode penskalaan amplitudo dinilai lebih relevan untuk memprediksi akumulasi kerusakan aktual pada LRB karena kemampuannya dalam mempertahankan karakteristik energi input dari gerak tanah asli.
7. Dari penelitian yang telah dilakukan, evaluasi kumulatif IA pada gerak tanah yang telah dimodifikasi mampu memberikan perkiraan awal perubahan energi input untuk setiap metode terhadap gerak tanah asli.
8. Ditemukan adanya selisih pada respons rata-rata deformasi dan gaya geser yang terjadi di luar respons maksimal disebabkan oleh pencocokan spektral saat melakukan modifikasi untuk mencapai target spektral dengan mengubah distribusi energi, sehingga menghilangkan atau menambahkan kandungan frekuensi pada

gempa asli saat diaplikasikan menjadi nilai input riwayat waktu untuk analisis NLTHA.

Daftar Pustaka

- Amirsardari, A. Sofi, M., Lumantarna, E., Imran, I., dan Duffield, C. 2019, Impact of Earthquakes on the Transportation Infrastructure of Indonesia: A Preliminary Study, *Civil Engineering Dimension*, Vol. 21, No.1, 19-28.
- Atik, L., dan Abrahamson, N. 2010, An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching, *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No.3, 601-617.
- California Department of Transportation. 2019, Seismic Design Of Ordinary Bridges With Isolation Bearings, *Memo To Designers, Caltrans* 20-22.
- Fajfar, P., 2021, *The Story of the N2 Method*, International Association for Earthquake Engineering (IAEE).
- Imran, I., Hamidah, M., Suprobo, P., dkk. 2023, Design and Construction of Elevated Multispan Bridge Structure for Light Rail Transit in Jakarta, Indonesia, *Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE*, Vol. 28, No.1, 05022007 1-18.
- Li, B., Lu, Y., Pandey, M., dkk. 2020, Evaluation Of Amplitude-Scaled And Spectrum-Matched Motions To Estimate Ground-Motion Amplification Factors, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 18, 4659-4679.
- NZS 1170.5 – 2004, Structural Design Actions Part 5: Earthquake actions – New Zealand.
- Pant, D., dan Maharjan, M. 2016, On Selection and Scaling Of Ground Motions for Analysis of Seismically Isolated Structures, *Earthquake Engineering And Engineering Vibration*, Vol.15, No.4, 633-648.
- Park, K., Jung, H., dan Lee, I. 2002, A Comparative Study on Aseismic Performances of Base Isolation Systems for Multi-Span Continuous Bridge, *Engineering Structures*, Vol. 24, 1001-1013.
- SNI 2833-2016, Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa.
- SNI 8899-2020, Tata Cara Pemilihan Dan Modifikasi Gerak Tanah Permukaan Untuk Perencanaan Gedung Tahan Gempa.
- Vemuri, J., dan Kolluru, S. 2020, Evaluation of Ground Motion Scaling Techniques, *Advances in Computer Methods and Geomechanics*, Lecture Notes in Civil Engineering 55, Springer.