

Analisis Perbandingan Kinerja Seismik Struktur Bangunan Gedung Pracetak Sistem Ganda Beton Bertulang di Jakarta Tanpa dan Dengan Isolasi Dasar Menggunakan Variasi Faktor Modifikasi Properti

Martinus Nifotuhu Fau*

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia

Email: martinusnfau@gmail.com

Herlien Dwiarti Soemari

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Email: herlien@itb.ac.id

Hari Nugraha Nurjaman

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Persada Indonesia YAI

Email: hari_nurjaman37@yahoo.com

Abstrak

Perkembangan dan pengaplikasian sistem struktur pracetak kinerja tinggi pada bangunan gedung beton bertulang dengan memanfaatkan pembentukan sendi plastis untuk mendisipasikan energi pada komponen struktur itu sendiri, telah banyak diproduksi secara lokal di Indonesia. Disisi lain terus ditemukannya sesar baru yang akan berpotensi terus meningkatkan seismisitas, serta kebutuhan untuk mendapatkan kinerja seismik struktur yang lebih baik untuk bangunan yang bernilai tinggi juga terus dibutuhkan. Oleh karena itu penggunaan sistem isolasi dasar menjadi salah satu inovasi yang dapat meningkatkan kinerja struktur bangunan pracetak. Pada penelitian ini akan difokuskan pada penggunaan isolasi dasar tipe Lead Rubber Bearing (LRB), dan model bangunan adalah sistem ganda beton bertulang 20 lantai, berlokasi di daerah gempa tinggi yaitu Jakarta dengan kelas situs tanah lunak dan berfungsi sebagai apartemen. Terlebih dahulu struktur dianalisis dengan pendekatan berbasis preskriptif yakni analisis linier elastik, dimana detail setiap elemen struktur akan mengikuti SNI 2847:2019 dan tahapan analisis juga mengikuti SNI 1726:2019 untuk pembebanan lateral gempa dan SNI 1727:2020 untuk beban gravitasinya, baik untuk struktur tumpuan terjepit maupun untuk sistem isolasi dasar. Dan pada analisis yang lebih detail akan menggunakan analisis berbasis kinerja dengan Non Linier Time History (NLTH) dan akan dibandingkan respons struktur dan kinerja dari kedua sistem struktur tersebut.

Kata-kata Kunci: Struktur pracetak, isolasi dasar, Lead Rubber Bearing (LRB), Analisis Non Linear Time History (NLTH), Design Basis Earthquake (DBE), Maximum Considered Earthquake (MCE), kinerja struktur.

Abstract

The development and application of high-performance precast structural systems in reinforced concrete buildings by utilizing the formation of plastic joints to dissipate energy in the structural components themselves, have been widely produced locally in Indonesia. On the other hand, new faults continue to be found that will potentially continue to increase seismicity, and the need to obtain better seismic structural performance for high-value buildings also continues to be needed. Therefore, the use of a base isolation system is one of the innovations that can improve the performance of precast building structures. This study will focus on the use of Lead Rubber Bearing (LRB) type base isolation, and the building model is a 20-story reinforced concrete double system, located in a high earthquake area, namely Jakarta with a soft soil site class and functioning as an apartment. First, the structure is analyzed using a prescriptive-based approach, namely linear elastic analysis, where the details of each structural element will follow SNI 2847: 2019 and the analysis stages also follow SNI 1726: 2019 for lateral earthquake loading and SNI 1727: 2020 for gravity loads, both for the clamped support structure and for the base isolation system. And in a more detailed analysis, performance-based analysis with Non-Linear Time History (NLTH) will be used and the structural response and performance of the two system structures will be compared.

Kata-kata Kunci: Precast structures, base isolation, Lead Rubber Bearing (LRB), Non Linear Time History (NLTH) Analysis, Design Basis Earthquake (DBE), Maximum Considered Earthquake (MCE), structural performance.

* Penulis Korespondensi: martinusnfau@gmail.com

1. Pendahuluan

Pada saat ini telah banyak penelitian, pengembangan dan penerapan sistem struktur pracetak beton bertulang khususnya untuk bangunan gedung di Indonesia sepenuhnya telah banyak diproduksi dan diaplikasikan secara lokal. Sistem pracetak beton struktural kinerjanya telah teruji tidak hanya pada tahap analisis akan tetapi juga dengan pengujian eksperimental di laboratorium. Sistem pracetak yang umum digunakan di Indonesia adalah struktur dengan tumpuan konvensional (*fixed-base*) dimana terjadi mekanisme pembentukan sendi plastis pada elemen struktur untuk mendisipasi beban seismik, hal ini tentunya akan menimbulkan kerusakan pada elemen struktur akan tetapi bangunan akan tetap berdiri pada kondisi gempa kuat. Disisi lain terdapat kebutuhan untuk perlindungan terhadap komponen sensitif dalam suatu gedung seperti untuk *data center* sering kali menjadi pertimbangan yang lebih utama. Selain itu bangunan fasilitas umum seperti rumah sakit, sekolah, tempat ibadah, pusat komunikasi, fasilitas darurat, dan bangunan esensial serta memiliki nilai yang tinggi lainnya harus tetap operasional saat gempa terjadi. Oleh karena itu penggunaan sistem isolasi dasar (*isolated-base*) menjadi salah satu inovasi yang dapat meningkatkan kinerja struktur bangunan pracetak. Penelitian serupa yakni studi komparasi sistem isolasi dasar HDRB (*High-Damping Rubber Bearing*) dan FPS (*Friction Pendulum System*) (Andri Setiawan, 2014) menghasilkan bahwa perangkat FPS terbukti dapat bekerja lebih efektif dibandingkan HDRB dalam mereduksi gaya gempa, pada penelitian ini akan ditinjau menggunakan perangkat isolasi dasar LRB dengan variasi faktor modifikasi properti batas atas, batas bawah, dan nominal.

Studi kasus bangunan gedung yang akan dianalisis adalah struktur pracetak yang sudah melewati proses pengujian sistem eksperimental, dimana di Indonesia untuk dapat menggunakan sistem struktur pracetak tentunya harus memenuhi semua kriteria penerimaan pada SNI 7834-2012, diantaranya: kekuatan, kekakuan dan disipasi energi. Model bangunan menggunakan sistem ganda yaitu kombinasi Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dan Sistem Dinding Struktural Khusus (SDSK) beton bertulang 20 lantai, berlokasi di Jakarta dengan kelas situs tanah lunak dan berfungsi sebagai apartemen. Sistem isolasi dasar akan difokuskan pada penggunaan *elastomeric rubber* tipe *Lead Rubber Bearing* (LRB) yang memiliki redaman dan energi cukup besar mencapai 30% dan dengan kekakuan yang lebih besar pula. Pada tahap desain baik untuk struktur tanpa isolasi dasar maupun struktur dengan isolasi dasar, dilakukan menggunakan analisis linier elastik berbasis preskriptif sesuai SNI terbaru terkait perancangan struktur beton bertulang tahan gempa yaitu SNI 2847-2019 untuk *detailling* elemen struktur, SNI 1726-2019 untuk pembebanan gempa dan SNI 1727-2020 untuk pembebanan gravitasi. Analisis kinerja seismik struktur bangunan ini akan dianalisis menggunakan analisis *Non Linear Time History* (NLTH) baik untuk model struktur dengan sistem konvensional tanpa isolasi dasar dan juga untuk model struktur sistem isolasi dasar. Analisis non-linier

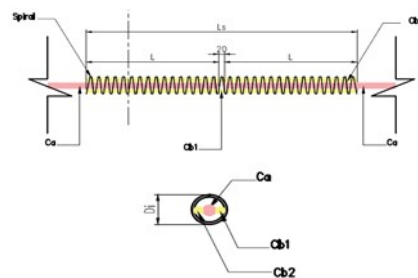
penampang menggunakan XTRACT dan untuk menentukan level kriteria penerimaan setiap elemen strukturnya menggunakan ASCE 41-17.

2. Tinjauan Pustaka

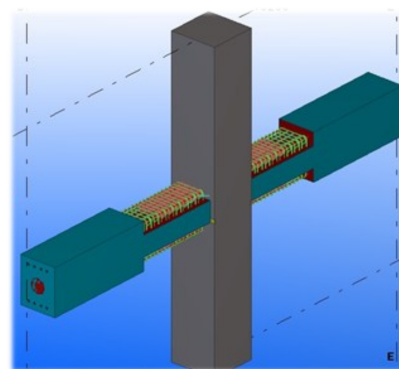
2.1 Sistem struktur pracetak tanpa isolasi dasar

Salah satu sistem pracetak yang akan dibahas dan akan digunakan pada penelitian ini adalah sistem *Precast Seismic Structural System* (PRESSS) Indonesia yang dikembangkan oleh H. Nurjaman, dkk bersama PT Wika Beton. Sistem ini memiliki konsep dimana sambungan balok ke elemen vertikal (kolom atau dinding geser) yang menjadi bagian kemungkinan terjadinya sendi plastis disambungkan dengan elemen dissipater seperti terlihat pada **Gambar 1** dimana tulangan utama longitudinal dari balok dan stek yang keluar dari elemen kolom atau dinding geser (Ca) dihubungkan dengan 2 buah batang tulangan yang lebih kecil (Cb1 dan Cb2), dan selanjutnya dibungkus oleh tulangan spiral. Panjang sambungan dan ukuran diameter setiap tulangan sambungan yang digunakan sesuai pada **Gambar 1** yang disusun dari hasil pengujian eksperimental yang dilakukan secara komprehensif. **Gambar 2** menunjukkan konsep dari sistem struktur pracetak ini.

Struktur pracetak yang akan digunakan telah memenuhi syarat penerimaan sistem rangka pemikul momen beton bertulang pracetak untuk bangunan gedung sesuai SNI 7834-2012, sehingga struktur beton pracetak dapat memiliki perilaku monolit seperti halnya struktur beton bertulang yang dicor di tempat (*cast in site*). Pada ACI 550.1R-09 (*guide to emulating cast-in-place detailing for seismic design of precast*



Gambar 1. Elemen sambungan dissipater untuk sistem PRESSS

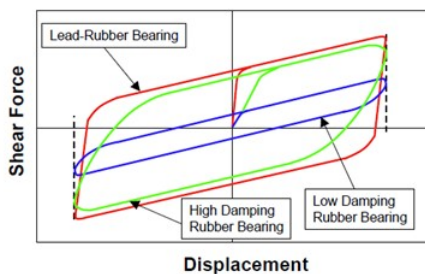


Gambar 2. Skematik sistem pracetak PRESSS

concrete structures) dimana peraturan ini juga akan diadopsi di Indonesia dan sudah menjadi RSNI, juga disebutkan pada *Chapter 3.3* bahwa analisis struktur beton pracetak yang diemulasi mengikuti prosedur yang sama dengan yang digunakan dalam struktur beton bertulang cor di tempat.

2.2 Isolasi dasar tipe *Lead Rubber Bearing (LRB)*

Perangkat LRB merupakan isolasi dasar yang memiliki redaman yang cukup tinggi dan disipasi energi yang cukup besar dibandingkan NRB atau HDRB seperti terlihat pada **Gambar 3**, sehingga efektif untuk digunakan sebagai isolasi dasar pada bangunan gedung tinggi seperti pada penelitian ini. Redaman dan disipasi energi yang lebih besar ini akhirnya akan membuat kekakuan menjadi lebih besar sehingga pemanjangan perioda akan sedikit lebih kecil akan tetapi diharapkan masih tetap dapat efektif untuk digunakan. Isolasi dasar LRB dapat dianalisis dengan pendekatan *equivalent linear model* dan non-linier model.



(Sumber: FEMA Notes 15-7, Instructional Material Complementing FEMA 451)

Gambar 3. Perbandingan kurva histeretik isolator elastomeric bearing

Pada dasarnya isolasi dasar LRB memiliki perilaku yang tidak linier, akan tetapi pendekatan *equivalent linear model* cukup efektif dilakukan sebagai pendekatan khususnya pada tahap desain, dan pada saat analisis yang lebih detail yaitu analisis NLTH maka isolasi dasar ini juga harus dimodelkan non-linier dengan pendekatan *bilinier model*.

Kekakuan efektif dapat didefinisikan sebagai kekakuan sekan (*secant stiffness*) yang dapat dihitung dengan menghubungkan perpindahan maksimum positif dan negatif dari kurva hubungan idealisasi bilinear untuk perangkat isolasi dasar tipe LRB ini. Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$K_{eff} = \frac{K_i u_y + K_p (u_{max} - u_y)}{u_{max}} \quad (1)$$

dengan:

K_{eff} = kekakuan efektif dengan pendekatan linear

K_i = kekakuan awal

K_p = kekakuan paska kelelahan

u_y = deformasi leleh

u_{max} = deformasi maksimum pada siklus tertentu

Redaman efektif merupakan parameter linier untuk merepresentasikan redaman yang dihasilkan oleh

perangkat LRB melalui histeritiknya, yang merupakan perbandingan antara luas kurva histeretik yang menunjukkan energi yang terdisipasi dengan energi regangan pada *equivalent linier system*.

Sehingga secara matematis rasio redaman efektif dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{W_D}{W_S} \quad (2)$$

dimana:

ξ_{eff} = redaman efektif

W_D = energi histeretik

W_S = energi regangan elastik

Besarnya parameter W_D dan W_S dapat dihitung:

$$W_D = 4(K_i - K_p)u_y(u_{max} - u_y) \quad (3)$$

$$W_S = \frac{1}{2} K_{eff} u_{max}^2 \quad (4)$$

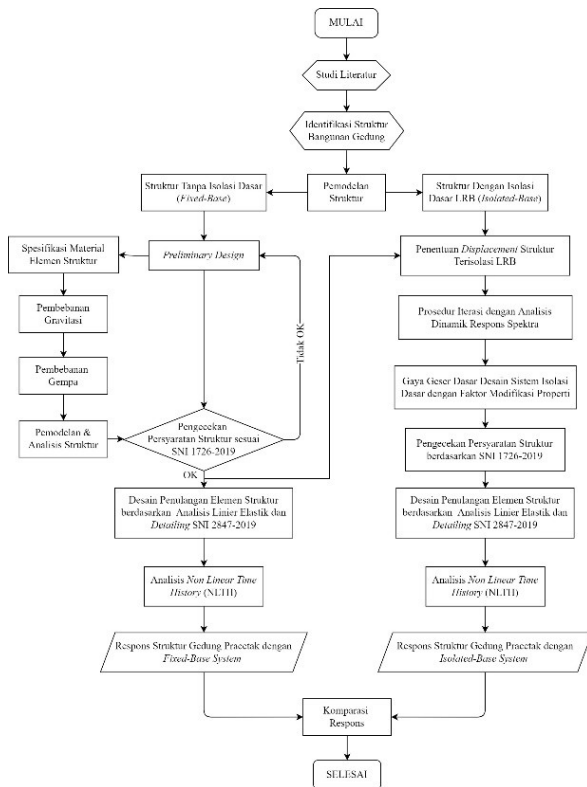
Penggunaan isolasi dasar dalam mengurangi gaya geser dapat efektif bekerja berkaitan erat dengan pemanjangan perioda natural sistem yang dapat dicapai akibat pemasangan isolator LRB ini. Sistem isolasi dasar akan memindahkan perioda natural struktur pada daerah *velocity-sensitive region* di respon spektra yang memiliki *pseudo acceleration* jauh lebih kecil dari daerah semula, dimana sebagai hasilnya gaya geser dapat direduksi secara signifikan. Selain kontribusi dari pemanjangan perioda, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa isolasi dasar memiliki nilai rasio redaman yang cukup besar dimana untuk isolator tipe LRB ini redaman dapat menjapai 30% atau lebih, hal ini juga dapat menurunkan respon spektra yang digunakan sehingga juga akan berdampak pada pengurangan gaya geser.

3. Metodologi Penelitian

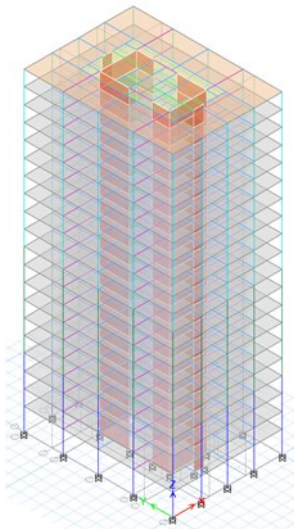
Metode penelitian secara global yang digunakan pada studi ini diberikan pada **Gambar 4**.

3.1 Deskripsi model struktur

Pada penelitian ini akan digunakan 4 (empat) model gedung yang memiliki dimensi dan fungsi bangunan yang sama namun dengan perangkat tumpuan tanpa isolasi dasar (*fixed-base*) dan dengan isolasi dasar (*isolated-base*), dimana untuk yang menggunakan isolasi dasar terdiri dari 3 (tiga) model yakni dengan faktor modifikasi properti batas atas, batas bawah, dan nominal. Bangunan yang dianalisis merupakan bangunan yang berfungsi sebagai apartemen yang terdiri dari 20 lantai, dimana tinggi lantai pertama adalah 5m dan lantai tipikal diatasnya adalah 3.5m sehingga total tinggi bangunan adalah 71.5m. Keempat model bangunan tersebut memiliki dimensi lantai yang sama yaitu sebesar 25 m x 34 m, dengan bentang grid arah sumbu x dan sumbu y yang bervariasi, pada parameter bangunan terdiri dari struktur kolom dan pada area tengah bangunan terdiri dari struktur dinding geser, seperti terlihat pada **Gambar 5**.



Gambar 4. Diagram alir metode penelitian

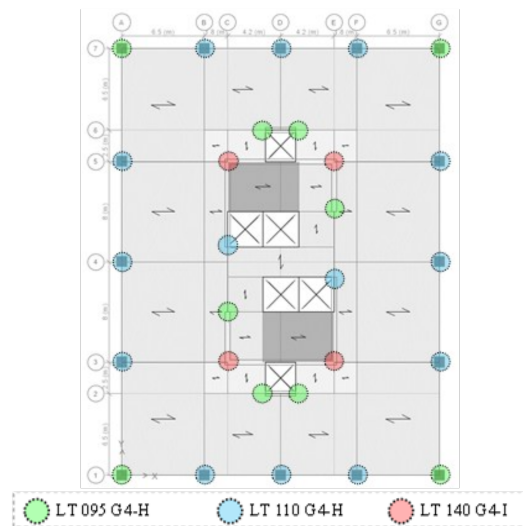


Gambar 5. Model 3D struktur gedung

3.2 Perencanaan elemen struktur dan isolasi dasar LRB

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa lebih dahulu akan dilakukan desain terhadap model baik tanpa isolasi dasar maupun dengan isolasi dasar LRB. Struktur bangunan ini akan di desain dengan SNI 1726-2019 untuk pembebanan lateral gempa, SNI 1727-2022 untuk pembebanan gravitasi dan SNI 2847-2019 untuk penulangan setiap elemen strukturnya sesuai tingkat *detailing* sistem struktur ini yakni *detailing* khusus. Pemilihan tipe LRB didasarkan pada

kebutuhan kekakuan horizontal perlu untuk mencapai perioda target (pada penelitian ini diambil target sebesar 1.5 sampai 2 kali dari perioda struktur terjepit) dan kapasitas jangka panjang dalam menahan beban vertikal. Pada penelitian akan digunakan isolasi dasar dari *supplier* Bridgestone yaitu tipe LT Series G4 dengan ketebalan total karet adalah 250 mm serta dengan variasi diameter *lead plug*. Rasio redaman efektif pada kondisi 100% regangan geser adalah 28.9% dimana nilai ini juga dibatasi mengacu pad SNI 1726-2019 yaitu tidak boleh lebih dari 30%. Setelah diperoleh spesifikasi LRB berdasarkan *preliminary design*, maka dilanjutkan dengan menjalankan prosedur iterasi perpindahan rencana sampai mendapatkan hasil konvergen dengan asumsi perpindahan awal, pada bagian ini hanya ditampilkan properti isolator dan hasil yang telah konvergen. Berikut ini akan ditampilkan *layout* pemasangan untuk tiap tipe LRB tersebut pada kolom lantai dasar serta spesifikasi detail setiap tipenya. Pada **Gambar 6** berikut ini terlihat konfigurasi sistem isolasi dasar LRB yang digunakan.



Gambar 6. Layout pemasangan perangkat LRB

Ketiga tipe LRB tersebut memiliki diameter dan properti yang berbeda, seperti dijelaskan pada **Tabel 1**.

Selanjutnya untuk struktur isolasi dasar dengan variasi faktor modifikasi properti digunakan sesuai perencanaan yang terdapat pada **Tabel 2** berikut. Dimana akibat parameter tersebut yang berbeda maka nilai kekakuan paska leleh dan kekuatan leleh LRB akan berbeda, sehingga pada akhirnya kekakuan *equivalent* lateral dan redaman *equivalent* akan berbeda juga akibat faktor modifikasi properti ini.

3.3 Analisis Non Linear Time History (NLTH)

Pada fase analisis prosedur analisis NLTH akan digunakan 11 pasang *ground motion* yang akan diskalakan terhadap spektra bangunan yang ditinjau baik pada level DBE maupun MCE dengan website *Pacific Earthquake Engineering Research*

Tabel 1. Properti nominal LRB yang digunakan

Karakteristik Isolator LRB	LT 095G4 H	LT 110G4 H	LT 140G4 I
Jumlah unit (-)	10	14	4
Outer diameter (mm)	950	1100	1400
Lead plug diameter (mm)	210	240	310
Effective plane area ($\times 10^2 \text{ mm}^2$)	6742	9051	14639
Thickness of one rubber layer (mm)	6.4	7.4	9.5
Number of rubber layers (-)	39	34	26
Total rubber thickness (mm)	250	252	247
First shape factor (-)	37.1	37.2	36.8
Second shape factor (-)	3.81	4.37	5.67
Diameter of flange (mm)	1300	1500	1800
Thickness of flange (edge/center) (mm)	28/36	30/38	50/100
Connecting bolt PCD (mm)	1150	1350	1650
Diameter of connecting bolt hole x qty (mm)	12 D33	12 D39	12 D42
Bolt size (asumption) (-)	M80	M86	M39
Thickness of each reinforced steel plate (mm)	4.4	4.4	5.8
Total height (mm)	488.8	478.8	592
Total weight (kN)	19.1	24.4	56.7
Critical stress σ_c when $\gamma = 0$ (MPa)	43	60	92
Compressive stiffness ($\times 10^3 \text{ kN/m}$)	3340	4450	7320
Nominal long term compressive stress (MPa)	9.6	12.2	15
Nominal long term column load (kN)	6500	11000	22000
Allowable tensile stress ($\gamma = 100\%$) (MPa)	1	1	1
Initial stiffness ($\times 10^3 \text{ kN/m}$)	14.6	19.4	32
Post yield stiffness ($\gamma = 100\%$) ($\times 10^3 \text{ kN/m}$)	1.12	1.49	2.46
Characteristic Strength (kN)	276	380	601
Equivalent shear stiffness ($\times 10^3 \text{ kN/m}$)	2.23	2.92	4.89
Equivalent damping ratio (-)	0.29	0.287	0.291

Tabel 2. Properti nominal LRB yang digunakan

Faktor Modifikasi Properti LRB	Post-Yield Stiffness (Kd)		Characteristic Strength (Qd)	
	Upper	Lower	Upper	Lower
Aging (λ_a)	1.1	1	1	1
Ambient temperature variation $20^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ (λ_t)	1.06	0.95	1.23	0.79
$\lambda_{so} = \lambda_a \times \lambda_t$	1.166	0.95	1.23	0.79
$\lambda_{so \pm}$	1	1	1	1
Manufacturing variation (λ_{spec})	1.1	0.9	1.1	0.9
Total (λ_{max} dan λ_{min})	1.2370	0.8663	1.2898	0.7583

(PEER). Kesebelas pasang *ground motion* tersebut beserta faktor skala setiap level gempanya ditampilkan seperti terlihat pada Tabel 3.

4. Hasil dan Analisis

4.1 Evaluasi gaya geser dasar

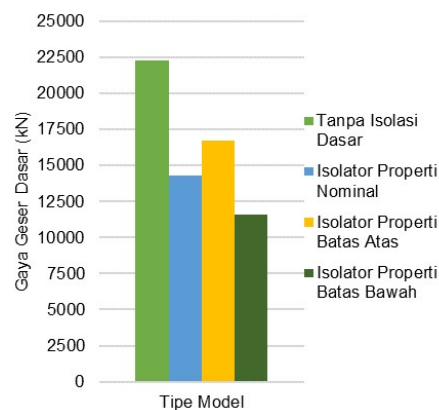
Dari hasil analisis NLTH dari 11 pasang *ground motion* yang telah diskalakan pada masing-masing level diperoleh gaya geser seperti terlihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.

Pada Gambar 7 dapat dihitung bahwa rata-rata gaya geser dasar maksimum adalah 22295.54 kN untuk struktur tanpa isolasi dasar, 14281.32 kN untuk struktur terisolasi dengan properti LRB nominal, 16712.60 kN untuk struktur terisolasi dengan properti LRB batas atas, dan 11589.34 kN untuk struktur terisolasi dengan properti LRB batas bawah. Dimana jika ditinjau

Tabel 3. Data *ground motion* dan faktor skala dengan web PEER

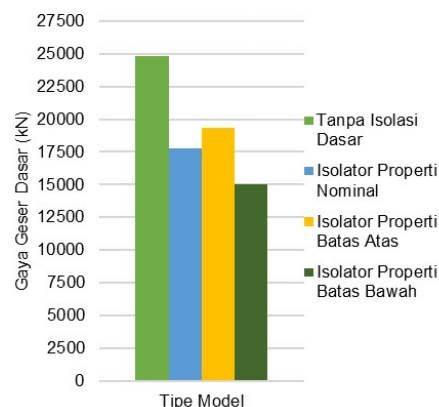
No	Gempa	Kode	Mekanisme	Scale Factor (DBE)	Scale Factor (MCE)
1	Chi-Chi_Taiwan (1999)	GM1-EW GM1-NS	Megathrust	8.7494	13.1242
2	Tabas_Iran (1978)	GM2-EW GM2-NS		4.211	6.3164
3	Kocaeli_Turkey (1999)	GM3-EW GM3-NS		13.28	19.92
4	Denali_Alaska (2002)	GM4-EW GM4-NS		21.9347	32.902
5	Northridge-01 (1994)	GM5-EW GM5-NS	Shallow Chrustal	8.3303	12.4954
6	Chuetsu-oki_Japan (2007)	GM6-EW GM6-NS		19.3771	29.0656
7	Irpina_IItaly (1980)	GM7-EW GM7-NS		13.5158	20.2737
8	Loma Prieta (1989)	GM8-EW GM8-NS		6.7608	10.1412
9	Landers (1992)	GM9-EW GM9-NS	Benioff	3.3101	4.9652
10	Hector Mine (1999)	GM10-EW GM10-NS		10.4497	15.6745
11	Montenegro_Yugoslavia (1979)	GM11-EW GM11-NS		17.6769	26.5154

Rata-rata gaya geser dasar maksimum untuk kondisi gempa DBE



Gambar 7. Gaya geser dasar struktur gedung dengan tanpa isolasi dasar pada level DBE

Rata-rata 11 GM gaya geser dasar maksimum untuk kondisi gempa MCE



Gambar 8. Gaya geser dasar struktur gedung dengan tanpa isolasi dasar pada level MCE

reduksinya dari sistem yang tanpa isolasi dasar nilainya adalah 35.9%, 25% dan 48% secara berturut-turut untuk kondisi gempa DBE.

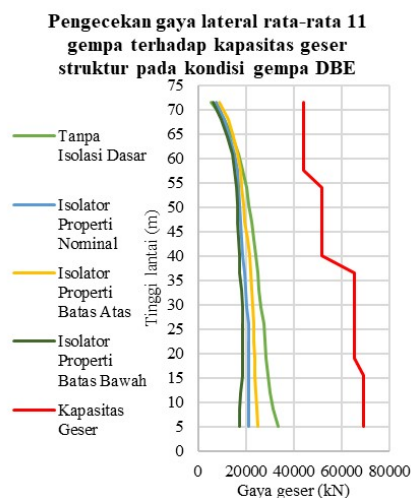
Sedangkan pada **Gambar 8** bahwa rata-rata gaya geser dasar maksimum adalah 24852.27 kN untuk stuktur tanpa isolasi dasar, 17772.66 kN untuk struktur terisolasi dengan properti LRB nominal, 19354.64 kN untuk struktur terisolasi dengan properti LRB batas atas, dan 15046.51 kN untuk struktur terisolasi dengan properti LRB batas bawah. Dimana jika ditinjau reduksinya dari sistem yang tanpa isolasi dasar nilainya adalah 28.5%, 22.1% dan 39.5% secara berturut-turut untuk kondisi gempa MCE.

Dari hasil tersebut diperoleh bahwa reduksi gaya geser dasar maksimum untuk struktur tanpa isolasi dasar mengalami penurunan signifikan jika dengan isolasi dasar dimana nilai ini mencapai >20% untuk kondisi gempa DBE dan >25% untuk kondisi gempa MCE. Reduksi ini terjadi karena pemanjangan perioda natural struktur dan redaman sistem yang lebih tinggi untuk struktur yang menggunakan isolasi dasar. Dari grafik diatas diperoleh bahwa baik pada level gempa DBE ataupun MCE penurunan gaya geser dasar pada struktur yang menggunakan isolasi dasar cukup signifikan. Jika dilihat nilai rata-rata respons gaya geser dasar dari setiap ground motion tersebut diperoleh penurunan yakni sebesar 33% pada level DBE dan 29% pada level MCE.

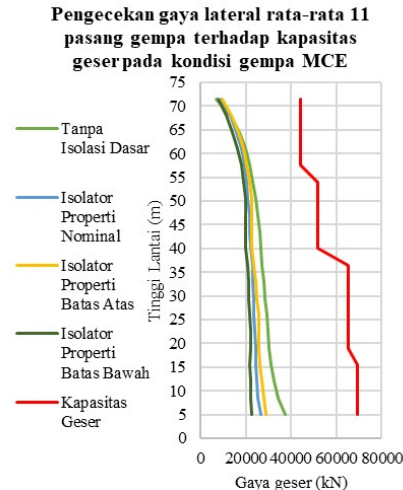
4.2 Evaluasi gayag geser lantai (*force control*)

Dari gaya geser dasar maksimum yang diperoleh, dilakukan pengamatan sekaligus pengecekan pada gaya geser setiap lantainya dengan menggunakan rata-rata dari kesebelas pasang rekaman gempa untuk keempat model struktur seperti terlihat pada **Gambar 9** dan **Gambar 10**.

Pada gambar diatas dapat diperoleh bahwa keempat model struktur memiliki gaya geser dari semua rata-rata analisis nonlinier kesebelas pasangan gempa yang masih jauh dari kapasitas geser geser struktur yang



Gambar 9. Kontrol gaya geser pada kondisi level gempa DBE



Gambar 10. Kontrol gaya geser pada kondisi level gempa MCE

dalam hal ini adalah struktur kolom dan dinding geser sehingga masih memenuhi. Selanjutnya persyaratan penerimaan terhadap kontrol aksi (*force control*) ini, pada Pasal 11 langsung disyaratkan pada kondisi gempa maksimum (MCE) karena masih cukup relafan. Selanjutnya untuk pengecekan kontrol aksi pada struktur terisolasi harus menggunakan dari kondisi batas atas karena akan lebih konservatif.

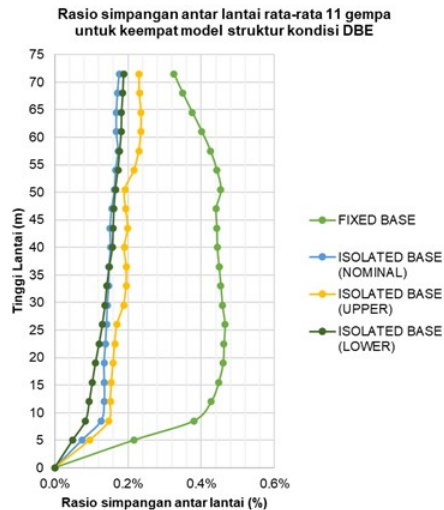
Untuk struktur tanpa dan dengan isolasi dasar dapat terlihat bahwa gaya geser pada setiap lantainya akan tetap jauh lebih besar pada struktur tanpa isolasi dasar, dan selanjutnya disusul oleh struktur terisolasi properti LRB dengan kekakuan lateral yang lebih besar (batas atas, nominal, batas bawah), sesuai pada hasil gaya geser dasar yang diperoleh sebelumnya. Hal lain yang dapat diperoleh adalah perbedaan gaya geser paling dominan pada lantai dasar, sementara pada lantai atap cenderung hasilnya akan mendekati, karena bangunan yang menggunakan isolasi dasar saat eksitasi gempa terjadi maka energi yang masuk akan cenderung berpusat pada lantai tempat isolator itu berada.

4.3 Evaluasi simpangan antar lantai

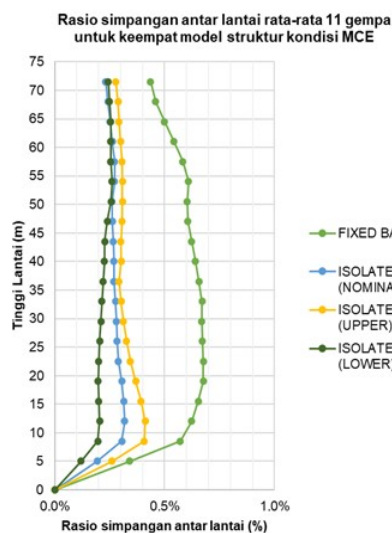
Pada **Gambar 10** dan **Gambar 11** berikut ini akan ditampilkan simpangan antar lantai dari rata-rata respons kesebelas pasang gempa baik pada kondisi DBE maupun MCE.

Pada grafik diatas terlihat jelas bahwa untuk struktur tanpa isolasi dasar jika dibandingkan nilai simpangan antar lantai yang jauh lebih kecil dengan struktur isolasi dasar. Dan jika ditinjau untuk ketiga model dengan isolasi dasar, maka simpangan antar lantai yang akan lebih besar adalah pada kondisi batas atas dan selanjutnya disusul oleh properti nominal dan batas bawah. Sehingga untuk pengecekan simpangan antar lantai harus digunakan pada kondisi batas atas karena akan lebih konservatif.

Struktur dengan isolasi dasar menghasilkan reduksi nilai rasio simpangan antar lantai rata-rata yang cukup besar jika dibandingkan dengan struktur tanpa isolasi



Gambar 11. Simpangan antar lantai pada kondisi gempa DBE



Gambar 12. Simpangan antar lantai pada kondisi gempa MCE

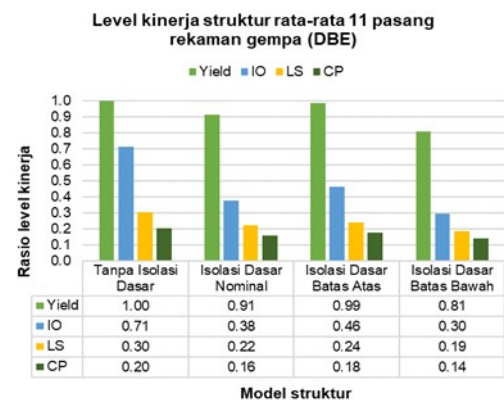
dasar. Pada kondisi gempa DBE, reduksi tersebut yakni sebesar 64.3% (properti nominal), 54.6% (properti batas atas), dan 65.7% (properti batas bawah). Dan pada kondisi gempa MCE reduksi sedikit lebih kecil yakni 54.1% (properti nominal), 45.7% (properti batas atas), dan 62.4% (properti batas bawah). Seperti halnya gaya geser yang diawal dibahas, penurunan rasio simpangan antar lantai disini juga lebih besar pada kondisi DBE karena isolator umumnya pada kondisi ini isolator belum mengalami degradasi disipasi energi.

4.4 Evaluasi kinerja struktur

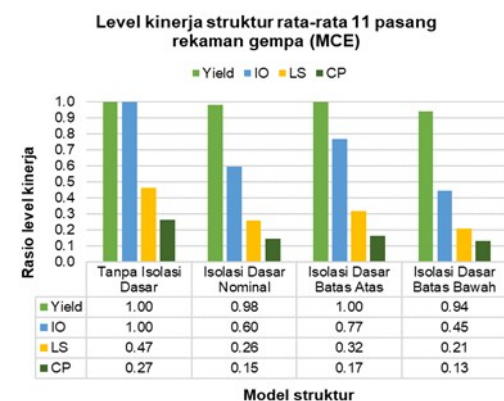
Parameter yang sangat penting dalam analisis kinerja struktur adalah melihat kerusakan sendi plastis yang terjadi pada elemen struktur dari keempat model struktur dan semua rekaman gempa riwayat waktu baik pada gempa desain maupun gempa maksimum yang telah dilakukan. Resume ini dapat dilihat seperti pada Gambar 13 dan Gambar 14.

Pada Gambar 15, Gambar 16, dan Gambar 17 akan ditampilkan ilustrasi sendi plastis yang terjadi pada struktur tanpa isolasi dasar, dengan isolasi dasar properti batas atas, dengan isolasi dasar properti nominal, dan dengan isolasi dasar properti batas bawah, menggunakan salah satu ground motion sebagai contoh yaitu GM5-EW.

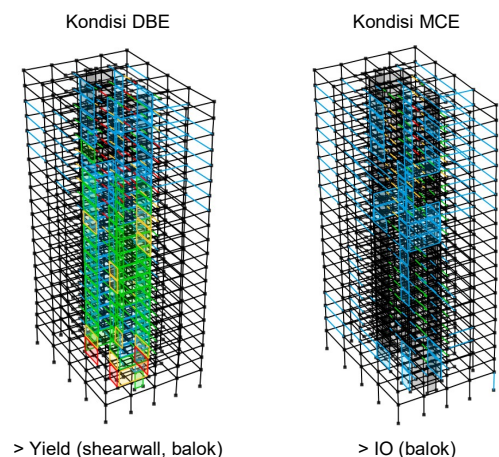
Pada grafik dan gambar diatas dapat terlihat bahwa kinerja struktur setelah penggunaan isolasi dasar cukup



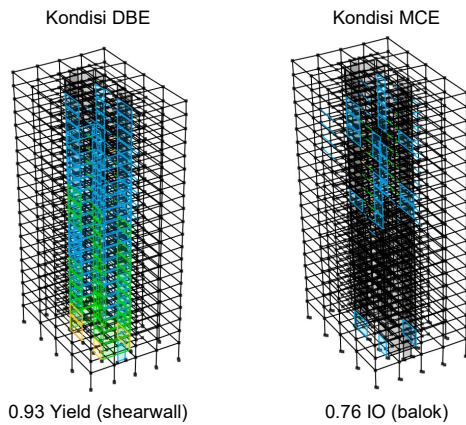
Gambar 13. Resume level kinerja struktur pada kondisi gempa desain (DBE)



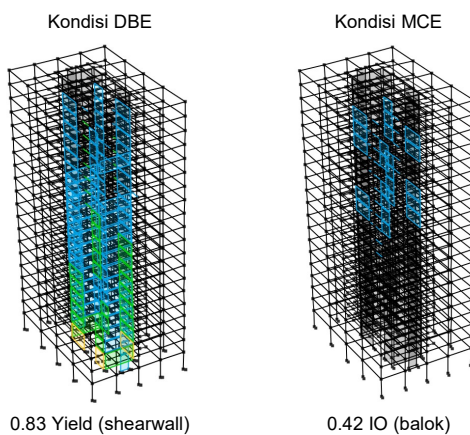
Gambar 14. Resume level kinerja struktur pada kondisi gempa maksimum (MCE)



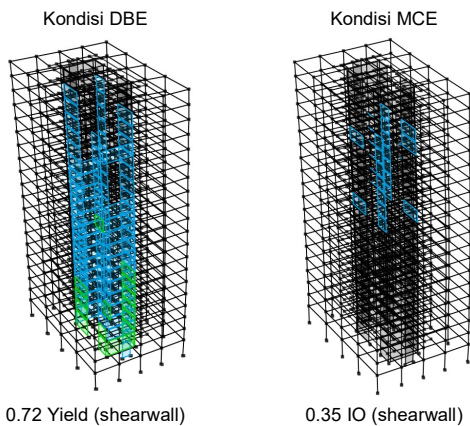
Gambar 14. Sendi plastis pada struktur tanpa isolasi dasar



Gambar 15. Sendi plastis pada struktur dengan isolasi dasar properti batas atas



Gambar 16. Sendi plastis pada struktur dengan isolasi dasar properti nominal



Gambar 17. Sendi plastis pada struktur dengan isolasi dasar properti batas bawah

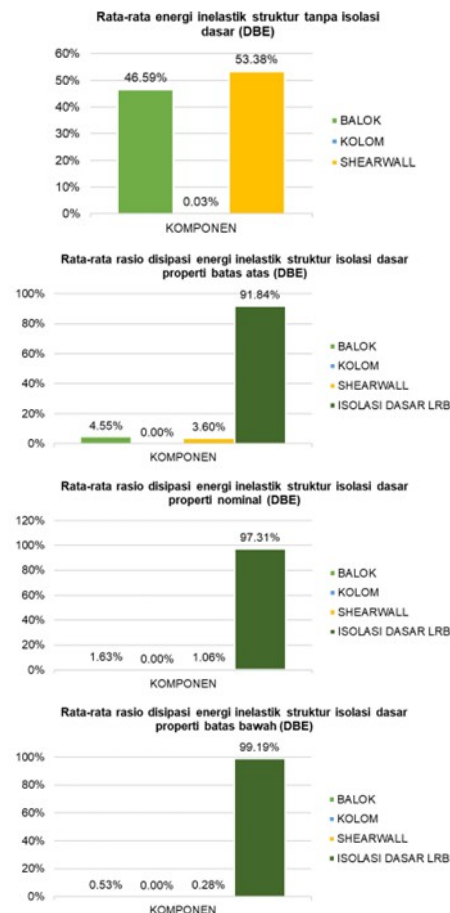
naik signifikan, dimana jika diambil dari nilai rata-level kinerjanya diperoleh level kinerja struktur tanpa isolasi dasar dari 0.47 LS menjadi 0.77 IO (upper bound), 0.60 IO (nominal), 0.45 IO (lower bound) pada kondisi gempa maksimum (MCE). Serta untuk kondisi gempa desain (DBE) dari kinerja 0.71 IO menjadi 0.46 IO (upper bound), 0.38 IO (nominal), 0.3 IO (lower bound). Dan dari ketiga jenis varian faktor

modifikasi properti yang digunakan pada struktur yang terisolasi, terlihat bahwa hasil yang terbesar dan menentukan dari setiap ground motion dan level gempa adalah dengan model struktur properti batas atas. Sehingga kinerja struktur untuk sistem isolasi dasar ini harus dilakukan dengan properti batas atas tersebut karena jika tidak analisis dapat menjadi kurang relevan atau dibawah target kinerja yang sebenarnya. Mengacu pada Pasal 11.4.2 SNI 1726-2019 atau Chapter 2.3 ASCE 41-17 yakni dengan acuan gempa maksimum, maka dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan struktur isolasi dasar LRB dapat meningkatkan kinerja struktur gedung pracetak dari kinerja Life Safety (LS) menjadi kinerja Immediate Occupancy (IO).

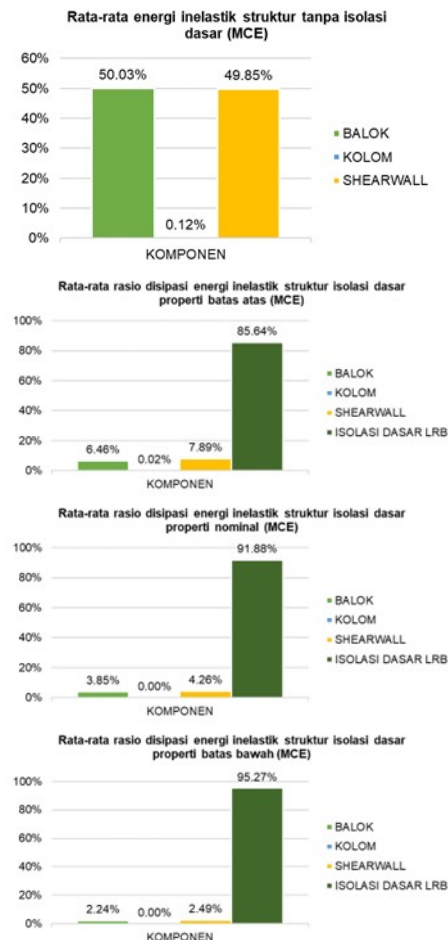
4.5 Evaluasi disipasi energi inelastik

Disipasi energi inelastik pada sistem struktur tanpa isolasi dasar terhadap struktur yang menggunakan isolasi dasar dengan varian faktor modifikasi properti seperti pada Gambar 18 dan Gambar 19 pada kondisi DBE dan MCE.

Pada grafik diatas terlihat bahwa pada model gedung struktur tanpa isolasi dasar seluruh disipasi energi gempa terjadi melalui elemen-elemen “fuse” yaitu elemen balok dan dinding geser dan hanya sebagian



Gambar 18. Rata-rata rasio disipasi energi inelastik untuk tiap grup komponen pada model struktur dengan dan tanpa isolasi dasar (kondisi DBE)



Gambar 19. Rata-rata rasio disipasi energi inelastik untuk tiap grup komponen pada model struktur dengan dan tanpa isolasi dasar (kondisi MCE)

kecil pada elemen kolom. Dimana rasio disipasi energi inelastik yang dihasilkan oleh dinding geser adalah 53.38%, balok adalah 46.59%, dan kolom 0.03% pada gempa DBE, serta 49.85% oleh dinding geser, 50.03% oleh balok dan 0.12% oleh kolom pada gempa MCE. Hal ini sesuai dengan filosofi bangunan tahan gempa dimana energi gempa akan didisipasikan pada elemen yang dirancang daktail dengan detailing khusus, rasio disipasi energi pada komponen kolom yang sangat kecil mendekati 0% juga menunjukkan bahwa proses yang dilakukan sudah sesuai dan menghasilkan mekanisme keruntuhan yang ideal.

Jika rasio disipasi energi pada struktur tanpa isolasi dasar dibandingkan terhadap struktur dengan isolasi dasar akan terlihat perbedaan yang sangat signifikan yaitu disipasi energi yang terjadi hampir seluruhnya berfokus pada perangkat isolasi dasar itu sendiri. Hal ini tentunya sangat menguntungkan karena komponen struktur hanya akan menerima sebagian kecil sisa energi gempa yang terjadi tersebut yang berarti kerusakan pada struktur atas juga akan semakin kecil.

Selanjutnya untuk ketiga varian properti LRB yang digunakan, terdapat perbedaan dimana LRB dengan properti dengan kekakuan yang lebih besar (upper bound) akan mendisipasi energi gempa lebih kecil

dibandingkan dengan kekakuan yang lebih kecil. Hal ini berhubungan dengan parameter yang sebelumnya dibahas dimana sendi plastis atau kerusakan yang terjadi paling besar dari ketiga varian properti adalah pada properti batas atas. Sehingga dengan energi disipasi yang lebih kecil maka energi gempa yang harus didistribusikan kepada komponen struktur di atasnya akan menjadi semakin lebih besar. Sehingga dalam hal ini, rasio disipasi energi dari struktur isolasi dasar adalah pada modifikasi properti batas atas.

Dari hasil analisis ini dapat disimpulkan bahwa perangkat isolasi dasar sangat efektif dalam mendisipasi gempa dimana untuk properti yang paling konservatif yakni dengan upper bound diperoleh rasio disipasi energi pada kondisi DBE diatas 90% dan pada kondisi MCE diatas 85%, sehingga kerusakan struktur yang terjadi akan lebih minimum dan dapat diperbaiki kembali paska gempa, terlebih pada sistem pracetak yang digunakan ini, sistem sambungan memang dirancang untuk dapat mudah diperbaiki kembali jika mengalami kerusakan akibat gempa.

Kesimpulan

1. Struktur yang dilengkapi dengan sistem isolasi dasar mengalami respons struktur yang signifikan baik dari parameter gaya geser dasar ataupun simpangan antar lantai.
2. Struktur pracetak yang menggunakan isolasi dasar mengalami peningkatan kinerja yang cukup signifikan dari kinerja LS menjadi IO di level gempa MCE dan kinerja IO menjadi *Operational* di level gempa DBE. Hal ini sangat menguntungkan karena kerusakan yang akan terjadi pada struktur atas akan semakin minimum dan masih dapat diperbaiki paska gempa, terlebih pada sistem pracetak yang digunakan ini, sistem sambungan memang dirancang untuk dapat mudah diperbaiki kembali.
3. Pengaruh faktor modifikasi properti isolasi dasar LRB cukup signifikan, sehingga harus dilakukan sesuai parameter yang diperlukan. Dimana diperoleh untuk mendapatkan hasil yang konservatif maka untuk menentukan perpindahan total atau deformasi horizontal harus menggunakan properti batas bawah dan untuk menentukan level kinerja, gaya geser dasar, simpangan antar lantai, rasio simpangan atap dan rasio disipasi energi harus menggunakan properti batas atas.

Daftar Pustaka

- American Concrete Institute. (2013). "ACI 374-2R-13: Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements Under Slowly Applied Simulated Seismic Loads". ACI Committee.
- American Society of Civil Engineers. (2017). "ASCE 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings". ASCE, Virginia.
- Asrurufak, M., dkk. (2012). "Peta Deagregasi Hazard Gempa Indonesia untuk Periode ulang gempa 2475 tahun".

- Badan Standardisasi Indonesia. (2019). “SNI 1726-2019: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung”. BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Indonesia. (2020). “SNI 1727-2020: Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain”. BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Indonesia. (2019). “SNI 2847-2019: Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung”. BSN, Jakarta.
- Bridgestone Corporation. (2017). *Seismic Isolation Product Line-up*. Tokyo, Japan: Bridgestone Corporation.
- Budiono, B., dkk. (2017). *Contoh Desain Bangunan Tahan Gempa*. Bandung: Penerbit ITB
- Kelly, Trevor. (2001). *Base Isolation of Structures : Design Guidelines*. Holmes Consulting Group.
- Nathaniel, Kevin. (2018). *Evaluasi Kinerja Struktur Beton Bertulang dengan Variasi Detailing yang Menggunakan Base Isolation pada Wilayah Gempa Kuat*. Bandung: Penerbit ITB.
- Nurjaman, H., dkk. (2017). *Research, Design and Application of High Performance Earthquake Resistant Precast Structure in Indonesia*. The 16th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), 2017, Santiago, Chile.
- Reidar Marrs, Nicholas. (2013). “*Seismic Performance Comparison of a Fixed-Base Versus a Base-Isolated Office Building*”. Faculty of California 10 Polytechnic State University, San Luis Obispo.
- Seismically Isolated Structures, *FEMA P-751 Chapter 12* (Charles A. Kircher, P.E., Ph.D.).
- Setiawan, Andri. (2014). “*Studi Komparasi Sistem Isolasi Dasar High-Damping Rubber Bearing Dan Friction Pendulum System pada Bangunan Beton Bertulang*”. Bandung: Penerbit ITB.
- Shabriani R, Salma. (2021). “*Evaluasi dan Perbaikan Struktur Beton Bertulang pada Bangunan Eksisting dengan Penambahan Sistem Isolasi Dasar*”. Bandung: Penerbit ITB.
- Villaverde, Roberto. (2009). “*Fundamental Concepts of Earthquake Engineering*”. Boca Raton: CRC Press.