

ANALISIS PENGARUH *LEAD RUBBER BEARING* TERHADAP KINERJA PILAR KONVENSIONAL PADA STRUKTUR JEMBATAN *HIGHWAY* ORTOTROPIK DENGAN *NON LINEAR TIME HISTORY ANALYSIS*

Mohammad Akbar Alrasyidi^{1*}, Moh Fadhlán Rosyidi¹, Kohar Yudoprasetyo¹, Patma Al Munawaroh¹, dan Adinda Dwi Novita Angraini¹

¹ Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

* akbaralrasyidi@its.ac.id

Abstrak: Pilar beton bertulang konvensional (*cast in situ*) masih banyak digunakan pada jembatan dan jalan layang di Indonesia karena konstruksinya sederhana, material dan tenaga kerja tersedia, serta fleksibel terhadap variasi geometri sehingga efisien dari sisi waktu dan biaya. Namun, Indonesia berada di wilayah seismik aktif sehingga struktur pilar berpotensi menjadi elemen kritis saat gempa akibat menerima gaya lateral besar dan mengalami plastifikasi yang memusatkan kerusakan, meningkatkan kebutuhan perbaikan, dan mengganggu layanan. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas *Lead Rubber Bearing* (LRB) untuk meningkatkan kinerja seismik pilar pada jembatan *highway* ortotropik, mengidentifikasi komponen pendisipasi energi dominan, serta menilai respons pilar pada gempa rencana. Dua konfigurasi dibandingkan, yaitu tanpa LRB dan dengan LRB. Struktur dirancang sesuai ketentuan pembebanan dan gempa yang berlaku, lalu dianalisis menggunakan *Response Spectrum Analysis* (RSA) dan *Non Linear Time History Analysis* (NLTHA) dengan tujuh rekaman gempa pada level gempa rencana periode ulang 1000 tahun. Hasil menunjukkan LRB menyebabkan pergeseran periode (*period shift*) sehingga menurunkan respons inersia global, ditandai berkurangnya gaya dalam, *base shear*, dan reaksi perletakan. Analisis nonlinier juga menunjukkan struktur dengan LRB cenderung menjaga pilar tetap elastis, sedangkan struktur tanpa LRB menunjukkan pilar lebih rentan leleh akibat perubahan periode, peningkatan redaman efektif, dan perubahan tuntutan respons pada sistem perletakan.

Kata Kunci: *Lead Rubber Bearing*, *Non Linear Time History Analysis*, *Response Spectrum Analysis*, Pilar Konvensional (*Cast In Situ*), Jembatan *Highway* Ortotropik

Abstract: Conventional reinforced concrete bridge piers (*cast in situ*) are still widely used in bridges and elevated highways in Indonesia due to their relatively simple construction, adequate availability of materials and labor, and adaptability to geometric variations, which support time and cost efficiency in accelerated infrastructure development. However, Indonesia is located in a highly seismic region, making bridge piers potentially critical structural elements during earthquakes, as they are subjected to large lateral forces and may undergo plastic deformation that concentrates damage, increases repair demands, and disrupts serviceability. This study evaluates the effectiveness of *Lead Rubber Bearing* (LRB) in enhancing the seismic performance of piers in orthotropic highway bridges, identifies the dominant energy-dissipating components, and assesses pier responses under design-level earthquakes. Two structural configurations are compared: one without LRB and one with LRB. The structures are designed in accordance with applicable loading and seismic provisions and analyzed using *Response Spectrum Analysis* (RSA) and *Non Linear Time History Analysis* (NLTHA) with seven ground motion records corresponding to a design earthquake with a 1,000-year return period. The results show that the use of LRB induces a period shift that reduces global inertial responses, as indicated by decreases in internal forces, base shear, and bearing reactions. *Non Linear* analysis further indicates that structures equipped with LRB tend to maintain the piers in an elastic response range, whereas structures without LRB exhibit a higher tendency toward yielding due to changes in natural period, increased effective damping, and altered seismic demand on the bearing system.

Keywords: *Lead Rubber Bearing*, *Non Linear Time History Analysis*, *Response Spectrum Analysis*, Conventional Pier (*Cast In Situ*), Orthotropic Highway Bridge

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di Indonesia dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan peningkatan untuk memperkuat konektivitas antarwilayah serta mendukung mobilitas masyarakat dan distribusi logistik. Kondisi ini mendorong kebutuhan pelaksanaan konstruksi yang efisien dari sisi waktu dan biaya. Namun, percepatan pelaksanaan berpotensi memunculkan keterlambatan proyek dan ketidakterkendalian biaya apabila faktor manajemen pelaksanaan tidak ditangani secara memadai, sehingga capaian kinerja layanan infrastruktur dapat terdampak (Rauzana & Dharma, 2022).

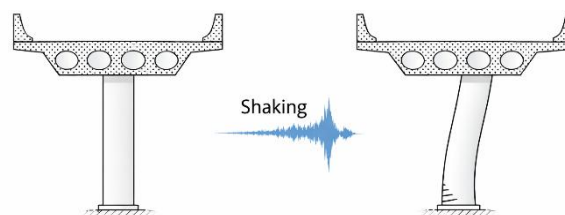
Selain tantangan pelaksanaan, Indonesia berada pada wilayah seismik aktif sehingga infrastruktur jembatan harus dirancang dengan ketahanan yang memadai terhadap beban gempa. Tingkat aktivitas seismik yang tinggi menunjukkan bahwa gempa merupakan beban ekstrem yang *realistis* terjadi dan dapat berdampak langsung pada keberlangsungan layanan. Oleh karena itu, ketahanan seismik perlu menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan dan evaluasi jembatan untuk menjaga fungsi layanan pascagempa (Supendi dkk., 2020).

Sejalan dengan kebutuhan efisiensi, jembatan *highway* dengan superstruktur baja dan dek ortotropik semakin banyak diterapkan karena menawarkan struktur yang relatif ringan dan efisien. Meskipun demikian, karakteristik massa dan kekakuan pada sistem dek ortotropik dapat memengaruhi respons dinamik struktur, sehingga evaluasi kinerja seismik tetap diperlukan agar efisiensi struktural tidak menurunkan keandalan sistem pada kondisi pembebanan ekstrem (Sun dkk., 2024).

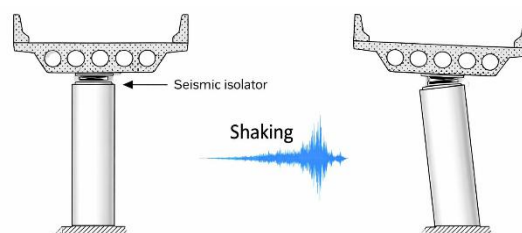
Terlepas dari pengembangan pada superstruktur, respons seismik jembatan sangat dipengaruhi oleh struktur bawah. Pilar sebagai elemen utama struktur bawah menyalurkan beban vertikal dari superstruktur ke fondasi sekaligus menahan gaya lateral akibat gempa, sehingga berperan penting dalam menjaga stabilitas dan tingkat layanan jembatan. Kerentanan sistem jembatan terhadap gempa banyak ditentukan oleh kinerja pilar karena kerusakan pilar dapat mengendalikan tingkat kerusakan global pascagempa (Xiang dkk., 2020).

Dalam praktik konstruksi, pilar beton bertulang konvensional (*cast in situ*) masih dominan digunakan karena konstruktabilitasnya baik, fleksibel terhadap variasi geometri dan kondisi lapangan, serta tidak menuntut logistik prefabrikasi yang kompleks. Namun, dibanding pendekatan percepatan konstruksi, misalnya prefabrikasi (*Accelerated Bridge Construction*), metode *cast in situ* cenderung membutuhkan durasi pekerjaan lapangan lebih panjang dan lebih sensitif terhadap kondisi pelaksanaan, sehingga pengendalian mutu dan keselamatan kerja menjadi lebih kritis (Kenarkoohi & Hassan, 2024).

Pada sistem jembatan tanpa isolasi, mekanisme disipasi energi gempa umumnya bergantung pada daktilitas pilar melalui pembentukan sendi plastis. Mekanisme ini mampu menyerap energi secara efektif. Namun, pada gempa kuat mekanisme ini dapat meningkatkan tuntutan deformasi lokal sehingga potensi kerusakan pada pilar ikut membesar. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi nonlinier untuk merepresentasikan perilaku pilar dari kondisi elastis hingga inelastis secara lebih realistis, sekaligus mengidentifikasi potensi terjadinya leleh pada elemen kritis (Pang dkk., 2022).

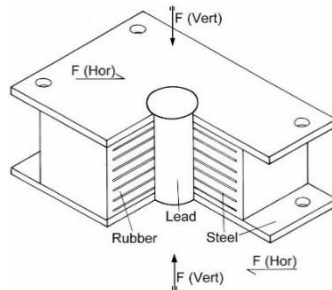


Gambar 1. Deformasi Jembatan Konvensional Tanpa *Base Isolator* Akibat Gempa (MCEER, 2006)



Gambar 2. Deformasi Jembatan Konvensional Dengan *Base Isolator* Akibat Gempa (MCEER, 2006)

Penerapan *seismic isolation* pada tumpuan seperti *Lead Rubber Bearing* (LRB) banyak digunakan sebagai alternatif untuk menurunkan tuntutan gaya dan deformasi pada pilar tanpa mengubah konfigurasi pilar secara mendasar. Hasil *Non Linear Time History Analysis* (NLTHA) pada jembatan terisolasi menunjukkan bahwa LRB mampu menurunkan respons gaya, termasuk *base shear* dan reaksi seismik pada pilar, melalui disipasi energi histeretik serta perubahan karakteristik dinamik sistem. Namun, penerapan LRB juga dapat meningkatkan perpindahan pada isolator dan dek, sehingga verifikasi batas deformasi isolator menjadi aspek penting, terutama pada gempa dekat sumber (Baig dkk., 2022).



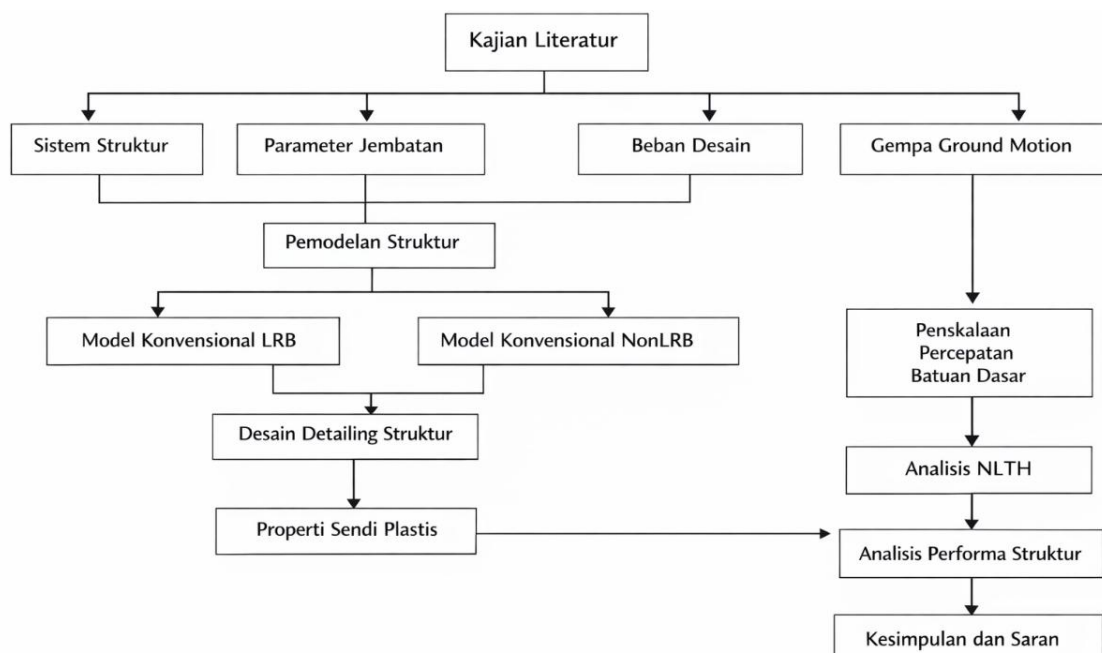
Gambar 3. Model LRB (*Science Learning Hub*, 2007)

Secara umum, penggunaan *Lead Rubber Bearing* (LRB) efektif dalam mengurangi tuntutan gaya pada struktur bawah serta meningkatkan kemungkinan pilar tetap berperilaku elastis saat terjadi gempa. Namun, penerapannya memerlukan evaluasi yang lebih menyeluruh terhadap deformasi isolator, percepatan dek, serta sensitivitas respons struktur terhadap karakteristik rekaman gempa dan parameter isolator. Sebaliknya, sistem tanpa LRB (Non-LRB) lebih sederhana dari sisi perangkat tumpuan, tetapi mekanisme disipasi energi lebih banyak terjadi pada pilar sehingga risiko plastifikasi dan potensi kerusakan pilar meningkat, terutama pada gempa dengan intensitas besar (Hassan & Billah, 2020).

Studi terkait *Lead Rubber Bearing* (LRB) pada umumnya mengevaluasi efektivitas isolasi pada tipologi jembatan tertentu, sedangkan kajian yang secara khusus meninjau kinerja pilar beton bertulang konvensional (*cast in situ*) pada jembatan *highway* dengan dek ortotropik menggunakan kombinasi *Response Spectrum Analysis* (RSA) dan *Nonlinear Time History Analysis* (NLTHA) dengan rekaman gempa yang telah diskalakan masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini secara khusus mengevaluasi pilar beton bertulang konvensional (*cast in situ*) pada jembatan *highway* ortotropik menggunakan kombinasi RSA dan NLTHA.

METODE

Pada penelitian ini dilakukan analisis perbandingan kinerja pilar konvensional pada struktur jembatan *highway* ortotropik antara kondisi LRB dan Non-LRB. Metode penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Diagram Alir Metode Penelitian

Metodologi penelitian diawali dengan kajian literatur untuk menetapkan sistem struktur jembatan, parameter geometri, properti material, serta beban rencana yang mengacu pada standar nasional serta penentuan karakteristik dan pemilihan rekaman gempa (*ground motion*) sebagai input analisis. Selanjutnya dilakukan pemodelan untuk merepresentasikan struktur jembatan *highway* dek ortotropik dengan substruktur pilar konvensional menggunakan perangkat lunak MIDAS Civil. Pemodelan dilakukan dengan memasukkan data geometri, material, dan pembebanan sesuai ketentuan perencanaan jembatan yang berlaku sehingga diperoleh model struktur yang merepresentasikan kondisi aktual. Model yang dikembangkan mencakup komponen struktur sebagai berikut:

1. Substruktur (pilar dan *pier head* monolitik): elemen utama yang memikul beban vertikal dan menahan gaya lateral, serta menyalurkan gaya ke fondasi.
2. Superstruktur (dek ortotropik dan *girder* pendukung): dimodelkan untuk menangkap massa, kekakuan global, dan mekanisme transfer gaya gempa dari superstruktur ke substruktur.
3. Sistem perletakan:
 - a. Model A (Non-LRB): menggunakan perletakan konvensional tanpa isolator.
 - b. Model B (LRB): menerapkan *Lead Rubber Bearing* pada titik-titik tumpuan sesuai konfigurasi struktur.

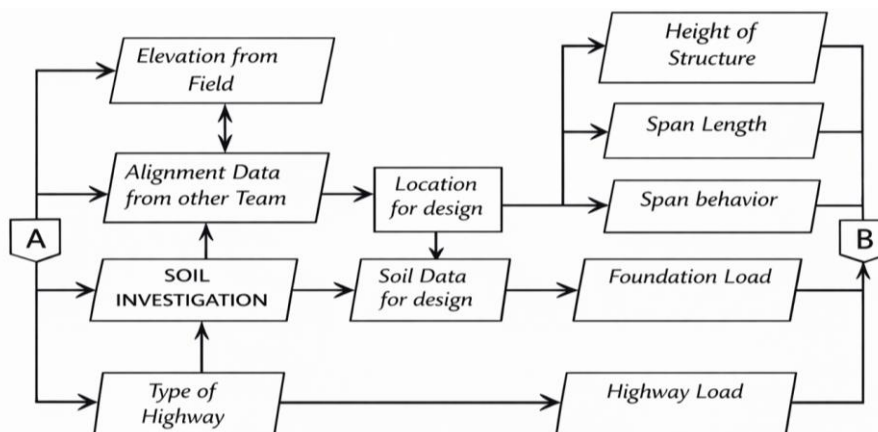
Setelah model terbentuk, verifikasi kapasitas penampang dilakukan untuk memastikan kelayakan elemen utama, yakni dengan MIDAS Civil untuk analisis *pier head* dan CSI COL untuk analisis pilar. Untuk merepresentasikan perilaku inelastik pilar, properti sendi plastis ditentukan melalui analisis hubungan momen–kurvatur menggunakan XTRACT. Hasil momen–kurvatur kemudian dikonversi menjadi kurva *backbone* hubungan momen–rotasi dan selanjutnya didefinisikan sebagai parameter nonlinier.

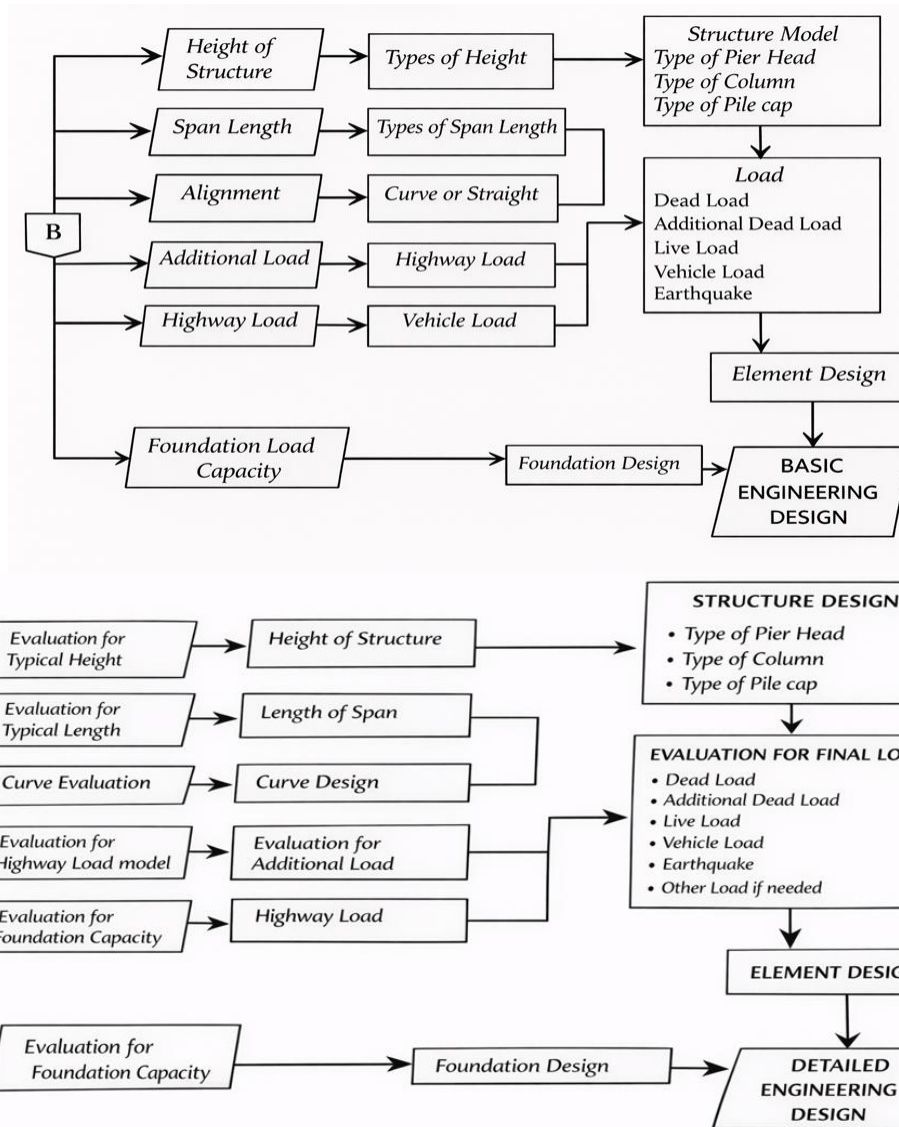
Evaluasi seismik dilakukan pada kedua variasi model (Non-LRB dan LRB) melalui dua tahapan analisis. Tahap pertama adalah *Analisis Respons Spektrum* (linier) sebagai kontrol awal untuk memperoleh gambaran respons global struktur dan distribusi gaya inersia. Tahap kedua adalah *Non Linear Time History Analysis* (NLTHA) untuk mengevaluasi respons struktur secara lebih realistis dari kondisi elastis hingga inelastis.

Rekaman akselerogram diperoleh dari basis data PEER, dipilih agar mewakili kondisi sumber gempa dan lokasi yang kemudian dilakukan penskalaan agar sesuai dengan target gempa rencana. Rekaman terdiskalakan selanjutnya dibebankan pada kedua model untuk memperoleh respons struktur. Output NLTHA yang dievaluasi meliputi:

1. Respons global struktur: *base shear*, simpangan puncak, dan *drift*.
2. Respons elemen pilar: momen, gaya geser, gaya aksial, serta indikasi pembentukan sendi plastis.
3. Khusus Model LRB: respons isolator meliputi perpindahan isolator, gaya geser isolator, dan karakteristik histeresis/disipasi energi.

Tahap berikutnya adalah analisis perbandingan kinerja antara model Non-LRB dan LRB untuk menilai efektivitas LRB dalam menurunkan *seismic demand* dan meningkatkan kinerja pilar konvensional. Perbandingan dilakukan melalui evaluasi respons struktur, evaluasi kinerja pilar, dan evaluasi kontribusi LRB. Tahap akhir adalah perumusan kesimpulan dan saran berdasarkan hasil perbandingan kinerja kedua model sesuai alur pada diagram. Kerangka *basic engineering design* yang digunakan dalam penentuan parameter pemodelan ditunjukkan pada **Gambar 5**.



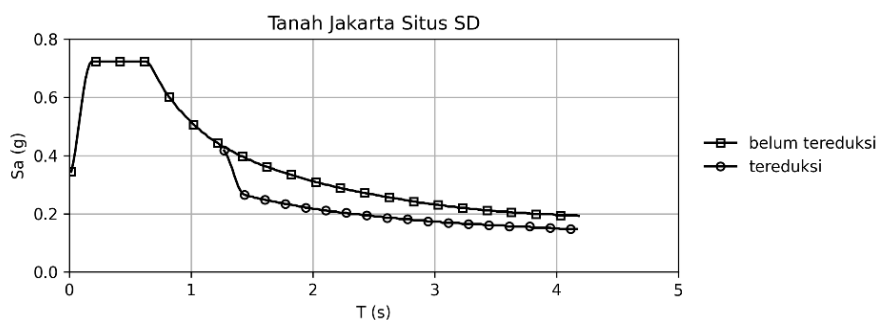


Gambar 5. Metode Simulasi Desain Konvensional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

I. Pemodelan Struktur Konvensional Non-LRB

Pemodelan dan evaluasi dilakukan untuk kondisi lokasi di Jakarta dengan klasifikasi tanah sedang sebagai dasar penentuan parameter gempa seperti Gambar 6.



Gambar 6. Respons Spektra Antara LRB dan Non-LRB

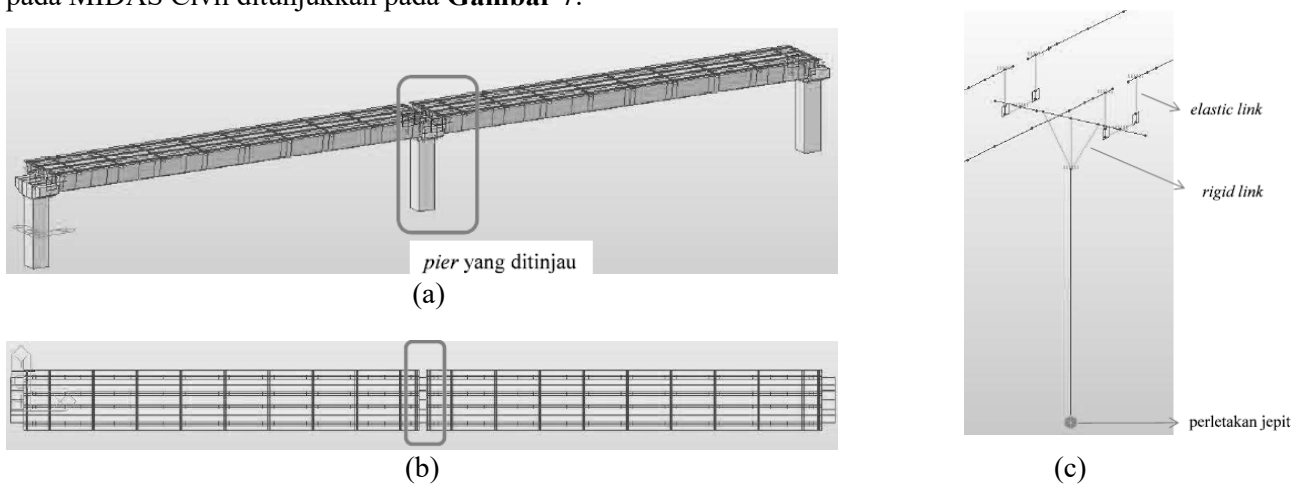
Struktur jembatan *highway* ortotropik dengan *pier* konvensional dimodelkan dalam bentuk 3D menggunakan MIDAS Civil dengan pendekatan elemen garis (*line element*). Komponen yang dimodelkan meliputi *U-shape girder*, *pier head*, dan *pier*. Sistem tumpuan yang digunakan adalah *simple span structure*.

Tabel 1. Data Rangkaian Struktur Jembatan

Data Pier	
Jenis	<i>Symmetrical</i>
Radius	<i>Straight</i>
Tinggi (m)	10
Bentang (m)	60
<i>Girder</i>	<i>U-Shape 3.05 m</i>
Kelas Situs	SD

Pier head dimodelkan sebagai elemen garis untuk merepresentasikan beban perletakan *girder* di sisi kanan dan kiri. Selanjutnya ditambahkan titik nodal baru yang kemudian dihubungkan menggunakan *elastic link* sehingga beban dapat tersalurkan ke elemen *pier head*. Elemen *link* tersebut merepresentasikan *rubber bearing* tipe *Base Isolator Lead Rubber Bearing* (LRB). Sementara itu, kondisi perletakan di bawah *pier* diasumsikan jepit (*fixed restraint*).

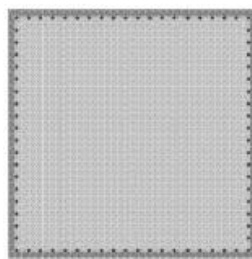
Terdapat *bearing* (perletakan) sebagai elemen penghubung antara superstruktur dan substruktur untuk menyalurkan beban serta mengakomodasi pergerakan struktur. Pada penelitian ini, *bearing* dipasang pada seluruh *pier* dengan jumlah empat buah pada setiap *pier*. Tampilan pemodelan struktur dan pemodelan *bearing* pada MIDAS Civil ditunjukkan pada **Gambar 7**.



Gambar 7. (a) Tampak 3D Pemodelan MIDAS Civil, (b) Tampak Atas Pemodelan MIDAS Civil, dan (c) Pemodelan *Bearing* Pada MIDAS Civil

Keberadaan *bearing* pada model direpresentasikan melalui *gap* karena elemen struktur tidak dimodelkan menerus pada titik perletakan. Pemutusan elemen ini diperlukan untuk menempatkan perletakan sebagai elemen penghubung pada sistem. Konsekuensinya, beban berat sendiri *girder* dan beban mati tambahan (SIDL) yang seharusnya bekerja sebagai beban terdistribusi di area tersebut tidak dimasukkan sebagai beban merata, melainkan dimodelkan sebagai beban terpusat pada titik di sekitar *gap*.

Selanjutnya, pilar konvensional untuk dua kondisi, yaitu tanpa isolator (Non-LRB) dan dengan isolator (LRB), didefinisikan pada daerah plastisnya untuk kebutuhan pemodelan dan evaluasi kinerja seismik. Penampang pilar ditunjukkan pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Penampang Konvensional Non-LRB dan LRB

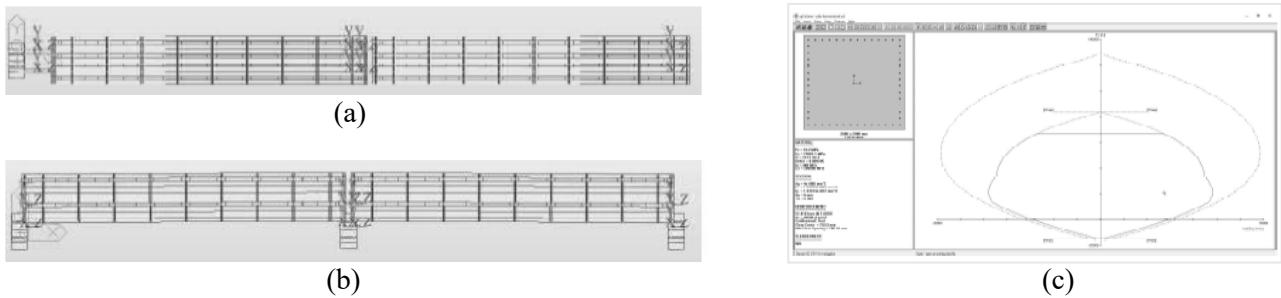
Secara umum, model tanpa isolator menggunakan penampang dan jumlah tulangan memanjang yang lebih besar dibanding model dengan isolator. Namun, detail pengekan pada zona plastis dibuat setara pada kedua

model agar perbandingan respons lebih merefleksikan pengaruh penggunaan isolator terhadap tuntutan pada pilar, bukan perbedaan detail pengekang. Properti penampang masing-masing model pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Properti Penampang

Tipe	Dimensi	Long. Bar	Confinement Lp Zone	
			X-Direction	X-Direction
Non-LRB	2500 x 2500	80D32	6D16-100	6D16-100
LRB	2000 x 2000	52D32	6D16-100	6D16-100

Selain itu, konfigurasi penulangan pilar dikontrol berdasarkan ketentuan spColumn, khususnya untuk memastikan jarak antar tulangan memenuhi persyaratan *detailing* yang digunakan dalam analisis.



Gambar 9. (a) Bentuk Struktur Mode 1 MIDAS Civil, (b) Bentuk Struktur Mode 2 MIDAS Civil, dan (c) Hasil Analisis Kolom Pada Program Bantu spColumn

II. Metode Penskalaan Gempa (NLTHA)

Beban gempa yang dievaluasi dalam penelitian ini terdiri dari tujuh rekaman *ground motion* yang dipilih dari kumpulan data FEMA P695, tanpa membedakan pengaruh gempa *far-field* maupun *near-field*. Analisis dilakukan dengan metode *Non Linear Time History Analysis* untuk menilai apakah respons struktur melampaui batas kinerja hingga potensi keruntuhan, sehingga rekaman gempa yang digunakan perlu diskalakan terhadap spektrum respons target sesuai tujuan studi. Spektrum target diasumsikan mewakili wilayah Jakarta dan dengan umur rencana ≥ 75 tahun serta probabilitas terlampaui 7% (periode ulang 1000 tahun).

Tabel 3. Data Gempa 1000 Tahun Yang Digunakan

No.	Catalog Code	Direction	Earthquake	Station	Mag	Earthquake Mechanism
1	ABY000	0	PEER	Landers	25	Amboy
	ABY090	90		Earthquake, 28 June 1992		
2	CNP106	106	PEER	Northridge	25	Canoga Park
	CNP196	196		Earthquake, 17 January 1994		
3	MEL090	90	PEER	Landers	74	Duarte – Mel Canyon Rd.
	MEL180	180		Earthquake, 28 June 1992		
4	SITKA090	90	PEER	Sitka, Alaska	111	Sitka Observatory
	SITKA180	180		Earthquake, 30 July 1972		
5	TCU089-N	0	PEER	Jiji Earthquake	180	TCU089
	TCU089-W	90		Taiwan, 20 September 1999		
6	TCU120-N	0	PEER	Jiji Earthquake	180	TCU120
	TCU120-W	90		Taiwan, 20 September 1999		
7	TCU136-N	0	PEER	Jiji Earthquake	225	TCU136
	TCU136-E	90		Taiwan, 20 September 1999		

Tabel 4. Faktor Skala Rekaman Gempa

No	Nama	Scale Factor	S	C
1	“Amboy”	2.0706	1.285862	2.662505
2	“Duarte – Mel Canyon Rd.”	9.7137	1.285862	12.49047
3	“Sitka Observatory”	6.0738	1.285862	7.810066
4	“TCU089”	7.4369	1.285862	7.810066
5	“TCU120”	6.3474	1.285862	9.562824
6	“TCU120”	6.3474	1.285862	9.161878
7	“TCU120”	6.3474	1.285862	9.161878
8	“TCU136”	8.0868	1.285862	10.39851
9	“Canoga Park – Topanga Can”	1.5265	1.285862	1.962868

Tabel 5. Kombinasi Arah Gempa

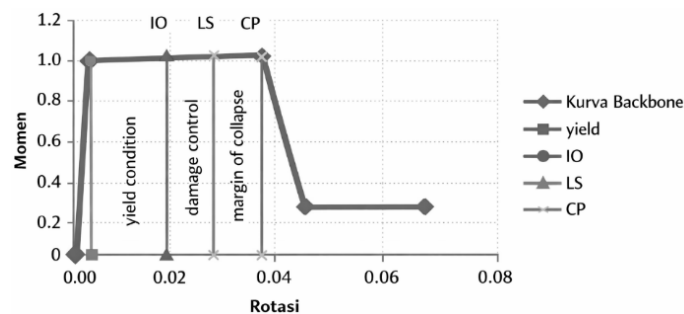
Kombinasi	Gempa	Minor	Metode Skala	Remarks
TH-1	X Dir (0°)	Y Dir (90°)	Scaling	0.2T – 1.5T
TH-2	Y Dir (90°)	Y Dir (0°)		T Structure

III. Nonlinier Properti

Properti nonlinier merepresentasikan perilaku penampang dan material penyusunnya pada kondisi nonlinier sebagai parameter kekuatan dan deformasi. Pada penelitian ini digunakan dua properti nonlinier pada pilar dan satu properti nonlinier pada LRB. Pemodelan nonlinier ini bertujuan menghasilkan respons struktur yang mendekati kondisi lapangan karena parameter dan perilaku elemen disusun realistis.

a. *Performance Point of Structures*

Kinerja struktur pilar konvensional dievaluasi berdasarkan kurva *backbone* dan hasil *performance point* yang diperoleh dari analisis. Hasil tersebut disajikan pada **Gambar 10** dan **Tabel 6** sebagai dasar untuk menilai tingkat kinerja struktur terhadap beban gempa. Berdasarkan kurva *backbone* pilar konvensional, kapasitas struktur meningkat hingga mencapai kondisi puncak, kemudian mengalami penurunan kekakuan setelah memasuki fase inelastis menuju kondisi keruntuhan. Pada tahap awal, struktur masih berperilaku elastis, kemudian diikuti degradasi kekakuan seiring bertambahnya deformasi.



Gambar 10. Backbone Curve Pilar Konvensional

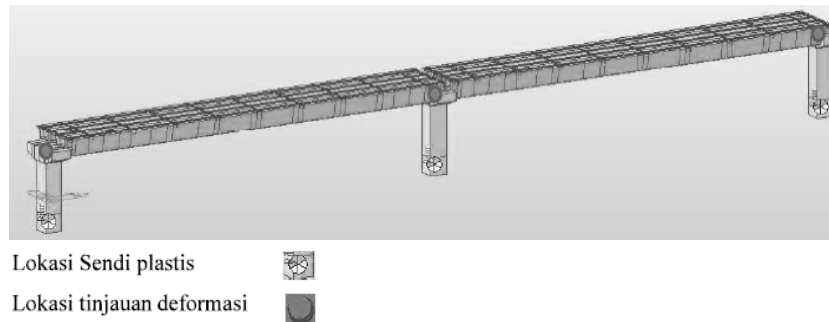
Tabel 6. Hasil *Performance Point* Pilar Konvensional

Titik	θ (rad)	Def. (mm)
<i>Immediate Occupancy</i> (IO)	0.0188	188
<i>Life Safety</i> (LS)	0.0280	280
<i>Collapse Prevention</i> (CP)	0.0374	374

Hasil *performance point* menunjukkan bahwa kondisi *Immediate Occupancy* (IO) terjadi pada rotasi 0,0188 rad dan deformasi 188 mm, yang menandakan struktur masih dalam kondisi aman. Pada tingkat *Life Safety* (LS) dengan rotasi 0,0280 rad dan deformasi 280 mm, struktur mulai mengalami kerusakan namun tetap stabil. Sementara itu, pada *Collapse Prevention* (CP) dengan rotasi 0,0374 rad dan deformasi 374 mm, struktur berada pada kondisi mendekati keruntuhan. Dengan demikian, pilar konvensional masih memiliki kapasitas yang

memadai terhadap beban gempa, namun menunjukkan penurunan kinerja yang signifikan setelah melewati fase elastis sehingga berpotensi mengalami kerusakan pada gempa dengan intensitas besar.

b. *Plastic Hinge Length*



Gambar 11. Posisi *Hinge*

Hasil analisis performa struktur dari parameter deformasi *pier* konvensional setelah dilakukan *Non Linear Time History Analysis* (NLTHA) sebagai berikut.

Tabel 7. Performa Struktur Terhadap Rotasi

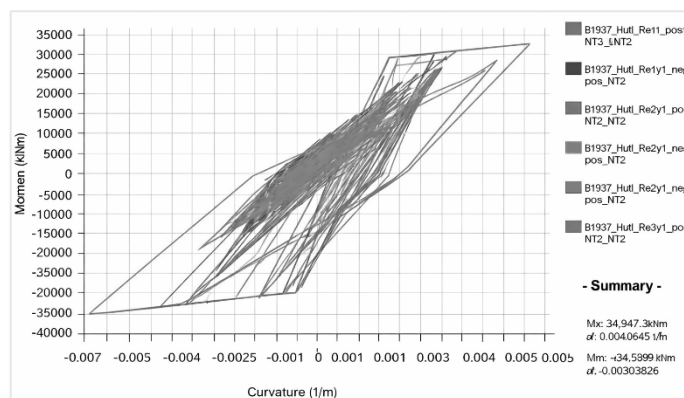
	KONV LRB			KONV NON-LRB		
	Kurvatur	Rotasi	Status	Kurvatur	Rotasi	Status
AMBOY	0.00120	0.00240	<i>not yield</i>	0.00637	0.01593	<i>yield</i>
CANOGA	0.00064	0.00128	<i>not yield</i>	0.00432	0.01080	<i>yield</i>
DUARTE	0.00066	0.00132	<i>not yield</i>	0.00374	0.00935	<i>yield</i>
SITKA	0.00105	0.00210	<i>not yield</i>	0.00280	0.00700	<i>yield</i>
TCU089	0.00054	0.00108	<i>not yield</i>	0.00210	0.00525	<i>yield</i>
TCU120	0.00066	0.00132	<i>not yield</i>	0.00430	0.01075	<i>yield</i>
TCU120	0.00066	0.00132	<i>not yield</i>	0.00430	0.01075	<i>yield</i>
TCU136	0.00077	0.00154	<i>not yield</i>	0.00146	0.00365	<i>yield</i>

Tabel 8. Performa Struktur Terhadap Deformasi

	KONV LRB			KONV NON-LRB		
	Def. x	Def. y	Status	Def. x	Def. y	Status
AMBOY	9.88	12.94	<i>not yield</i>	36.05	50.89	<i>yield condition</i>
CANOGA	18.31	40.94	<i>not yield</i>	6.06	54.33	<i>yield condition</i>
DUARTE	4.10	8.37	<i>not yield</i>	20.47	38.75	<i>yield condition</i>
SITKA	9.43	10.00	<i>not yield</i>	17.07	14.65	<i>yield condition</i>
TCU089	12.49	14.30	<i>not yield</i>	14.97	34.28	<i>yield condition</i>
TCU120	17.70	7.95	<i>not yield</i>	33.47	24.03	<i>yield condition</i>
TCU136	19.83	12.05	<i>not yield</i>	40.07	39.42	<i>yield condition</i>

Kinerja struktur berdasarkan parameter panjang sendi plastis (*plastic hinge length*) dan hasil *Nonlinear Time History Analysis* (NLTHA) menunjukkan perbedaan yang signifikan antara sistem dengan LRB dan Non-LRB. Berdasarkan **Tabel 7**, pada model dengan LRB seluruh rekaman gempa menghasilkan nilai kurvatur dan rotasi yang masih berada dalam kondisi *not yield*, sehingga pilar tetap berperilaku elastis. Sebaliknya, pada model Non-LRB seluruh variasi gempa menunjukkan kondisi *yield*, yang menandakan telah terjadinya kelelahan pada pilar akibat tuntutan deformasi yang lebih besar.

Hasil pada **Tabel 8** menunjukkan bahwa deformasi arah x dan y pada model LRB relatif lebih kecil dan masih berada dalam batas aman (*not yield*), sedangkan model Non-LRB mengalami deformasi yang lebih besar dan seluruhnya berada dalam kondisi *yield condition*. Dengan demikian, penggunaan LRB terbukti lebih efektif dalam mereduksi deformasi dan rotasi pilar sehingga kinerja struktur tetap elastis, sementara sistem Non-LRB cenderung menyebabkan pilar mengalami kelelahan dan berpotensi meningkatkan risiko kerusakan akibat beban gempa.



Gambar 12. Histeresis *Pier* Konvensional

KESIMPULAN

Penerapan LRB pada jembatan *highway* ortotropik terbukti meningkatkan kinerja seismik pilar. LRB menyebabkan peningkatan *period shift* sehingga respons inersia global menurun, terlihat dari penurunan *base shear* dan berkurangnya tuntutan gaya global. Hasil NLTHA menunjukkan gaya dalam pilar (momen dan geser) lebih rendah karena sebagian besar deformasi lateral diserap isolator dan energi gempa didisipasikan secara histeretik. Sebaliknya, pada konfigurasi tanpa LRB, pilar menanggung tuntutan inelastik lebih tinggi sehingga sendi plastis terbentuk lebih dini, meningkatkan risiko kerusakan. Meskipun penerapan LRB meningkatkan *displacement demand* pada level isolator, perencanaan sistem perletakan dan perincian teknis *pier head* dan *bearing* yang tepat menjamin bahwa perpindahan dapat terakomodasi tanpa mengurangi keselamatan struktur. Secara keseluruhan, penggunaan LRB menurunkan tuntutan gaya dan respons inelastik pada pilar, mengurangi potensi kerusakan, dan membuat struktur lebih aman terhadap gempa rencana.

DAFTAR PUSTAKA

- American Concrete Institute. (2014). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-14)*. American Concrete Institute.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). *Guide specifications for seismic isolation design*. AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). *AASHTO LRFD bridge design specifications*. AASHTO.
- Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan, E., Silva, W. J., Chiou, B. S.-J., & others. (2013). *PEER NGA-West2 database (PEER Report 2013/03)*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Badan Standardisasi Indonesia. (2013). *SNI 2847:2013 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Badan Standardisasi Indonesia.
- Badan Standardisasi Indonesia. (2016). *SNI 1725:2016 Pembebanan untuk jembatan*. Badan Standardisasi Indonesia.
- Badan Standardisasi Indonesia. (2016). *SNI 2833:2016 Standar perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan*. Badan Standardisasi Indonesia.
- Baig, M. A., Ansari, M. I., Islam, N., & Umair, M. (2022). Effect of lead rubber bearing on seismic performance of steel box girder bridge. *Materials Today: Proceedings*, 64(Part 1), 468–480. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.953>
- Buckle, I. G., Constantinou, M. C., Dicleli, M., & Ghazem, H. (2006). *Seismic isolation of highway bridges*. MCEER.
- California Department of Transportation. (2013). *Seismic design criteria (SDC)*. Caltrans.
- Chen, W., & Duan, L. (2014). *Bridge engineering handbook*. CRC Press.
- Chen, X., Xiang, N., Li, J., & Guan, Z. (2020). Influence of near-fault pulse-like motion characteristics on

seismic performance of tall pier bridges with fragility analysis. *Journal of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1751345>

- Federal Emergency Management Agency. (2009). *Quantification of building seismic performance factors (FEMA P695)*. FEMA.
- Hassan, A. L., & Billah, A. H. M. M. (2020). Influence of ground motion duration and isolation bearings on the seismic response of base-isolated bridges. *Engineering Structures*, 222, 111129. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111129>
- Kenarkoochi, M., & Hassan, M. (2024). Review of accelerated construction of bridge piers—Methods and performance. *Advances in Bridge Engineering*, 5, Article 3. <https://doi.org/10.1186/s43251-024-00116-6>
- Komisi Keamanan Jembatan dan Terowongan Jalan. (2018). *KKJT draft konsensus*. Komisi Keamanan Jembatan dan Terowongan Jalan.
- National Cooperative Highway Research Program. (2011). *Application of accelerated bridge construction connections in moderate-to-high seismic regions (NCHRP Report 698)*. Transportation Research Board.
- National Cooperative Highway Research Program. (2011). *Seismic isolation design examples of highway bridges (NCHRP Report 20-7/Task 262)*. Transportation Research Board.
- National Cooperative Highway Research Program. (2017). *Seismic evaluation of bridge columns with energy dissipating mechanism (NCHRP Report 864)*. Transportation Research Board.
- Pang, Y., Wei, K., He, H., & Wang, W. (2022). *Assessment of lifetime seismic resilience of a long-span cable-stayed bridge exposed to structural corrosion*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 157, 107275. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107275>
- Rauzana, A., & Dharma, W. (2022). Causes of delays in construction projects in the Province of Aceh, Indonesia. *PLOS ONE*, 17(1), e0263337. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263337>
- Science Learning Hub. (2007). *Model lead rubber bearing (LRB)*. Science Learning Hub.
- Shiddiqi, H. A. (2019). *Studi analisis kinerja pilar precast pada struktur multispan LRT menggunakan lead rubber bearing dengan non linier time history analysis* (Master's thesis, Institut Teknologi Bandung).
- Supendi, P., Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D., & Putra, H. E. (2020). Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java, Indonesia. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72142-z>
- Sun, G., Wang, Y., Yang, J., Chen, S., Liu, H., & Zhao, J. (2024). *Lightweight design method of orthotropic steel bridge deck with U-ribs based on multi-objective optimization*. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102414. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102414>
- Virlianda, W. N. (2018). *Penilaian risiko kegempaan dan retrofit pada jembatan gelagar beton prategang dengan kombinasi sistem struktur balok sederhana dan sistem portal dengan metode incremental dynamic analysis* (Master's thesis, Institut Teknologi Bandung).

