

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Penggunaan Isolasi Dasar *Single Friction Pendulum* dan *Triple Friction Pendulum* pada Bangunan Beton Bertulang

Bambang Budiono

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan - Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa No.10, Bandung 40132
E-mail: b.budiono@lapi.itb.ac.id

Cella Adelia

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan - Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa No.10, Bandung 40132
E-mail: cella_adelia@yahoo.com

Abstrak

Penggunaan sistem isolasi dasar merupakan salah satu perkembangan dalam bidang rekayasa teknik sipil sebagai upaya proteksi struktur terhadap gempa. Konsep penggunaan sistem isolasi dasar pada dasarnya untuk meningkatkan perioda alami struktur dan memberikan tambahan redaman. Kedua hal tersebut menyebabkan kerusakan struktur yang terjadi dapat direduksi atau dihindari karena energi gempa kuat yang masuk ke struktur akan didisipasikan oleh sistem isolasi ini. Penelitian ini akan membandingkan dua buah tipe friction pendulum bearing system (FPS) yaitu tipe single pendulum dan triple pendulum pada gedung bertingkat beton bertulang. Desain FPS menggunakan analisis dinamik linear, yaitu menggunakan kombinasi respon spectra mengikuti Standar Indonesia SNI 1726-2012. Selain itu akan dilakukan evaluasi kinerja struktur dengan menggunakan analisis dinamik nonlinear dari tujuh buah riwayat gempa yang telah diskalakan. Parameter yang akan dibandingkan adalah kinerja yang akan dievaluasi, yaitu gaya geser dasar, perpindahan antar lantai, percepatan lantai paling atas struktur, tingkat kerusakan, dan juga energi yang didisipasi oleh kedua FPS tersebut pada kondisi gempa desain dan gempa rencana maksimum.

Kata-kata Kunci : Sistem isolasi dasar, Single friction pendulum system, Triple friction pendulum system, Respon spektra, Analisis nonlinear, Gempa desain, Gempa kuat.

Abstract

The use of base isolation system is one of the developments in civil structural engineering in order to protect structures under major earthquake loads. The concept of the use of the base isolation system is to increase structure's natural period and to provide additional damping to the structures reducing or avoiding the structural damage significantly under major seismic loadings because the input energy from the seismic will be dissipated through the FPS mechanisms. The study implemented two types of friction pendulum bearing system (FPS) namely the Single and Triple Pendulums. In this research, the behaviors of the single and triple friction pendulums implemented in the reinforced concrete high rise buildings will be compared and discussed. The design method of FPS is based on the combination of ultimate load and response spectra complying with the Indonesian Standard SNI 1726-2012 standard. Seven time histories were implemented for non-linear analysis to study the performance of the structures. Parameters used to evaluate the performance namely base shear, inter-story drift, roof acceleration, degree of damage and energy dissipation resulting from the responses of these two types of FPS's both under design based and maximum credible earthquakes.

Keywords: Isolation system, Single friction pendulum system, Triple friction pendulum system, Response spectrum, Non-linear analysis, Design based earthquake, Maximum credible earthquake.

1. Pendahuluan

Penggunaan sistem isolasi dasar merupakan salah satu perkembangan dalam bidang rekayasa teknik sipil sebagai upaya proteksi struktur terhadap gempa, baik pada struktur yang baru direncanakan maupun perbaikan struktur yang sudah ada. Konsep penggunaan sistem isolasi dasar pada dasarnya untuk meningkatkan

perioda alami struktur dan memberikan tambahan redaman. Dengan demikian respon struktur akibat terkena eksitasi gempa dapat diminimalkan atau dihilangkan, baik untuk beban gempa desain, DBE, dengan perioda ulang 500 tahun maupun gempa kuat, MCE, dengan perioda ulang 2500 tahun. Hal ini dapat diketahui dari berkurangnya perpindahan antar lantai secara signifikan sebagai salah satu variabel respon struktur yang diobservasi.

Sistem isolasi dasar yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah *Friction Pendulum Systems* (FPS), tipe *single* dan *triple* pendulum. Cara kerja FPS mengikuti prinsip pendulum sederhana. Pada saat terjadi gempa, *slider* bergerak sesuai dengan permukaan lengkung yang dimiliki oleh FPS sehingga menaikkan perioda natural struktur. FPS juga memberikan tambahan redaman pada struktur melalui friksi yang terdapat pada permukaannya sehingga mampu mendisipasikan energi dari eksitasi gempa yang terjadi. Kedua hal tersebut menyebabkan respon struktur yang terjadi dapat direduksi karena gaya gempa yang masuk ke struktur dibatasi dengan adanya FPS ini. Sampai saat ini ada tiga jenis FPS yang sudah dikenal, yaitu *single* FPS (SFP), *double* FPS (DFP), dan *triple* FPS (TFP). Pengelompokan ini didasarkan pada jumlah permukaan yang dapat mendisipasikan energi. Pengembangan *multi-stage* FPS, seperti DFP dan TFP, diharapkan mampu memiliki kapasitas perpindahan relatif lebih besar daripada SFP.

Pada penelitian ini terdapat lima model struktur. Secara garis besar, kelima model tersebut didesain dengan penulangan utama yang sama, berupa penulangan dan proses mencari inputan elemen-elemen struktur yang akan dimasukkan kedalam program yang digunakan. Perbedaannya terdapat pada tipe FPS yang digunakan dan detailing terutama di daerah sendi plastis seperti yang tertera pada **Tabel 1** sebagai berikut.

Tabel 1. Model struktur penelitian

No	Jenis Model	Keterangan
1	<i>FIXED-BASE</i>	Struktur konvensional (tidak diberikan sistem isolasi) dengan sistem ganda Seismik Desain Kategori D SNI 1726-2012
2	<i>SFP-BASE</i> -Kekangan Momen Khusus	Struktur terisolasi dengan SFP dengan detailing kekangan khusus
3	<i>TFP-BASE</i> -Kekangan Momen Khusus	Struktur terisolasi dengan TFP dengan detailing kekangan khusus SNI 1726-2012
4	<i>SFP-BASE</i> -Kekangan Momen Menengah	Struktur terisolasi dengan SFP dengan detailing kekangan menengah SNI 1726-2012
5	<i>TFP-BASE</i> -Kekangan Momen Menengah	Struktur terisolasi dengan TFP dengan detailing kekangan menengah SNI 1726-2012

Tiga model pertama akan membandingkan kinerja dari SFP dan TFP pada bangunan konvensional tanpa isolasi dasar yang diberikan kekangan khusus. Respon struktur yang diobservasi adalah gaya geser dasar, perpindahan lantai, percepatan atap, kerusakan struktur berupa jumlah sendi plastis yang terjadi, dan juga energi yang didisipasi oleh kedua jenis FPS tersebut pada kondisi gempa desain dan gempa maksimum dengan target

perpindahan sistem isolasi yang menjadi variabel referensi. Desain awal FPS akan menggunakan analisis dinamik linear, yaitu menggunakan respon spektra sesuai dengan ketentuan SNI 1726-2012. Evaluasi kinerja akan dilakukan dengan menggunakan analisis dinamik nonlinear dari tujuh riwayat gempa, yang diperoleh dari website PEER Berkeley dengan menggunakan program Perform-3D. Penggunaan Perform-3D dimaksudkan agar dinding geser dapat didesain plastis dengan fasilitas elemen *fiber*. Tujuh riwayat gempa akan diskalakan terhadap respon spektra Jakarta kondisi tanah sedang dengan bantuan program EZ-FRISK 7.52 baik untuk perioda ulang 500 tahun (2/3 dari gempa kuat Jakarta) maupun untuk perioda ulang 2500 tahun (gempa respon spektra Jakarta).

Selain itu, pada penelitian ini akan dibahas pula mengenai pengaruh kekangan menengah yang digunakan pada mekanisme plastisitas kedua struktur terisolasi untuk gempa desain dan gempa kuat. Model sistem kekangan menengah baik untuk SFP maupun TFP memiliki spesifikasi geometri struktur, fungsi dan tingkat kepentingan bangunan yang sama dengan ketiga model sebelumnya.

2. Sistem Isolasi Dasar

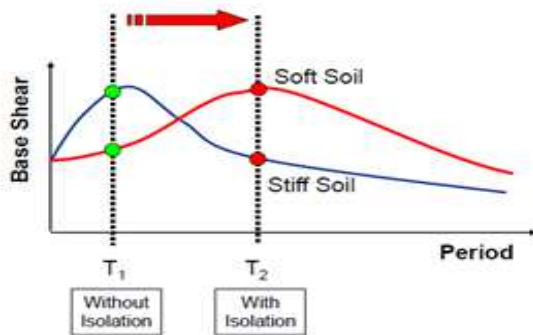
Selama beberapa dekade terakhir, desain struktur bangunan tahan gempa umumnya didasarkan pada konsep daktilitas. Daktilitas diharapkan dimiliki oleh struktur, misalnya, dengan mengaplikasikan mekanisme *strong column weak beam*. Namun performa struktur yang secara desain sudah memenuhi konsep daktilitas tersebut seringkali tidak memuaskan ketika dikenai beban gempa besar karena pada kenyataannya yang terjadi belum tentu sesuai dengan yang direncanakan. Mekanisme *strong column weak beam* bisa saja tidak tercapai dengan adanya keberadaan dinding pada struktur. Selain itu terdapat kesulitan pada saat proses konstruksi hubungan balok kolom karena kebutuhan tulangan pada join yang sedemikian kompleks (Wang, Y-P, 2002). Struktur yang direncanakan seperti ini apabila terkena beban gempa kuat akan mengalami plastisitas yang mengakibatkan simpangan antar lantai yang besar. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan pada struktur, bahkan sampai pada keruntuhan struktur. Untuk meningkatkan performa struktur terhadap gempa kuat, dikembangkan suatu teknik yang lebih efektif dan dapat diaplikasikan untuk desain seismik struktur sehingga kerusakan struktur dapat diminimalkan secara signifikan atau dapat dihindari.

Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah penggunaan sistem isolasi dasar yang merupakan sistem kontrol pasif yang dapat menjaga integritas struktur. Sistem ini dapat diadopsi untuk mendesain struktur baru, maupun perbaikan dari struktur eksisting. Strategi dari sistem isolasi dasar adalah

memberikan fleksibilitas lateral yang membantu mengurangi gaya gempa dengan mengubah perioda alami struktur untuk menghindari resonansi dengan frekuensi utama yang terkandung pada gempa yang terjadi. Selain itu, sistem isolasi dasar juga memberikan tambahan redaman pada struktur yang akan mengabsorpsi energi gempa pada saat terjadinya pergerakan pada sistem isolasi.

Penggunaan sistem isolasi dasar sangat efektif untuk bangunan tingkat rendah-medium yang berlokasi di tanah keras. Adanya sistem isolasi dasar pada bangunan tingkat tinggi menjadi tidak efektif karena perioda natural yang tinggi membuat percepatan gempa kecil walaupun tidak menggunakan sistem isolasi. Namun adanya pertimbangan lain seperti kenyamanan pengguna, bangunan penting yang harus tetap berfungsi pada saat dan setelah gempa, elemen non-struktural yang tidak rusak membuat adanya dorongan untuk mengembangkan penggunaan sistem isolasi dasar pada bangunan tingkat tinggi. Penggunaan sistem isolasi dasar pada struktur dengan perioda natural berkisar dari 1 sampai 3 detik dapat dilakukan dengan meningkatkan kekakuan struktur dengan memberikan bresing atau dinding geser pada struktur dan meningkatkan fleksibilitas dari sistem isolasi yang digunakan. (Jain dan Thakkar, 2004).

Penggunaan sistem isolasi juga dihindari pada kondisi tanah lunak karena kecenderungan gerakan tanah yang memiliki perioda lebih tinggi sehingga beramplifikasi dengan strukturnya. Oleh karena itu, sistem isolasi yang memiliki perioda fundamental tinggi tidak sesuai untuk kondisi tanah lunak (lihat **Gambar 1**).



Gambar 1. Ilustrasi penggunaan sistem isolasi kondisi Tanah Lunak (Kircher, 2006)

Secara umum, FPS memiliki dua karakteristik utama, yaitu *restoring force* dan gaya friksi statis yang dapat dilihat pada rumus umum sebagai berikut.

$$V = \mu N \operatorname{sgn}(\dot{D}) + \frac{N}{R} D \quad (1)$$

Keterangan:

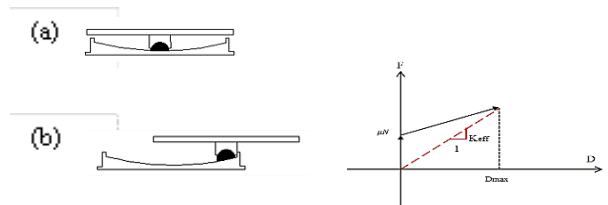
V : gaya geser dasar

M : koefisien friksi

D : perpindahan sistem dari posisi netral

Restoring force, komponen komponen N/R , akibat peningkatan massa struktur sesuai dengan pergerakan sepanjang permukaan gesernya yang memberikan kekakuan pada sistem pada saat bergerak. Gaya ini menyebabkan sistem dapat kembali ke posisi netral. Sedangkan komponen μN yang merupakan gaya friksi maksimum sebelum sistem bergerak dan bekerja akibat adanya gesekan pada permukaan geser sistem isolasi yang memberikan disipasi energi (Villaverde., 2009).

Selama induksi gempa, *slider* bergerak sepanjang permukaan lengkung sehingga menyebabkan struktur bergerak dengan gerakan pendulum. Pergerakan dari slider menghasilkan gaya friksi dinamik yang menyediakan redaman yang dibutuhkan untuk mengabsorpsi energi gempa. Mekanisme pergerakan SFP dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Idealisasi kurva histeretik bilinear SFP (SNI 1726-2012)

Sebagian besar dari sistem isolasi memiliki karakteristik perilaku nonlinear dan energi disipasi histeresis sehingga analisis nonlinear riwayat waktu digunakan untuk sistem terisolasi. Desain awal sistem isolasi dilakukan dengan cara linearisasi perilaku nonlinear menggunakan kekakuan linear ekuivalen (menggunakan modulus sekan) dan damping ratio ekuivalen.

Hubungan gaya dan deformasi dari SFP dapat diidealisasikan dengan model bilinear karena dapat merefleksikan karakteristik non-linear dari sistem. Perilaku non-linear dari sistem, dimodelkan dengan kurva histeresis bilinear dengan parameter kekakuan efektif dan rasio redaman efektif.

Walaupun sangat efektif pada desain awal, analisis linearisasi ekuivalen ini tidak selalu memberikan pendekatan yang baik. Hal ini disebabkan oleh kekakuan ekuivalen dan rasio redaman ekuivalen bervariasi tergantung dari karakteristik dan intensitas eksitasi, serta karakteristik sistem isolasi dan struktur. Selain itu, mensubstitusikan energi disipasi dengan redaman viskus ekuivalen melibatkan beberapa pendekatan yang mungkin tidak tepat karena damping ratio ekuivalen berdasarkan siklus deformasi komplit. Padahal eksitasi gempa terjadi tidak regular dan mengandung banyak siklus deformasi yang masih linier sehingga menghasilkan energi disipasi yang kecil. Dalam hal ini *damping ratio* ekuivalen yang diprediksi terlampaui besar dibandingkan dengan

energi disipasi aktual pada saat gempa. Permasalahan lainnya dengan linearisasi ekuivalen ini yaitu tidak dapat mengevaluasi efek dari *higher modes* sehingga meningkatkan akselerasi lantai akibat perilaku nonlinear sistem isolasi. Oleh sebab itu, analisis nonlinear harus dilakukan untuk memverifikasi desain yang menggunakan pendekatan linier. (Villaverde, 2009)

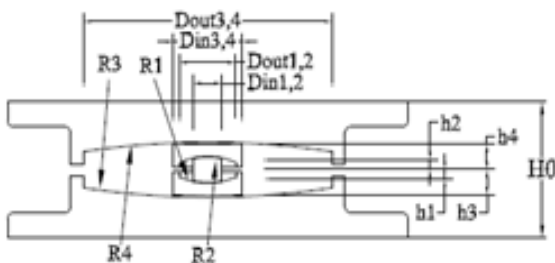
Dengan pemodelan secara bilinear, kekakuan efektif didefinisikan sebagai kekakuan sekan yang diperoleh dengan menghubungkan titik perpindahan positif dan negatif maksimum pada kurva gaya dan perpindahan. (Villaverde, 2009)

$$K_{eff} = \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{D_{max}} \right) N \quad (2)$$

Rasio redaman efektif merupakan representasi dari redaman yang dihasilkan oleh SFP melalui perilaku histeretiknya, yaitu gesekan yang terjadi pada permukaannya. Rasio redaman efektif merupakan perbandingan energi yang didisipasikan dengan energi regangan elastik (*strain energy*) (Villaverde, 2009).

$$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\mu}{\mu + \frac{D_{max}}{R}} \right) \quad (3)$$

Isolasi dasar TFP terdiri dari rangkaian tumpuan permukaan lengkung sebanyak empat buah dengan tiga mekanisme pendulum yang bebas satu sama lain. Mekanisme pendulum yang pertama yaitu *inner sliders* yang kedua permukaannya memiliki friksi yang paling kecil. Mekanisme ini mendefinisikan properti sistem pada kondisi eksitasi kecil. Permukaan bawah dari *outer plates* yang memiliki jari-jari kurvatur tertentu membentuk mekanisme pendulum kedua yang mendefinisikan properti utama dari sistem dengan beban eksitasi sedang. Sedangkan permukaan atas *outer plates* akan membentuk mekanisme pendulum yang ketiga. Elemen ini memiliki koefisien friksi yang paling besar untuk menghindari pergerakan sampai terjadinya gempa ekstrim. Adanya variasi dari karakteristik friksi ini memungkinkan adanya optimasi terhadap performa struktur terisolasi berdasarkan *multiple levels* dari gempa.

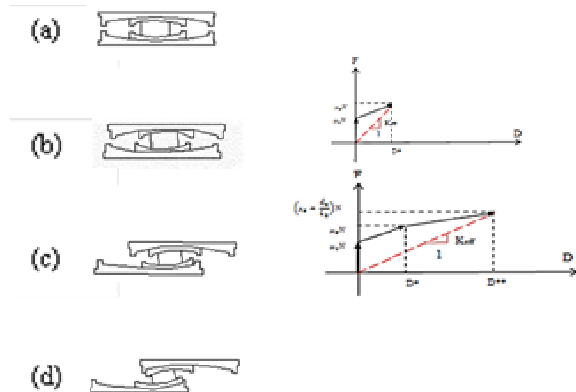


Gambar 3. Properti Elemen-elemen TFP (Morgan dan Mahin, 2011)

Umumnya, kedua permukaan pada *inner sliders* memiliki koefisien friksi dan radius kurvatur yang sama ($\mu_1 = \mu_2, R_1 = R_2$) dan kedua permukaan *outer plates* memiliki radius kurvatur yang sama ($R_3 = R_4$) dengan μ_3 lebih kecil atau sama dengan μ_4 . Pada penelitian ini, karakteristik TFP yang digunakan akan disederhanakan. TFP desain memiliki kriteria $R_1 = R_2, R_3 = R_4$; dan koefisien friksi $\mu_1 = \mu_2, \mu_3 = \mu_4$.

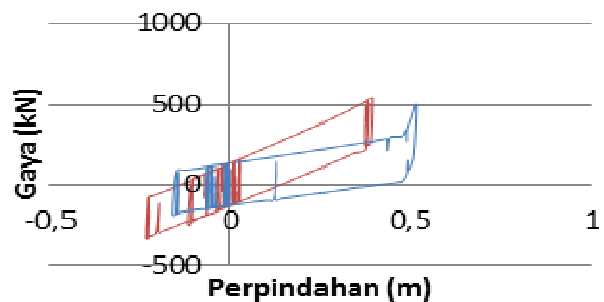
Pergeseran pada kedua permukaan dalam *inner sliders* dimulai pada saat gaya lateral yang bekerja melebihi gaya friksi terkecil yang dimiliki oleh *inner sliders* tersebut, tercapai. Pada saat gaya geser yang terjadi melebihi tahanan geser permukaan 3 dan 4, maka pergerakan pada permukaan 3 dan 4 diinisiasi sehingga pergerakan pada permukaan 1 dan 2 terhenti. Transisi menuju tahapan ketiga terjadi pada pergerakan pada permukaan 3 dan 4 terhenti karena dibatasi oleh *restrainer*. Apabila *outer slider* telah menyentuh dengan kedua *restrainer* maka pergerakan hanya dapat terjadi pada permukaan dalam *inner slider*.

Mekanisme pergerakan TFP yang didesain dapat dilihat sebagai berikut.

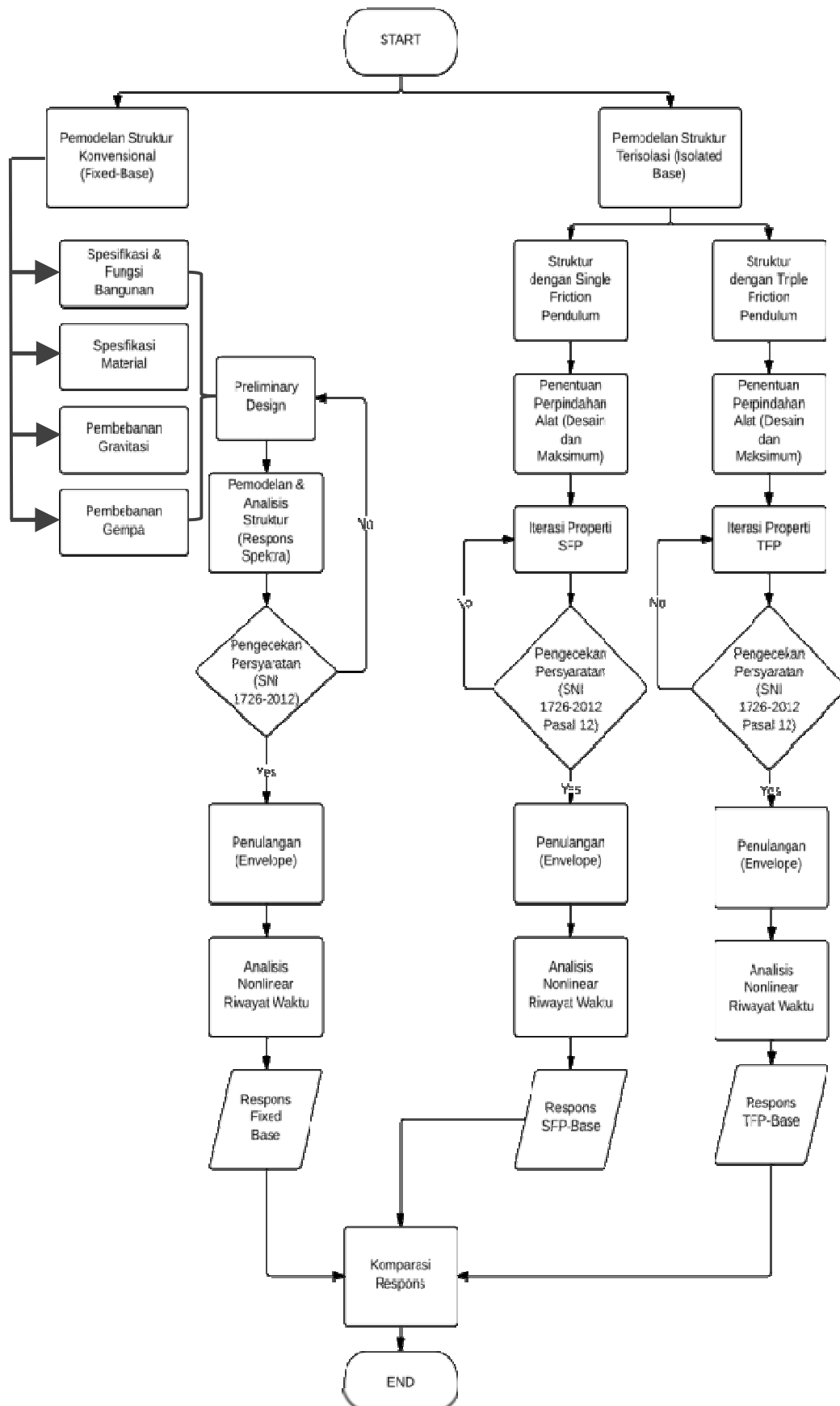


Gambar 4. Mekanisme pergerakan TFP desain (Becker, 2011)

Berikut ini diberikan contoh perilaku bilinear sistem isolasi yang direpresentasikan dengan kurva histeresis dari bangunan terisolasi dengan SFP dan TFP yang dikenai beban gempa Kobe yang diskalakan terhadap gempa maksimum wilayah Jakarta tanah sedang.



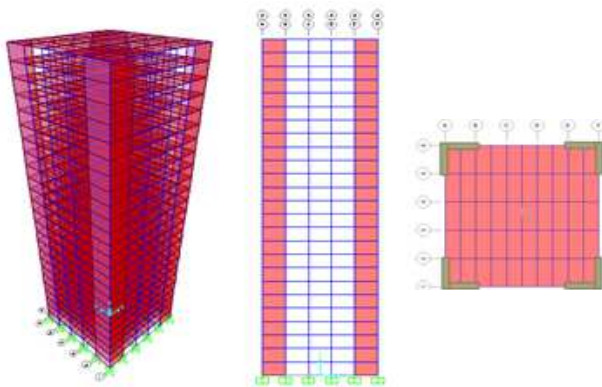
Gambar 5. Kurva histeresis sistem terisolasi SFP dan TFP (Gempa Kobe diskalakan terhadap Gempa Maksimum Jakarta Tanah Sedang)



Gambar 6. Diagram alir penelitian

3. Metode Penelitian

Pada penelitian ini terdapat lima buah model struktur gedung beton bertulang (f_c' kolom = 30 MPa, f_c' balok = 28 MPa, tulangan dengan $f_y = 400$ MPa dan $f_u = 500$ MPa) yang memiliki spesifikasi struktur baik denah lantai, jumlah lantai, tinggi lantai, fungsi dan tingkat kepentingan bangunan yang sama. Secara umum, model yang digunakan merupakan gedung perkantoran 25 lantai @ 3,8 meter. Dari gambar di bawah ini dapat dilihat bahwa elemen rangka terdiri dari balok induk arah x, balok induk arah y, balok anak arah y. Spasi balok, baik arah x maupun arah y, sebesar 5 @ 6 meter. Balok anak arah y dipasang di tengah-tengah spasi antar balok induk. Denah seperti ini dipilih karena bentuk strukturnya baik dan sangat sesuai untuk bangunan yang direncanakan tahan gempa karena simetris baik ke arah x dan arah y. Posisi dinding geser berada pada sudut-sudut bangunan.



Gambar 7. Tampak 3-D (kiri), potongan (tengah), dan denah (kanan) model struktur

Berikut ini adalah ukuran penampang elemen-elemen yang digunakan pada pemodelan.

Tabel 2. Ukuran penampang elemen

Elemen	Penampang		
	b (m)	h (m)	
Atap	0.3	0.6	
Balok	Lantai	0.3	0.6
	Atap Perimeter	0.3	0.7
	Lantai Perimeter	0.3	0.7
	Anak (Arah-y)	0.2	0.4
Kolom	1 -> 4	1.1	1.1
	5 -> 7	1	1
	8 -> 10	0.9	0.9
	11 -> 13	0.85	0.85
	14 -> 16	0.75	0.75
	17 -> 19	0.65	0.65
	20 -> 25	0.5	0.5
Shear Wall Boundary	1 -> 5	1.1	1.1
	6 -> 15	1	1
	16 -> 25	0.75	0.75

Pembebanan gempa kuat yang digunakan berupa respon spektra Jakarta tanah sedang dengan standar SNI 1726-2012 (untuk desain awal FPS yang digunakan) dan tujuh buah riwayat gempa yang diskalakan terhadap spektra wilayah Jakarta dengan jenis tanah sedang (untuk analisis non linier riwayat waktu). Pada penelitian ini diperhitungkan pula pengaruh gempa vertikal untuk desain dengan memasukkannya ke dalam kombinasi pembebanan yang digunakan.

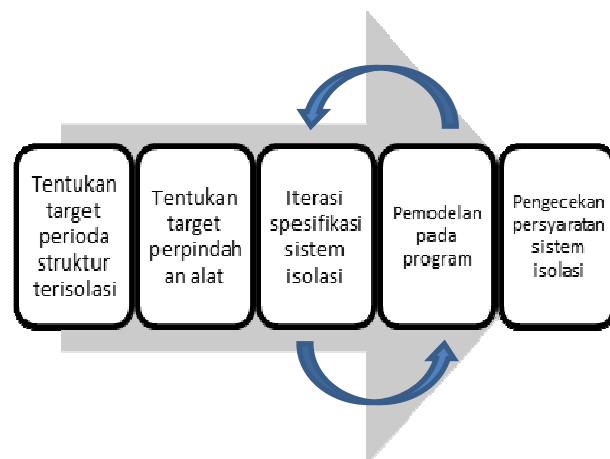
Sesuai dengan SNI 1726-2012 Pasal 12, yang diuraikan pada subbab III.4.2 poin 5, evaluasi penggunaan sistem isolasi akan menggunakan tujuh jenis riwayat gempa yang diskalakan terhadap spektra Jakarta dengan kondisi tanah sedang, yaitu.

Tabel 3. Gempa riwayat waktu yang digunakan (peer. berkeley)

ELC180	Imperial Valley I
CHY080	Chi Chi, Taiwan
KJM000	Kobe
TAR360	Northridge
CLS500	Loma Prieta
CYC285	Morgan Hill
LUL000	Mammoth Lakes

Penskalaan gempa desain dan gempa kuat menggunakan program EZ-FRISK. Program ini menyesuaikan riwayat gempa asli dengan spektra target, yaitu spektra gempa kuat Jakarta kondisi tanah sedang dengan perioda ulang 2500 tahun. Penskalaan dengan menggunakan program ini merubah karakteristik dari riwayat gempa asli setelah disesuaikan dengan spektra target berupa perubahan amplitudo untuk setiap nilai frekuensi tidak teratur.

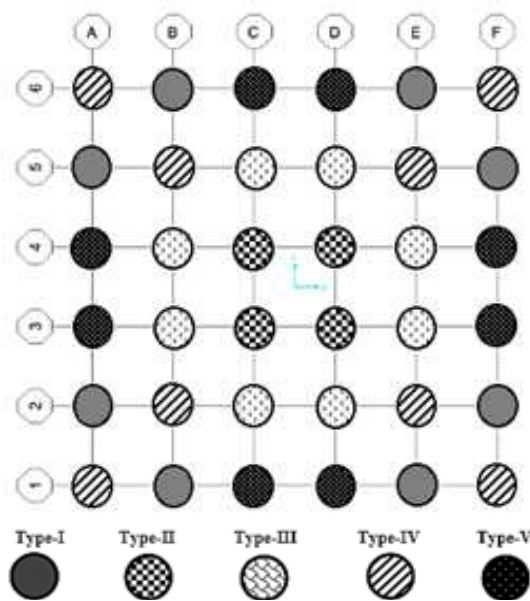
Sistem isolasi yang digunakan pada penelitian ini adalah SFP dan TFP. Secara garis besar, urutan proses desain sistem isolasi akan dijabarkan sebagai berikut seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Alir desain sistem isolasi dasar

Berdasarkan gambar di atas, langkah awal adalah menentukan besarnya perpindahan alat yang akan menjadi target. Dengan memasukkan properti alat berupa nilai radius kurvatur dan koefisien friksi, akan diperoleh besar kekakuan efektif dan rasio redaman efektif. Kedua besaran ini merupakan input penting dalam desain awal sistem isolasi, baik SFP maupun TFP. Parameter-parameter linear yang diinput adalah kekakuan efektif dan rasio redaman efektif dengan menggunakan analisis respon spektra. Pada proses desain awal ini akan dilakukan dua jenis iterasi. Iterasi pertama dengan menentukan properti alat, radius dan koefisien friksi, terlebih dahulu. Dengan properti tersebut, akan diiterasi perpindahan alat sampai konvergen. Apabila perpindahan alat yang sudah konvergen belum sesuai dengan target perpindahan, maka properti alat akan diiterasi kembali. Properti alat akan diiterasi sehingga menghasilkan perpindahan sistem isolasi sesuai dengan target.

Struktur konvensional akan dipasang lima tipe FPS yang disesuaikan terhadap porsi berat struktur yang dipikulnya. Baik struktur dengan SFP maupun TFP, pembagian tersebut dapat dilihat sebagai berikut



Gambar 9. Denah pemasangan FPS

Sebagian besar dari sistem isolasi memiliki karakteristik perilaku nonlinear dan energi disipasi histeresis sehingga analisis nonlinear sesuai digunakan untuk sistem terisolasi. Desain awal sistem isolasi akan lebih mudah apabila perilaku nonlinear ini dilinearisasi menggunakan kekakuan linear ekuivalen dan *damping ratio* ekuivalen sehingga dapat dianalisis secara linear. Hubungan gaya dan deformasi dari FPS dapat diidealisasikan dengan model bilinear karena dapat merefleksikan karakteristik non-linear dari sistem. Perilaku non-linear dari sistem dimodelkan dengan kurva histeresis bilinear dengan parameter kekakuan efektif dan rasio redaman efektif.

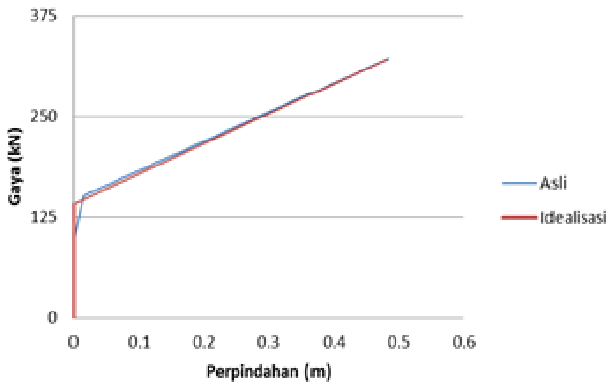
Walaupun sangat berguna dalam desain awal, analisis linearisasi ekuivalen ini tidak selalu memberikan pendekatan yang baik. Hal ini disebabkan oleh kekakuan ekuivalen dan rasio redaman ekuivalen bervariasi tergantung dari karakteristik dan intensitas eksitasi, serta karakteristik sistem isolasi dan struktur. Selain itu, mensubstitusikan energi disipasi dengan redaman viskus ekuivalen melibatkan beberapa pendekatan yang mungkin tidak tepat. Misalnya, konsep *damping ratio* ekuivalen berdasarkan siklus deformasi komplit. Padahal eksitasi gempa terjadi tidak regular mengandung banyak siklus deformasi yang sebentar sehingga menghasilkan energi disipasi yang kecil. Dalam hal ini *damping ratio* ekuivalen yang diprediksi terlampau besar dibandingkan dengan energi disipasi aktual pada saat gempa. Permasalahan lainnya dengan linearisasi ekuivalen ini yaitu tidak dapat mengevaluasi efek dari higher modes sehingga meningkatkan akselerasi lantai akibat perilaku nonlinear sistem isolasi. Oleh karena itu, analisis nonlinear tetap diperlukan.

Target perpindahan alat adalah 0,16 meter dengan menggunakan spektra Jakarta pada kondisi tanah sedang. Setelah melalui proses iterasi sampai didapatkan perpindahan alat yang sesuai dengan target, maka properti (radius kelengkungan alat dan koefisien friksi) dari kelima SFP yang digunakan dan parameter-parameter linear (kekakuan efektif dan rasio redaman efektif) yang digunakan adalah sebagai berikut.

Tabel 4. Properti dan parameter linear SFP

Type SFP	N (kN)	Keff (kN/m)	βeff (%)
I	5069.540	1357.913	29.709
II	6670.170	1786.653	
III	6991.050	1872.603	
IV	7254.000	1943.036	
V	7939.890	2126.756	

Hubungan gaya-perpindahan untuk FPS pada Perform-3D hanya bisa mengakomodasi sampai kurva trilinear. Oleh karena itu, untuk memodelkan TFP yang memiliki hubungan lebih kompleks karena tahapan pergerakan yang dimilikinya lebih banyak tersebut perlu dilakukan modifikasi terhadap kurva hubungan gaya-perpindahan asli agar dapat dimodelkan pada Perform-3D. Penyesuaian yang dilakukan adalah melakukan bilinearisasi dengan menyamakan luas di bawah kurva asli dengan luas di bawah kurva idealisasi dengan mengiterasi nilai N sehingga didapatkan nilai N'. Nilai N' ini akan digunakan untuk mencari R ekuivalen. Jari-jari kelengkungan yang akan diinputkan pada Perform-3D merupakan nilai R ekuivalen yang dikalikan dua. Hal ini disebabkan karena pemodelan TFP menggunakan properti dari SFP dengan kemiringan kurva hubungan gaya-perpindahannya 1/R. Sedangkan kemiringan kurva gaya-perpindahannya untuk TFP adalah 1/2R. Berikut ini diberikan contoh bilinearisasi untuk kurva hubungan gaya-perpindahan dari TFP Tipe I yang digunakan.



Gambar 10. Bilinearisasi hubungan gaya-perpindahan tfp tipe i

Berikut ini merupakan properti TFP dan parameter-parameter linear yang digunakan setelah dilakukan bilinearisasi.

Tabel 5. Properti dan parameter linear TFP

Permukaan	R (m)	H (m)	L (m)	μ	D_{out} (m)	D_{in} (m)	D_{max} (m)
1	1	0.3	0.7	0.02	0.4	0.1	0.10
2							5
3	7.5	0.5	7	0.03	1	0.5	0.23
4							3

Tipe TFP	N (kN)	K_{eff} (kN/m)	β_{eff} (%)
I	5069.540	1280.964	
II	6670.170	1685.409	
III	6991.050	1766.489	31.494
IV	7254.000	1832.930	
V	7939.890	2006.240	

4. Analisis dan Pembahasan

Pada bagian ini, akan ditampilkan data pengolahan akhir yang merupakan output rata-rata dari seluruh output yang dihasilkan oleh setiap riwayat gempa terskala yang digunakan (terdapat tujuh buah riwayat gempa sehingga hasil akhir merupakan rata-rata dari hasil analisis ketujuh riwayat gempa tsb). Secara garis besar, ada beberapa pengaruh penggunaan sistem isolasi yang akan dibahas, yaitu perubahan karakteristik dinamik struktur (pergeseran perioda struktur dan perubahan *Modal Mass Participation Factor* atau MMPF), perbandingan respon struktur akibat penggunaan SFP dan TFP (perbandingan energi disipasi, perpindahan alat, dan redaman efektif), dan perbaikan terhadap respon struktur (gaya geser dasar, perpindahan lantai, perpindahan antar-lantai, percepatan atap, dan kerusakan struktur).

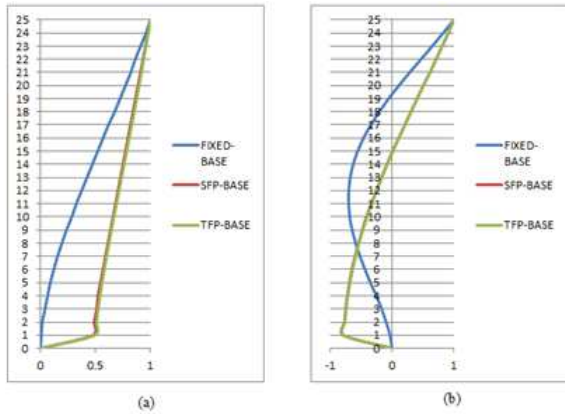
Tabel 6. Perbandingan karakteristik dinamik struktur konvensional dan struktur terisolasi

Fixed Base					
Mode	Perioda Struktur	MMPF			
		X	Y	Z	
1	2.791	63.816	0.000	0	
2	2.763	0.000	63.898	0	
3	1.722	0.000	0.000	0	
4	0.715	18.049	0.000	0	
5	0.712	0.000	17.989	0	
6	0.409	0.000	0.000	0	
7	0.320	7.405	0.000	0	
8	0.319	0.000	7.392	0	
9	0.187	3.715	0.000	0	
10	0.187	0.000	3.711	0	
11	0.181	0.000	0.000	0	
12	0.129	2.082	0.000	0	

SFP Base					
Mode	Perioda Struktur	MMPF			
		X	Y	Z	
1	4.793	95.046	0.000	0	
2	4.772	0.000	95.214	0	
3	4.157	0.000	0.000	0	
4	1.554	4.846	0.000	0	
5	1.541	0.000	4.846	0	
6	1.084	0.000	0.000	0	
7	0.544	0.098	0.000	0	
8	0.542	0.000	0.096	0	
9	0.314	0.000	0.000	0	
10	0.268	0.007	0.000	0	
11	0.267	0.000	0.007	0	
12	0.164	0.001	0.000	0	

TFP Base					
Mode	Perioda Struktur	MMPF			
		X	Y	Z	
1	4.880	95.427	0.000	0	
2	4.860	0.000	95.586	0	
3	4.257	0.000	0.000	0	
4	1.567	4.476	0.000	0	
5	1.554	0.000	4.320	0	
6	1.089	0.000	0.000	0	
7	0.545	0.088	0.000	0	
8	0.543	0.000	0.086	0	
9	0.314	0.000	0.000	0	
10	0.268	0.006	0.000	0	
11	0.267	0.000	0.006	0	
12	0.164	0.001	0.000	0	

Penggunaan FPS menambah fleksibilitas lateral struktur dengan menggeser perioda alami dari struktur tersebut. Selain menaikkan perioda struktur, FPS juga memberikan tambahan redaman yang cukup besar. Dengan adanya perbesaran perioda struktur dan tambahan redaman, gaya gempa yang mengenai struktur akan berkurang. Selain itu, penggunaan FPS juga menyebabkan mode ke-1 struktur menjadi dominan dengan perubahan faktor partisipasi modal dari struktur konvensional yang di bawah 65% menjadi diatas 95%. Mengecilnya kontribusi dari *higher modes* menyebabkan karakteristik dinamik struktur menjadi lebih baik karena pengaruh mode-mode lebih tinggi yang menghasilkan respon yang tidak beraturan menjadi dapat diabaikan dengan adanya sistem isolasi dasar.



Gambar 11. Perbandingan mode shapes struktur konvensional dan struktur terisolasi (a) mode ke-1; (b) mode ke-2

Sistem isolasi bekerja pada mode dominan dari struktur. Berdasarkan gambar bagian (a) di atas, dapat dilihat bahwa deformasi struktur pada mode ke-1 dari struktur terisolasi lebih tegak daripada struktur terjepit dengan deformasi besar terpusat pada level sistem isolasinya (struktur atas bergerak mendekati badan kaku). Sehingga dapat dikatakan bahwa pengaruh sistem isolasi terlihat pada mode ke-1 yang merupakan mode dominan struktur. Sebaliknya, dari gambar bagian (b) deformasi struktur pada mode ke-2 memiliki magnitude yang sama dengan deformasi dari sistem isolasi pada arah berlawanan. Dengan kata lain, struktur sudah memiliki kontribusi perpindahan pada mode-mode yang lebih tinggi.

Tabel berikut ini memberikan gambaran perbandingan SFP dan TFP yang digunakan.

Tabel 7. Perbandingan energi disipasi, perpindahan alat, dan redaman efektif dari SFP dan TFP

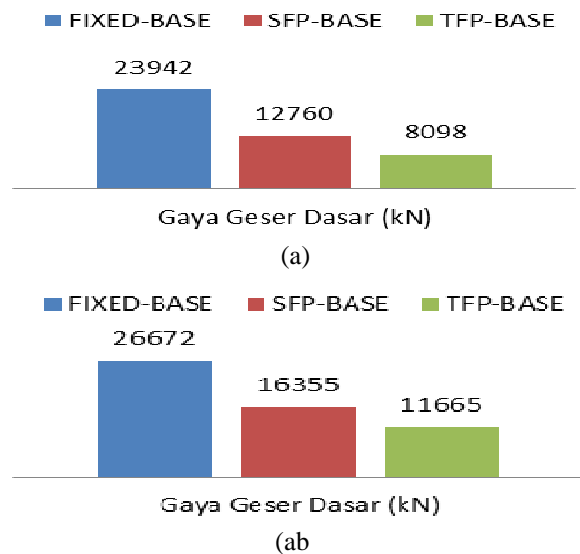
Gempa 500 Tahun	SFP	TFP
Energi Disipasi Alat (%)	99.96	100.00
Perpindahan Alat (mm)	239.85	287.38
Redaman Efektif (%)	21.06	27.40
Gempa 2500 Tahun	SFP	TFP
Energi Disipasi Alat (%)	98.73	99.75
Perpindahan Alat (mm)	398.19	470.41
Redaman Efektif (%)	15.06	21.99

Dari tabel di atas, baik untuk kondisi gempa desain maupun gempa maksimum, dapat dilihat bahwa TFP mendisipasikan energi lebih banyak dari SFP (energi disipasi yang ditampilkan merupakan perbandingan terhadap energi disipasi inelastis). Energi input dari gempa yang mengenai struktur akan diubah menjadi energi kinetik, *strain energy*, energi viskus Alpha-M yang merupakan komponen massa pada redaman Rayleigh, energi viskus Beta-K yang merupakan redaman elastik dari kekakuan pada redaman Rayleigh, dan energi disipasi inelastis), walaupun perbedaannya tidak signifikan. Hal ini disebabkan karena permukaan

gesek yang dimiliki oleh TFP lebih banyak sehingga redaman efektifnya juga lebih besar. Sehingga, untuk gempa kuat perbedaan energi disipasi keduanya akan lebih signifikan. Hal ini dapat terlihat dari redaman efektif TFP yang lebih besar dari SFP.

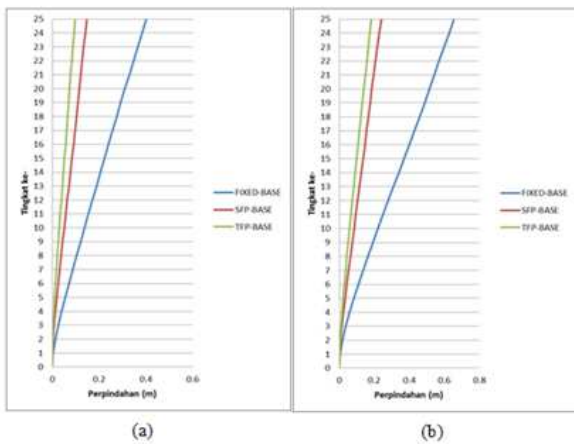
Dari tabel di atas juga dapat dilihat perpindahan FPS yang digunakan akibat ketujuh riwayat gempa yang diskalakan untuk kondisi desain, yaitu perpindahan SFP sebesar 239.85 mm dan perpindahan TFP sebesar 287.38 mm. Perpindahan yang terjadi dengan analisis nonlinear riwayat waktu lebih besar daripada perpindahan pada saat desain (160 mm) karena perpindahan desain menggunakan asumsi ideal di mana beban siklik akibat gempa yang terjadi memberikan kurva histeretik yang simetris. Sedangkan kurva histeresis aktual tidak simetris.

Perpindahan TFP lebih besar dari SFP karena kemiringan kurva histeretis TFP lebih landai dengan jari-jari kelengkungan yang lebih besar daripada SFP. Akibat adanya perbesaran perioda struktur dan tambahan redaman gaya gempa yang mengenai struktur akan berkurang. Hal ini dapat dilihat dari menurunnya gaya geser dasar yang terjadi sebagai salah satu reaksi pada struktur yang diamati akibat gempa (lihat Gambar 12).



Gambar 12. Perbandingan gaya geser dasar (kN) struktur konvensional dan struktur terisolasi (a) Gempa Desain; (b) Gempa Maksimum

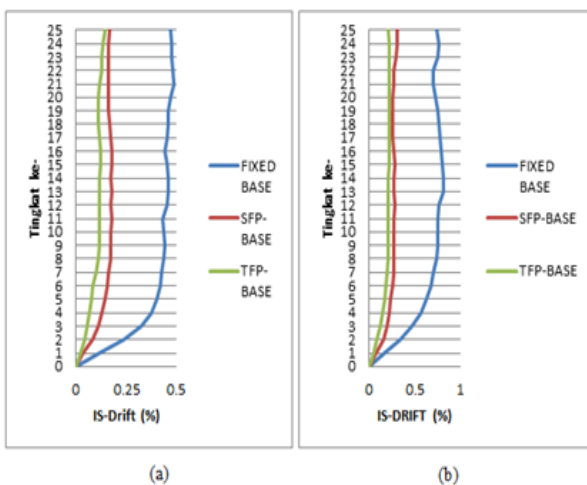
Berdasarkan **Gambar 12** di atas, untuk kondisi gempa desain, penggunaan SFP mengurangi gaya geser puncak pada struktur konvensional sebesar 46.70%, sedangkan penggunaan TFP mengurangi sebesar 66.18%. Untuk kondisi gempa maksimum, penggunaan SFP mengurangi gaya geser puncak pada struktur konvensional sebesar 38.68%, sedangkan penggunaan TFP mengurangi sebesar 56.26%.



Gambar 13. Perbandingan perpindahan lantai (m) Struktur Konvensional dan Struktur Terisolasi (a) Gempa Desain; (b) Gempa Maksimum

Dengan gaya geser dasar yang menurun, respon struktur lainnya pun akan mengecil. Perpindahan lantai yang terjadi pada struktur terisolasi mengecil secara signifikan dibandingkan dengan struktur konvensional, seperti yang terlihat pada **Gambar 13**.

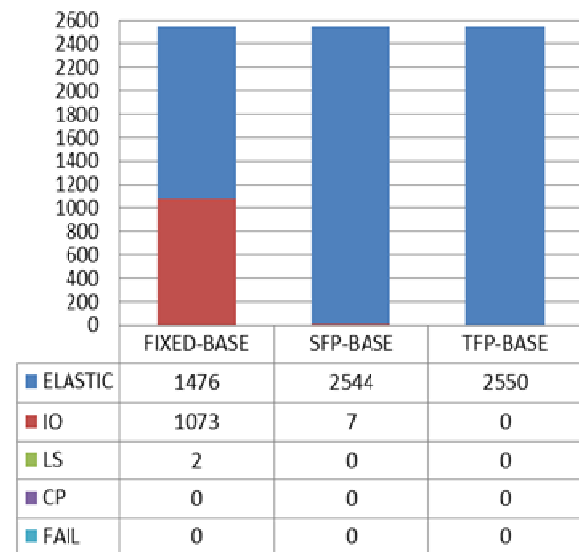
Dari kedua grafik di atas, dapat dilihat bahwa pemasangan FPS dapat mengurangi perpindahan lantai dari struktur konvensional. Model yang memiliki TFP memberikan perpindahan lantai yang lebih kecil dibandingkan dengan model yang memiliki SFP. Pada kondisi gempa desain, penggunaan SFP mengurangi perpindahan atap sebesar 63.35% dari perpindahan atap struktur konvensional, sedangkan penggunaan TFP mengurangi perpindahan atap sebesar 75.55%. Sedangkan untuk kondisi gempa maksimum, penggunaan SFP mengurangi perpindahan atap sebesar 63.29% dari perpindahan atap struktur konvensional, sedangkan penggunaan TFP mengurangi perpindahan atap sebesar 72.28%.



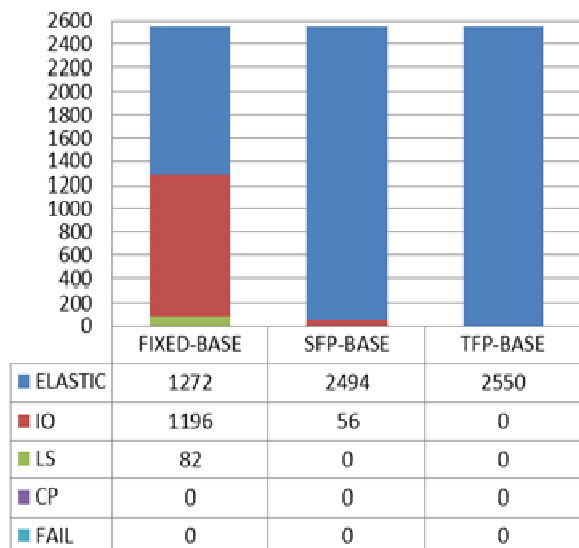
Gambar 14. Perbandingan perpindahan antar-lantai (m) Struktur konvensional dan struktur terisolasi (a) Gempa Desain; (b) Gempa Maksimum

Baik untuk kondisi gempa desain, maupun gempa maksimum, sistem isolasi dapat memperbaiki perpindahan antar-lantai yang terjadi. Sedangkan model struktur yang dipasang TFP memiliki perpindahan antar-lantai yang lebih kecil dibandingkan dengan model struktur yang dipasang SFP. Perpindahan antar-lantai yang semakin kecil membuat struktur seolah-olah bergerak seperti badan kaku terhadap sistem isolasinya sehingga rotasi yang terjadi setiap lantai akan mengecil yang menyebabkan tingkat kerusakan yang terjadi akan berkurang.

Selain itu, dengan mengecilnya perpindahan antar-lantai maka kerusakan struktur pun berkurang secara signifikan. Hal ini dapat diamati pada level kinerja dari struktur (lihat **Gambar 15**).



(a)

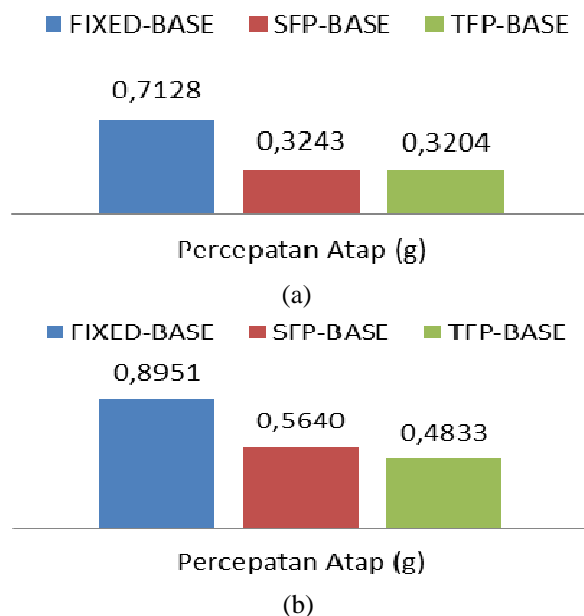


(b)

Gambar 15. Perbandingan jumlah sendi plastis struktur konvensional dan struktur terisolasi (a) Gempa Desain; (b) Gempa Maksimum

Dari **Gambar 15** dapat dilihat pada kondisi gempa desain, kondisi awal dari struktur konvensional memiliki level Performa di *immediate occupancy* (walaupun terdapat dua buah sendi plastis yang berada pada level *life safety* akibat gempa Kobe yang merupakan gempa riwayat waktu dengan puncak percepatan gempa yang berdekatan dalam durasi yang cukup panjang), penggunaan FPS membuat struktur terisolasi berada pada kondisi elastik penuh (walaupun terdapat empat buah sendi plastis yang berada pada level *immediate occupancy* akibat gempa Kobe). Sedangkan pada kondisi gempa maksimum, kondisi struktur konvensional berada pada level Performa *life safety*. Dengan pemasangan FPS, struktur terisolasi berada pada level *immediate occupancy*.

Berikut ini adalah perbandingan percepatan atap maksimum yang terjadi pada struktur untuk struktur konvensional dan struktur terisolasi (lihat **Gambar 16**).



Gambar 16. Perbandingan percepatan atap (g) struktur konvensional dan struktur terisolasi (a) Gempa Desain; (b) Gempa Maksimum

Percepatan atap dengan pada struktur terisolasi juga berkurang sehingga pemasangan FPS dapat menambah tingkat kenyamanan penghuni. Dari kedua grafik di atas, dapat dilihat bahwa pemasangan FPS dapat mengurangi percepatan yang bekerja pada atap struktur konvensional. Untuk kondisi gempa desain, penggunaan SFP mengurangi percepatan atap puncak pada struktur konvensional sebesar 54.51%, sedangkan penggunaan TFP mengurangi sebesar 55.05%. Untuk kondisi gempa maksimum, penggunaan SFP mengurangi percepatan atap puncak pada struktur konvensional sebesar 36.99%, sedangkan penggunaan TFP mengurangi sebesar 46.00%.

Secara umum, penggunaan TFP pada struktur memberikan respon struktur beton bertulang yang terjadi akibat gempa, lebih kecil dibandingkan dengan SFP. Keunggulan TFP akan lebih signifikan pada kondisi bangunan yang dikenai gempa kuat dimana penggunaan SFP sudah tidak menjadi pilihan. Hal ini disebabkan karena jari-jari kelengkungan SFP yang dibutuhkan terlalu besar sehingga mirip dengan flat friction bearing dengan berkurangnya kemampuan recentring atau kembalinya sistem ke posisi netral setelah gempa berhenti. Apabila sistem tidak kembali ke posisi netral, maka pada gempa berikutnya yang datang akan mengurangi kapasitas deformasi yang dimiliki oleh sistem tersebut. Struktur dengan isolasi dasar akan bergerak seperti badan kaku pada saat terjadi gempa kuat sehingga perpindahan antar lantai menjadi insignifikan. Dengan demikian penambahan gaya-gaya dalam menjadi lebih kecil dibandingkan struktur konvensional sehingga mengakibatkan kerusakan yang lebih kecil dan level kenyamanan untuk pengguna gedung akan meningkat.

Perubahan kekangan dari kekangan khusus menjadi menengah, pada struktur yang terisolasi tidak menyebabkan perubahan berarti pada respon non linier (plastisitas) pada struktur yang diamati, yaitu tidak ada perubahan yang signifikan pada gaya geser dasar yang bekerja pada struktur, perpindahan lantai, perpindahan antar-lantai, percepatan atap, dan tingkat kerusakan yang terjadi pada struktur. Penggunaan sistem isolasi, seperti FPS, menyebabkan kebutuhan kekangan dapat dikurangi. Perbedaan kekangan yang digunakan memberikan perbedaan daktilitas yang dimiliki oleh elemen-elemen untuk struktur. Kekangan khusus membuat struktur menjadi lebih daktil daripada struktur yang memiliki kekangan menengah. Dengan adanya sistem isolasi dapat dilihat bahwa perpindahan antar-lantai menjadi lebih kecil dari struktur konvensional sehingga struktur keseluruhan bergerak seperti badan kaku dibandingkan dengan sistem isolasinya. Hal ini menyebabkan rotasi yang terjadi sangat kecil. Struktur pun berada pada kondisi masih elastik untuk kondisi gempa desain dimana tidak ada keperluan struktur untuk mengembangkan daktilitasnya. Dengan demikian struktur dengan isolasi dasar dapat menggunakan kekangan level menengah yang secara kuantitas akan mengurangi jumlah kekangan secara signifikan bila digunakan system kekangan khusus seperti yang disyaratkan pada sistem struktur konvensional. Pemberian kekangan menengah atau kekangan biasa ini sebagai proteksi tambahan apabila gempa yang terjadi lebih besar dari yang direncanakan.

5. Kesimpulan

1. Secara umum, TFP yang dipasang pada gedung beton bertulang akan memberikan respons struktur yang lebih baik daripada gedung yang menggunakan SFP, terutama pada saat terjadinya gempa kuat.

2. Perubahan kekangan dari kekangan khusus menjadi menengah, pada struktur yang terisolasi tidak menyebabkan perubahan berarti pada respon non linier (plastisitas) pada struktur yang diamati. Penggunaan sistem isolasi, seperti FPS, menyebabkan kebutuhan kekangan dapat dikurangi.
3. Penggunaan sistem isolasi pada struktur konvensional memudahkan dalam proses desain struktur atas karena prosedur untuk merencanakan struktur terisolasi lebih fleksibel, terutama apabila sudah menggunakan analisis nonlinear riwayat waktu gempa. Apabila dengan penggunaan sistem isolasi masih terdapat kerusakan pada struktur dapat diatasi dengan memperkuat daerah kerusakan secara setempat, memvariasikan nilai R yang digunakan (antara 1 sampai dengan 2), atau mengganti properti sistem isolasi.

Wang Y-P., 2002, *Fundamentals of Seismic Base Isolation*. International Training Taiwan: Programs for Seismic Design of Building Structures.

Daftar Pustaka

- Becker, T.C., 2011, *Advanced Modeling of the Performance of Structures Supported on Triple Friction Pendulum Bearings*. Berkeley: University of California.
- CSI Perform-3D, 2012, *Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures V.5.0.0*. Computer and Science, Inc. S/N: CIFB FBY21526JER License owned by Prof. Bambang Budiono of ITB.
- EZ-FRISK 7.52, 2013, Licensed Owned by I Wayan Sengara, Ph.D, of ITB.
- <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>, 5 Maret 2015.
- Jain, S., dan Thakkar, S., 2004, *Application of Base Isolation for Flexible Buildings*. Canada: 13th World Conference on Earthquake
- Kircher, C., 2006, *Seismically Isolated Structures* (FEMA 451, Chapter 11). Washington DC.: National Institute of Building Sciences.
- Morgan, T.A. dan Mahin, S.A., 2011, *The Use of Base Isolation Systems to Achieve Complex Seismic Performance Objectives*, Berkeley: PEER Report 2011/06.
- SNI 1726-2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*.
- Villaverde, R., 2009, *Fundamental Concepts of Earthquake Engineering*, Boca Raton: CRC Press.