



TESIS - RC142501

**STUDI PERBANDINGAN PENGGUNAAN *FRICTION*
PENDULUM BEARING DAN *LEAD RUBBER*
BEARING PADA STRUKTUR *LIGHT RAIL TRANSIT***

SANTI NURAINI

NRP. 03111650020006

DOSEN PEMBIMBING :

Prof.Priyo Suprobo, MS.,Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



TESIS - RC142501

**STUDI PERBANDINGAN PENGGUNAAN *FRICTION*
PENDULUM BEARING DAN *LEAD RUBBER*
BEARING PADA STRUKTUR *LIGHT RAIL TRANSIT***

SANTI NURAINI

NRP. 03111650020006

DOSEN PEMBIMBING :

Prof.Priyo Suprobo, MS.,Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN STRUKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



THESIS - RC142501

**A COMPARATIVE STUDY OF BASE ISOLATION
DEVICES IN LIGHT RAIL TRANSIT STRUCTURE
FEATURED WITH LEAD RUBBER BEARING AND
FRICTION PENDULUM BEARING**

SANTI NURAINI
03111650020006

SUPERVISOR :
Prof. Priyo Suprobo, MS., Ph.D

POST GRADUATE PROGRAM
MASTER PROGRAM OF STRUCTURE
FACULTY OF CIVIL, ENVIRONMENTAL AND GEO ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (M.T)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember




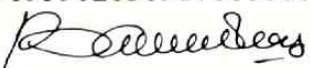
oleh:

Santi Nuraini

NRP. 03111650020006

Tanggal Ujian : 2 Juli 2018
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh:

- 
1. **Prof. Ir. Priyo Suprobo, M.S. Ph.D.** (Pembimbing I)
NIP. 195909111984031001
- 
2. **Budi Suswanto, S.T.M.T. Ph.D.** (Penguji)
NIP. 197301281998021002
- 
3. **Dr. Ir. Djoko Irawan, M.S** (Penguji)
NIP. 195902131987011001
- 
4. **Bambang Piscesa, S.T. M.T. Ph.D** (Penguji)
NIP. 198403182008121002



Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


IDAA Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 19750212 199903 2001

**STUDI PERBANDINGAN PENGGUNAAN *FRICTION*
PENDULUM BEARING DAN *LEAD RUBBER BEARING*
PADA STRUKTUR *LIGHT RAIL TRANSIT***

Nama Mahasiswa : Santi Nuraini

NRP : 3116 202 006

Dosen Konsultasi : Prof. Priyo Suprobo, MS., Ph.D.

ABSTRAK

Isolasi seismik adalah strategi yang digunakan untuk mengurangi gaya gempa atau mendekati kapasitas inelastis dari jembatan, sehingga menghilangkan atau mengurangi deformasi inelastis dan kerusakan substruktur. Ada beberapa macam bantalan untuk isolasi gempa. Terdapat 2 kategori bantalan: elastomer (bantalan karet) dan bantalan geser friksi. Dua jenis isolasi dasar yang banyak digunakan yaitu FPB (*Friction Pendulum Bearing*) dan LRB (*Lead Rubber Bearing*). Pada studi ini akan dimodelkan enam struktur LRT dengan menggunakan program bantu SAP2000 yang terdiri dari 3 model struktur menggunakan LRB dan 3 model struktur menggunakan FPB dengan variasi dimensi yang berbeda. Kedua macam isolasi tersebut akan diletakkan di atas *pier cap* untuk menahan struktur atas jembatan. Digunakan analisis *Non-linear Time History Analysis* (NLTHA) dengan 7 riwayat gempa yang berlokasi di Surabaya untuk mengetahui perilaku dan respon struktur pada LRT sehingga dapat diketahui manfaat isolator gempa terhadap beban gempa. Selain itu dilakukan juga analisa elemen hingga untuk mengetahui perilaku elemen struktur yang terjadi dengan menggunakan program bantu ABAQUS. Dari analisis yang dilakukan, terdapat sedikit perbedaan antara LRB dan FPB pada segi gaya geser dasar, perpindahan, tingkat kerusakan dan energi disipasi. Sistem isolasi gempa menggunakan FPB dapat bekerja lebih baik dibandingkan dengan LRB dalam mereduksi gempa. Namun secara keseluruhan, kedua isolator gempa dapat mengisolasi gempa dengan baik dan dapat mengurangi gaya geser yang terjadi pada kolom pada struktur LRT.

Kata kunci : *light rail transit, lead rubber bearing, friction pendulum bearing, SAP2000, ABAQUS, pushover analysis, time history analysis*

***A COMPARATIVE STUDY OF BASE ISOLATION DEVICES
IN LIGHT RAIL TRANSIT STRUCTURE FEATURED WITH
LEAD RUBBER BEARING AND FRICTION PENDULUM
SYSTEM***

Student Name : Santi Nuraini

NRP : 3116 202 006

Author : Prof. Priyo Suprobo, MS., Ph.D.

ABSTRACT

Advanced nonlinear analysis in light rail transit (LRT) structure has been undertaken to examine the influence of seismic isolation devices for reducing seismic demand. The study employed the use of two types of commercially available bearings, namely lead rubber bearing (LRB) and friction pendulum system (FPB). Six LRT structures, designed to be built in Surabaya, were modelled using computer-aided software SAP2000, with each three structures consisted of three types of LRB and FPB placed onto the pier cap to support the horizontal upper-structural member. Nonlinear static pushover and dynamic time history analysis with seven improved ground motion data were performed to gain improved insights on behavioural response of LRT structures, allowing one to fully understand the supremacy of seismic isolations for protecting the structure against seismic actions. Furthermore, finite element analysis used to determine the behavior of structural elements using ABAQUS. It is shown that the overall responses of LRB and FPB show marginal discrepancies in term of base shear, plastic hinge damage, displacement and energy dissipation capacity. FPB works more effectively when compares to LRB in reducing seismic damage .Overall, both devices manage to isolate seismic forces, resulting in alleviation of excessive base shear occurred at the column. In addition, it is noticeable that, suggesting both devices are interchangeable to be used for LRT-like structures.

Keywords: light rail transit, lead rubber bearing, friction pendulum bearing, SAP2000, ABAQUS, pushover analysis, time history analysis

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penyusun panjatkan kehadiran Allah SWT, karena berkat Rahmat-Nya penyusun dapat menyelesaikan Thesis yang berjudul “Studi Perbandingan Penggunaan *Friction Pendulum Bearing* dan *Lead Rubber Bearing* Pada Struktur Jembatan” tepat pada waktunya. Adapun maksud dari penyusunan Thesis ini adalah untuk memenuhi salah satu persyaratan akademis dalam melaksanakan pendidikan Magister di Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dalam penyusunan Thesis ini, penulis telah mendapat bimbingan dan pengarahan serta bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penyusun ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, atas segala rahmat dan karunia-Nya
2. Kedua orangtua penulis, adik dan kakak yang telah memberikan doa, kasih sayang dan dukungan.
3. Suami tercinta Angga Ahmad Maulana yang telah memberikan doa, semangat, dukungan dan juga pengertiannya kepada penulis untuk menyelesaikan thesis.
4. Prof. Priyo Suprobo, MS.,Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan thesis.
5. Dr. Asdam Tambusay S.T yang telah membimbing penulis dengan sabar, memberikan arahan, mengajarkan software ABAQUS dan meluangkan waktu untuk penulis dalam mengerjakan thesis.
6. Endah Wahyuni, ST., M.Sc., Ph.D selaku Kaprodi Pasca Sarjana ITS.
7. Budi Suswanto, S.T.M.T. Ph.D, Dr. Ir. Djoko Irawan, M.S dan Bambang Piscesa, S.T. M.T. Ph.D selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan masukan dalam penyusunan Thesis.
8. Prof. Dr. Ir. Triwulan, DEA selaku dosen wali penulis yang telah banyak memberi bimbingan dan arahan selama penulis menjadi mahasiswa S2.
9. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS, terima kasih atas ilmu yang telah diberikan.
10. Seluruh staff dan karyawan Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS.

11. Teman-teman seperjuangan dari S2 Struktur dan semua rekan Teknik Sipil ITS yang sudah banyak memberikan semangat, doa dan warna selama masa perkuliahan.
12. Fedya, Meity dan Dara yang selalu ada disetiap saat untuk memberikan dukungan, hiburan dan nasihat selama masa masa sulit.

Dalam pembuatan Tesis ini, penulis menyadari bahwa Tesis yang penulis buat masih sangat jauh dari kesempurnaan. Jadi dengan rasa hormat mohon petunjuk, saran, dan kritik terhadap Tesis ini, sehingga kedepannya diharapkan ada perbaikan terhadap Tesis ini serta dapat menambah pengetahuan bagi penulis.

Surabaya, Juli 2018

Penyusun

DAFTAR ISI

ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Umum	5
2.2 Isolator Gempa	5
2.2.1 <i>Lead Rubber Bearing</i> (LRB)	6
2.2.2 Friction Pendulum System (FPB)	7
2.3 Sistem Isolasi Pada Jembatan	9
2.4 Analisis Statik Nonlinier Pushover	12
2.4.1 Batas Kinerja.....	14
BAB III METODOLOGI	17
3.1 Skema Penelitian	17
3.2 Studi Literatur.....	18
3.2.1 Pengumpulan Data.....	18
3.3 Desain Struktur.....	18
3.4 Sistem Struktur	20
3.5 Model Struktur.....	21
3.6 Pembebanan.....	21
3.6.1 Beban mati (DL)	22
3.6.2 Beban <i>Superimposed</i> DL	22
3.6.3 Beban hidup (LL).....	22
3.6.4 Beban longitudinal.....	23

3.6.5 Beban angin	23
3.6.6 Beban <i>Hunting force</i>	25
3.6.7 Beban gempa.....	25
3.7 Pemodelan dan Analisa Struktur LRB dan FPB.....	30
3.8 Pushover Analisis pada Struktur LRB dan FPB.....	30
3.9 Analisis Efisiensi	31
3.10 Analisa Metode Elemen Hingga.....	31
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Pemodelan Struktur	37
4.2 Pembebanan Gempa	37
4.3 Lead Rubber Bearing (LRB)	40
4.4 Pemodelan Friction Pendulum System (FPB).....	43
4.5 Pushover Analysis	50
4.5.1 Momen Kurvatur.....	51
4.5.2 Penentuan <i>Hinge Properties</i>	52
4.5.3 Lokasi Titik Pushover	53
4.5.4 Menentukan <i>Load Case Pushover</i>	54
4.5.5 Model Pushover	54
4.6 Lokasi Leleh pertama Komponen Struktur	55
4.6.1 <i>Lead Rubber Bearing</i> (LRB)	55
4.6.2 <i>Friction Pendulum System</i> (FPB)	57
4.7 Level Kinerja Struktur.....	59
4.8 Kerusakan Sendi Plastis	59
4.8.1 <i>Lead Rubber Bearing</i> (LRB)	60
4.8.2 <i>Friction Pendulum System</i> (FPB)	62
4.9 Displacement Pada LRB dan FPB.....	66
4.10 Energi Dissipasi Struktur.....	67
4.11 Daktilitas Struktur	68
4.12 Respon Struktur	69
BAB V ANALISA METODE ELEMEN HINGGA	71
5.1 Pemodelan	71
5.2 Material.....	72
5.2.1 Beton.....	72
5.2.2 Baja	80
5.3 Hasil Pemodelan.....	81

5.4 Verifikasi Hasil Metode Elemen Hingga dengan Hasil SAP2000	84
5.5 Analisa <i>Confinement Effect</i>	85
BAB VI PENUTUP	91
6.1 Kesimpulan.....	91
6.2 Saran.....	92
DAFTAR PUSTAKA	93
LAMPIRAN	

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Komponen Penyusun LRB	7
Gambar 2. 2 Komponen Penyusun Pendulum	8
Gambar 2. 3 Konfigurasi sistim portal berpengaku Isentrik	10
Gambar 2. 4 Pemasangan LRB Pada Struktur Jembatan	11
Gambar 2. 5 Pemasangan FPB Pada Struktur Jembatan.....	12
Gambar 2. 6 Kurva Kriteria Kerusakan (FEMA 356, 2000).....	14
Gambar 3. 1 Flowchart Perencanaan	17
Gambar 3. 2 Pemodelan Posisi Seismic Bearing	20
Gambar 3. 3 Model Struktur LRT	21
Gambar 3. 4 Beban Superimposed.....	22
Gambar 3. 5 Beban Hidup (a) <i>Train Left</i> (b) <i>Train Right</i>	23
Gambar 3. 6 Konfigurasi pembebanan untuk setiap axle pada kereta	23
Gambar 3. 7 Beban Longitudinal (a) <i>Left</i> (b) <i>Right</i>	23
Gambar 3. 8 Beban Angin Pada Struktur	24
Gambar 3. 9 Beban Angin Pada <i>Train Left</i>	24
Gambar 3. 10 Beban Angin Pada <i>Train Left Right</i>	25
Gambar 3. 11 Beban <i>Hunting Force Left</i>	25
Gambar 3. 12 Beban <i>Hunting Force Right</i>	25
Gambar 3. 13 Peta Respon Spektra Percepatan 0.2 detik di Batuan Dasar untuk Probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (PGA).....	27
Gambar 3. 14 Peta Respon Spektra Percepatan 0.2 detik di Batuan Dasar untuk Probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (S_s).....	28
Gambar 3. 15 Peta Respon Spektra Percepatan 0.2 detik di Batuan Dasar untuk Probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (S_1)	28
Gambar 4. 1 Pemodelan Struktur Pada <i>Software</i> SAP2000.....	37
Gambar 4. 2 Grafik Respon Spektrum yang dihasilkan.....	39
Gambar 4. 3 Respon Spektra untuk Struktur yang diberikan Isolasi Seismik	39
Gambar 4. 4 Grafik Respon Spektrum (Isolasi Seismik).....	40
Gambar 4. 5 Data <i>Time History</i> yang digunakan.....	40
Gambar 4. 6 Detail Dimensi pada FPB	44
Gambar 4. 7 Kurva Polinomial (Nocholas Mars,2013)	48
Gambar 4. 8 <i>Section Properties pier</i>	51
Gambar 4. 9 Output Momen Kurvatur dari SAP2000	52
Gambar 4. 10 Rasio Momen Ultimate dan Yield.....	53
Gambar 4. 11 Titik Struktur didorong pada SAP2000.....	54
Gambar 4. 12 Lokasi Leleh Pertama pada Struktur (a) LRB tipe 1; (b) LRB tipe 2; (c) LRB tipe 3 <i>Pushover</i> pada <i>Pier</i>	55
Gambar 4. 13 Lokasi Leleh Pertama pada Struktur (a) LRB tipe 1; (b) LRB tipe 2; (c) LRB tipe 3 <i>Pushover</i> pada <i>Pier</i> dan Pondasi.....	56
Gambar 4. 14 Lokasi Leleh Pertama pada Struktur (a) FPB tipe 1; (b) FPB tipe 2; (c) FPB tipe 3 <i>Pushover</i> pada <i>Pier</i>	57

Gambar 4. 15 Lokasi Leleh Pertama pada Struktur (a) FPB tipe 1; (b) FPB tipe 2; (c) FPB tipe 3 <i>Pushover</i> pada Pondasi.....	58
Gambar 4. 16 Mekanisme Sendi Plastis yang Terjadi (a) LRB tipe 1; (b) LRB tipe 2; (c) LRB tipe 3 <i>Pushover</i> pada <i>Pier</i>	61
Gambar 4. 17 Mekanisme Sendi Plastis yang Terjadi (a) LRB tipe 1; (b) LRB tipe 2; (c) LRB tipe 3 <i>Pushover</i> pada <i>Pier</i> dan Pondasi	62
Gambar 4. 18 Mekanisme Sendi Plastis yang Terjadi (a) FPB tipe 1; (b) FPB tipe 2; (c) FPB tipe 3 <i>Pushover</i> pada <i>Pier</i>	63
Gambar 4. 19 Mekanisme Sendi Plastis yang Terjadi (a) FPB tipe 1; (b) FPB tipe 2; (c) FPB tipe 3 <i>Pushover</i> pada <i>Pier</i> dan Pondasi	64
Gambar 4. 20 Hasil <i>Pushover</i> (a) Level Kinerja Struktur ; (b) <i>Base Shear</i> vs <i>Lateral Drift</i> Pada Struktur	65
Gambar 4. 21 Grafik <i>Displacement</i> yang terjadi pada LRB dan FPB	67
Gambar 4. 22 Respon Struktur <i>Friction Pendulum System</i> (FPB).....	69
Gambar 4. 23 Respon Struktur <i>Lead Rubber Bearing</i> (LRB).....	70
Gambar 4. 24 Respon Struktur Elastomer.....	70
Gambar 5. 1 Momen Kurvatur Antara Xtract dan ABAQUS	68
Gambar 5. 2(a) Model <i>Pier</i> ; (b) Model Tulangan; (c) <i>Meshing</i> pada ABAQUS .	71
Gambar 5. 3 Interaksi Antara <i>Compression Stress</i> dan <i>Inelastic Strain</i> untuk beton dengan $f'_c = 33.2$ MPa	74
Gambar 5. 4 Interaksi Antara <i>Compression Stress</i> dan <i>Inelastic Strain</i> untuk beton dengan $f'_c = 29$ MPa	75
Gambar 5. 5 Interaksi Antara <i>Compression Stress</i> dan <i>Inelastic Strain</i> untuk beton dengan $f'_c = 50$ MPa	75
Gambar 5. 6 Interaksi Antara <i>Compression Stress</i> dan <i>Inelastic Strain</i> untuk beton dengan $f'_c = 33.2$ MPa	76
Gambar 5. 7 Interaksi Antara <i>Compression Stress</i> dan <i>Inelastic Strain</i> untuk beton dengan $f'_c = 29$ MPa	76
Gambar 5. 8 Interaksi Antara <i>Compression Stress</i> dan <i>Inelastic Strain</i> untuk beton dengan $f'_c = 50$ MPa	77
Gambar 5. 9 Interaksi Antara <i>Tension Stress</i> dan <i>Inelastic Strain</i> untuk beton dengan $f'_c = 33.2$ MPa	77
Gambar 5. 10 Interaksi Antara <i>Tension Stress</i> dan <i>Inelastic Strain</i> untuk beton dengan $f'_c = 29$ MPa	78
Gambar 5. 11 Interaksi Antara <i>Tension Stress</i> dan <i>Inelastic Strain</i> untuk beton dengan $f'_c = 50$ MPa	78
Gambar 5. 12 Diagram Interaksi <i>Tension Damage</i> vs <i>Cracking Strain</i> Beton $f'_c = 33.2$ MPa	78
Gambar 5. 13 Diagram Interaksi <i>Tension Damage</i> vs <i>Cracking Strain</i> Beton $f'_c = 33.2$ MPa	79
Gambar 5. 14 Diagram Interaksi <i>Tension Damage</i> vs <i>Cracking Strain</i> Beton $f'_c = 33.2$ MPa	79
Gambar 5. 15 Hasil Analisis FEM	81
Gambar 5. 16 Kerusakan Struktur (a) Akibat Tarik; (b) Akibat Tekan	82
Gambar 5. 17 Regangan Tarik dan Tekan Pada Tulangan.....	83

Gambar 5. 18 Leleh yang Terjadi Pada Sendi Plastis	83
Gambar 5. 19 Kurva Histeresis Struktur (ABAQUS)	84
Gambar 5. 20 Kurva Tegangan Regangan Beton Berdasarkan Modifikasi Kent dan Park	86
Gambar 5. 21 Strees-Strain Concrete Confined By Rectangular Hoops	87
Gambar 5. 22 Kerusakan Struktur (a) Akibat Tarik; (b) Akibat Tekan; (c) Leleh Pertama Sendi Plastis	89
Gambar 5. 23 Perbandingan Kurva Histeresis Antara Struktur Dengan dan Tanpa Kekangan.....	90

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Kuat Tekan Beton.....	19
Tabel 3. 2 Spesifikasi Mutu Tulangan Dalam Desain.....	19
Tabel 3. 3 Detail Spesifikasi <i>Bearing</i>	20
Tabel 3. 4 Kategori Resiko Bangunan Gedung dan Non Gedung Untuk Beban Gempa	26
Tabel 3. 5 Faktor Keutamaan Gempa	27
Tabel 3. 6 Klasifikasi Situs	28
Tabel 3. 7 Faktor amplifikasi untuk periode 0 detik dan 0,2 detik (F_{PGA}/F_a).....	29
Tabel 3. 8 Besarnya nilai faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (F_v)	29
Tabel 3. 9 Parameter <i>Plasticity</i> Beton.....	32
Tabel 4. 1 Dimensi LRB yang digunakan.....	41
Tabel 4. 2 Dimensi FPB yang digunakan.....	43
Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Kemampuan Geser Bearing	46
Tabel 4. 4 <i>Drift</i> dan Gaya Geser yang Terjadi pada LRB (<i>Pushover Pier</i>).....	55
Tabel 4. 5 <i>Drift</i> dan Gaya Geser yang Terjadi pada LRB (<i>Pushover Pondasi & Pier</i>)	56
Tabel 4. 6 <i>Drift</i> dan Gaya Geser yang Terjadi pada LRB (<i>Pushover Pier</i>).....	57
Tabel 4. 7 <i>Drift</i> dan Gaya Geser yang Terjadi pada FPB (<i>Pushover Pondasi & Pier</i>)	58
Tabel 4. 8 Nilai Level Kinerja Struktur Pada LRB	59
Tabel 4. 9 Nilai Level Kinerja Struktur Pada FPB.....	59
Tabel 4. 10 <i>Base shear</i> dan <i>displacement</i> LRB	65
Tabel 4. 11 <i>Base shear</i> dan <i>displacement</i> FPB	65
Tabel 4. 12 <i>Displacement Pier</i> LRB dan FPB	66
Tabel 4. 13 Kontrol <i>Displacement</i> Pada LRB dan FPB.....	66
Tabel 4. 14 Energi Disipasi Pada LRB dan FPB	67
Tabel 4. 15 Rasio Energi Disipasi.....	68
Tabel 5. 1 <i>Inelastic Strain, Compression Stress</i> dan <i>Compression Damage</i> Beton f_c 33.2 MPa.....	73
Tabel 5. 2 <i>Inelastic Strain, Compression Stress</i> dan <i>Compression Damage</i> Beton f_c 29 MPa.....	73
Tabel 5. 3 <i>Inelastic Strain, Compression Stress</i> dan <i>Compression Damage</i> Beton f_c 50 MPa.....	74
Tabel 5. 4 <i>Tension Stress, Inelastic Strain</i> dan <i>Tension Damage</i> Beton	80
Tabel 5. 5 Gaya Geser dan <i>Displacement</i> SAP2000 dan ABAQUS.....	84
Tabel 5. 6 <i>Tension Stress, Inelastic Strain</i> dan <i>Tension Damage</i> Pada Beton Terkekang.....	88

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pendahuluan

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 didissipasikan oleh sistem isolasi ini (Bambang, 2015). Isolasi gempa dimaksudkan untuk mencegah kerusakan stuktur akibat gempa. Salah satunya dengan menggunakan bantalan yang disebut isolator. Isolator tersebut berada diantara pondasi dan rangka struktur dan di desain untuk menurunkan besarnya frekuensi gempa pada struktur (Mahesh dkk, 2015). Beberapa tahun ini struktur jembatan telah menggunakan bantalan elastomer yang di desain secara fleksibel. Lebih dari 100 bangunan di Eropa dan Australia telah dibangun diatas bantalan karet untuk mengisolasi strukutur dari getaran vertikal kereta bawah tanah, dan memiliki kinerja yang baik selama lebih dari 40 tahun (Mayes, 2001).

Ada beberapa macam bantalan untuk isolasi gempa. Terdapat 2 kategori bantalan: elastomer (bantalan karet) dan bantalan geser friksi. Ada dua jenis umum bantalan geser; *flat sliding bearing* yang dikombinasikan dengan elastomer dan bantalan pendulum. Pada *Single Friction Pendulum* (SFP) mengacu gerakan pada *slider* ke bantalan di bagian bawah. Bearing ini memiliki kurva kekuatan bilinear yang membentuk kekakuan linear terkait dengan gerakan pendulum dan gaya gesek yang konstan. Karakteristik bantalan SFP mirip dengan *Lead Plug Rubber* (LPR) atau bantalan karet linear yang dikombinasikan dengan hysteresis eksternal, Tetapi kekakuan awal dari gesekan pendulum seringkali lebih besar dan transisi antara kekakuan awal dan kekakuan kedua biasanya terjadi secara tiba tiba (Tracy,2011). Sedangkan untuk elastomer (Bantalan karet) yang biasa disebut LRB (*Lead Rubber*

Bearing) merupakan isolator yang dirancang menggunakan blok elastomer (karet alam atau neoprene) yang diperkuat dengan baja yang memiliki satu atau lebih silinder inti. LRB dapat mengurangi percepatan (melalui distorsi silinder baja) dan perpindahan struktur saat gempa terjadi (Freyssinet).

Don Chu dkk (1996) melakukan studi mengenai keefektifan dari FPB (*Friction Pendulum Beam*) dan HDR (*High Dumping Rubber*) yang dilakukan secara numerik. Hasil yang didapatkan yaitu FPB memiliki isolasi gempa terbaik dibandingkan dengan HDR. Bambang Budiono (2015) melakukan studi perbandingan penggunaan dua buah tipe *friction pendulum bearing system* (FPB) yaitu tipe *single pendulum* dan *triple pendulum* pada struktur beton. Hasil yang didapat yaitu *triple pendulum* memberikan respon struktur yang lebih baik daripada *single pendulum*. Selain itu, Dezfuli dan Alam (2017) melakukan studi perbandingan untuk pendulum dengan variasi panjang dan pendulum dengan tumpuan vertikal berisolasi dengan tujuan untuk melihat perbandingan perilaku pendulum. Hasil yang didapat yaitu pendulum dengan tumpuan vertikal terisolasi lebih stabil dibandingkan dengan pendulum dengan variasi panjang. Amplitudo dan periode pada pendulum dengan variasi panjang memiliki nilai yang cukup besar.

Dari penilitian dan studi yang telah dilakukan sebelumnya, perlu adanya analisa lebih lanjut mengenai sistem isolasi gempa. Selain menggunakan analisa numerik, analisa dapat dilakukan dengan membuat pemodelan struktur untuk masing masing sistem isolasi sehingga dengan memodelkan struktur dapat diketahui output yang dihasilkan dari masing masing sistem struktur. Maka, pada studi ini akan dilakukan studi perbandingan sistem isolasi struktur dengan menggunakan program bantu SAP2000 antara *Friction Pendulum Bearing* (FPB) dan *Lead Rubber Bearing* (LRB) pada struktur jembatan.

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana respon struktur yang dihasilkan oleh tipe isolasi dasar *Friction Pendulum System* (FPB) dengan *Lead Rubber Bearing* (LRB) pada struktur LRT?

2. Bagaimana kerusakan struktur yang terjadi pada struktur LRT yang menggunakan *Friction Pendulum System* (FPB) dan *Lead Rubber Bearing* (LRB) dengan bantuan program analisa struktur *SAP2000* ver.17 ?
3. Bagaimana level kinerja struktur yang dihasilkan pada struktur LRT dengan menggunakan *Friction Pendulum System* (FPB) dan *Lead Rubber Bearing* (LRB)?
4. Bagaimana hasil akhir perbandingan efisiensi penggunaan *Friction Pendulum System* (FPB) dengan *Lead Rubber Bearing* (LRB) dalam hal dissipasi energi dan daktilitas struktur yang dihasilkan?
5. Bagaimana pengaruh dimensi dari isolasi seismik yang digunakan?
6. Bagaimana pengaruh struktur LRT dengan menggunakan metode elemen hingga jika memperhitungkan analisa *confinement effect*?

1.3 Tujuan

Secara garis besar tujuan dari penyusunan tesis ini adalah untuk:

1. Mengetahui respon struktur yang dihasilkan oleh tipe isolasi dasar *Friction Pendulum System* (FPB) dengan *Lead Rubber Bearing* (LRB) pada struktur LRT.
2. Mengetahui kerusakan struktur yang terjadi pada struktur LRT yang menggunakan *Friction Pendulum System* (FPB) dan *Lead Rubber Bearing* (LRB) dengan bantuan program analisa struktur *SAP2000* ver.17.
3. Mengetahui level kinerja struktur yang dihasilkan pada struktur LRT dengan menggunakan *Friction Pendulum System* (FPB) dan *Lead Rubber Bearing* (LRB).
4. Mengetahui hasil akhir perbandingan efisiensi penggunaan *Friction Pendulum System* (FPB) dengan *Lead Rubber Bearing* (LRB) dalam hal dissipasi energi dan daktilitas struktur yang dihasilkan.
5. Mengetahui pengaruh dimensi dari isolasi seismik yang digunakan.
6. Mengetahui pengaruh struktur LRT dengan menggunakan metode elemen hingga jika memperhitungkan analisa *confinement effect*.

1.4 Batasan Masalah

Studi ini akan dilakukan dengan adanya suatu batasan antara lain sebagai berikut :

1. Studi menggunakan analisis *Time History*
2. Kondisi tanah yang digunakan yaitu SE
3. Ketinggian pier yang digunakan pada studi yaitu 16 meter

1.5 Manfaat Penulisan

Manfaat yang diharapkan dalam perencanaan ini adalah:

1. Sebagai bahan masukan dan pertimbangan bagi perencana dalam merencanakan sebuah struktur terutama struktur jembatan dalam sistem isolasi yang digunakan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Jembatan adalah bagian terpenting dari sistem transportasi secara keseluruhan dan ketika terjadi gempa kekuatannya pun sangat penting. Bukti penelitian yang cukup tersedia menunjukkan bahwa isolasi gempa pada jembatan yang ada dapat berfungsi sebagai alat yang efektif untuk meningkatkan kinerja gempa (Eroz dan DesRoches, 2013). Pengkajian gempa pada infrastruktur yang ada menjadi hal yang sangat penting akibat rentannya bangunan terhadap gempa. Dalam rangka meningkatkan kinerja seismik yang ada pada jembatan, ada beberapa strategi yang digunakan seperti sistem isolasi dan dissipasi (Gianluca dan Antonio, 2016). Berbagai macam isolator gempa telah berkembang dan digunakan secara praktis untuk struktur anti gempa selama dua puluh tahun termasuk bantalan elastomer, bantalan geser dan bantalan roll (Tobia dkk, 2014).

2.2 Isolator Gempa

Secara umum sistem isolasi gempa terbagi dalam dua kategori yaitu *Elastomeric Rubber Bearing* dan *Sliding Bearing*. Jenis *Elastomeric Rubber Bearing* terdiri dari jenis *high damping rubber bearing* (HDRB) dan *Lead Rubber Bearing* (LRB). Sedangkan *sliding bearing* terdiri dari jenis *friction pendulum system* (FPB) dan *slider isolator* (Muliadi dkk, 2016).

Prinsip utama cara kerja base isolator jenis elastomerik bearing (HDRB atau LRB) adalah dengan memperpanjang waktu getar alami struktur diluar frekwensi dominan gempa sampai 2.5 atau 3 kali dari waktu getar struktur tanpa isolator (*fixed base structures*) dan memiliki damping antara 10 s/d 20%. Akibatnya gaya gempa yang disalurkan ke struktur menjadi lebih kecil. Sedangkan pada *friction pendulum system* (FPB), parameter yang berpengaruh terhadap besarnya reduksi gaya gempa yang bekerja pada struktur adalah koefisien gesekan dan radius kelengkungan dari permukaan cekung bidang gelincir sistem FPB. Disamping itu satu hal yang unik dari sistem ini adalah waktu getar struktur tidak tergantung kepada massa bangunan

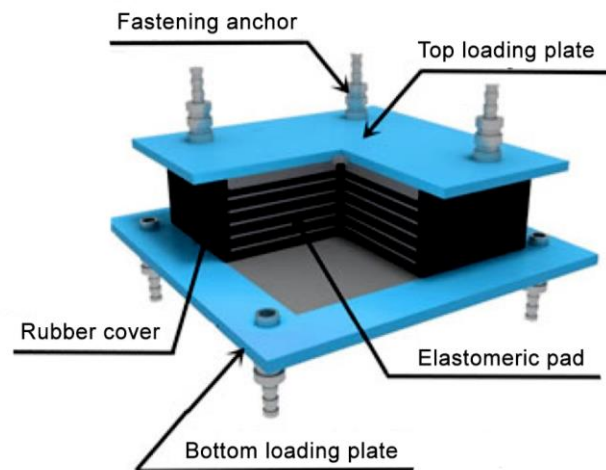
tetapi tergantung kepada radius kelengkungan dan percepatan gravitasi Bumi dari sistem FPB (Teruna dan Hendrik, 2010).

Menurut Mayes (2000), struktur yang biasanya cocok untuk isolator gempa yaitu sebagai berikut:

- Lapisan tanah tidak memiliki pergerakan tanah yang baik seperti di kota Meksiko
- Memiliki perpindahan horizontal sebesar 8 in atau lebih
- Struktur cukup rendah
- Beban lateral angin dan beban non gempa kurang dari 10% berat bangunan

2.2.1 Lead Rubber Bearing (LRB)

Sistem isolator dasar yang paling banyak digunakan adalah dengan menggunakan bantalan elastomer yang terbuat dari karet alam atau karet sintetis yang disebut sebagai neoprene. Dalam pendekatan ini, struktur bangunan diisolasi dari eksitasi horizontal beban gempa dengan menggunakan material yang mempunyai kekakuan horizontal yang relatif rendah dibandingkan dengan kekakuan vertikalnya yang diletakkan di antara struktur atas dan pondasi (Setio dkk, 2012). LRB sendiri adalah salah satu sistem anti seismik isolasi dasar yang kini banyak diterapkan pada struktur untuk mereduksi gaya gempa. Material LRB terdiri dari kombinasi lempengan karet alam dan lempeng baja. Karet alam berfungsi untuk mengurangi getaran akibat gempa bumi, sedangkan lempeng baja digunakan untuk menambah kekakuan bantalan karet. Selain itu pada bagian tengahnya diberikan batangan bulat dari timah untuk meningkatkan daya redaman (Syah, 2015). Komponen dasar penyusun LRB dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 2. 1 Komponen Penyusun LRB
 Sumber : Oiles Corporation, <http://www.oiles.co.jp>

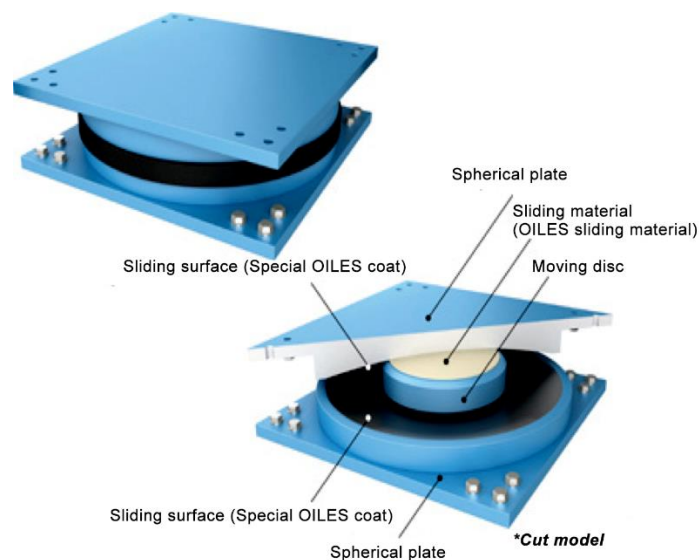
High-damping rubber bearing merupakan salah satu jenis laminated rubber bearing yang terbuat dari campuran senyawa karet dengan nilai rasio redaman yang tinggi. High-damping rubber bearing memiliki nilai kekakuan awal yang tinggi sehingga mampu mengakomodasi gaya angin dan gempa ringan tanpa berdeformasi secara signifikan. Dengan meningkatnya eksitasi gempa maka deformasi lateral akan meningkat dan modulus geser dari rubber akan menurun dan menghasilkan sistem isolasi dasar yang efektif (cukup fleksibel untuk memperpanjang periode struktur). Pada nilai regangan geser 250 hingga 300%, kekakuan horizontal akan meningkat kembali akibat pengaruh hardening effects. Pengaruh ini berfungsi sebagai “sekring” untuk membatasi deformasi yang melebihi batas gempa maksimum yang direncanakan (Setiawan, 2014)

2.2.2 Friction Pendulum System (FPB)

FPB merupakan sistem kinematik yang paling banyak digunakan pada sistem isolasi (Necdet, 2004). FPB adalah sistem yang menggabungkan kekuatan geser dan memperbaiki gaya dari geometri nya. FPB memiliki *slider* yang bergerak pada permukaan lengkung dari stainless steel. Sisi *slider* yang bersentuhan dengan permukaan lengkung dilapisi oleh material komposit *low-friction*. Sisi lain dari *slider* juga lengkung, dilapisi dengan stainless steel dan berada dalam cekungan yang juga dilapisi dengan komposit material *low-friction*. Ketika *slider* bergerak

diatas permukaan lengkungan, menyebabkan massa bertambah dan memberikan gaya pemulihan pada sistem (Maria, 2008). Sistem ini dapat digunakan pada gedung, sambungan, sistem atap yang berat dan juga melalui bahan mekanik dari metal khusus pada strukturnya , sistem ini dapat dengan sukses digunakan pada daerah sangat dingin (Necdet, 2004).

Pendulum memiliki prinsip yang sama dengan bandul sederhana. Ketika gempa terjadi *slider* bergerak sepanjang permukaan cekung yang menyebabkan struktur bergerak dengan gerakan yang lamban. Sistem ini juga memiliki kemampuan *re-centering* yang memungkinkan struktur untuk tetap berada di tempatnya, jika ada perpindahan yang terjadi ketika gempa diakibatkan oleh permukaan cekung pada bantalan dan gravitasi (Kravchuk dkk, 2008).

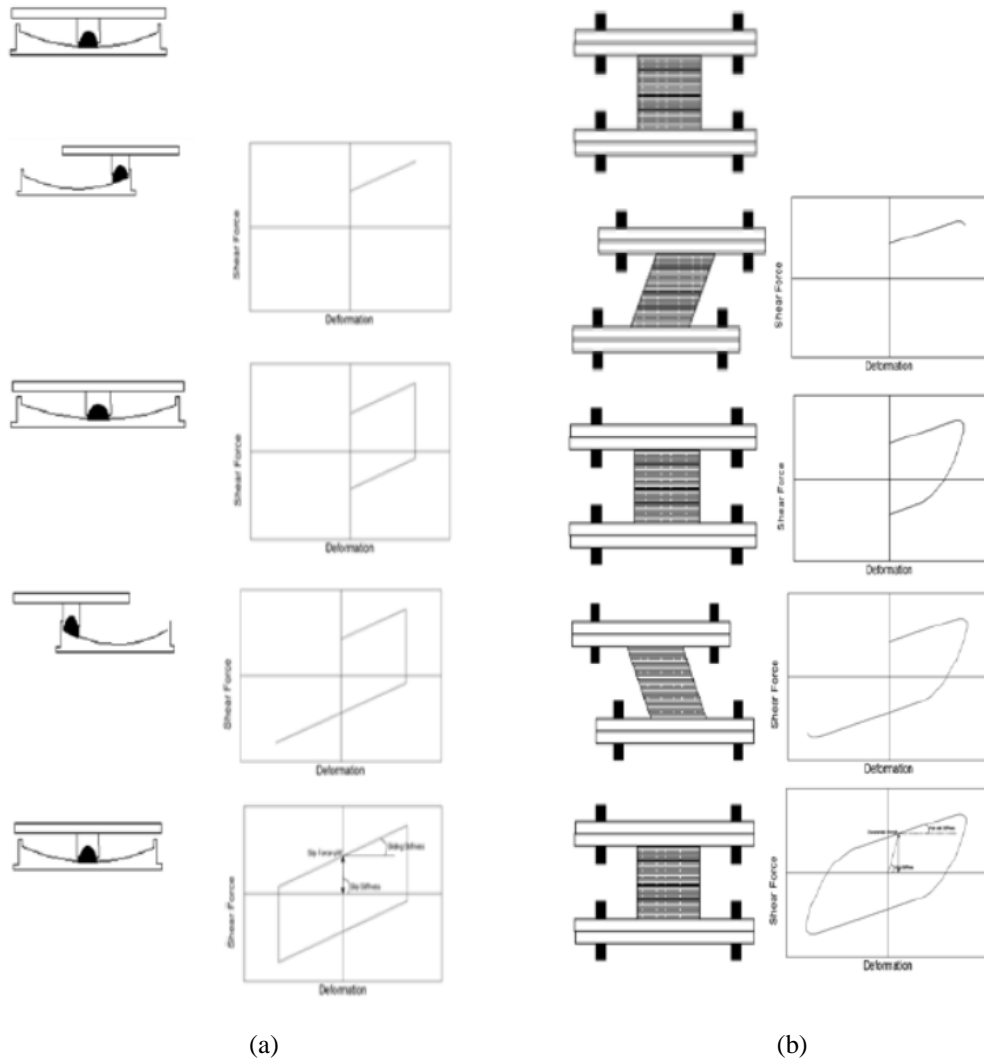


Gambar 2. 2 Komponen Penyusun Pendulum
 Sumber : Oiles Corporation, <http://www.oiles.co.jp>

Salah satu kelebihan utama yang dimiliki oleh perangkat friction pendulum system adalah kemampuannya untuk mengembalikan struktur pada posisi semula setelah gempa berakhir. Hal ini dapat terjadi karena adanya bagian articulated slider yang bergerak pada suatu permukaan stainless-steel yang berbentuk cekung dengan nilai kelengkungan tertentu. Dengan adanya tahanan friksi pada kedua permukaan

tersebut maka struktur di atas sistem isolasi dasar akan tetap berperilaku layaknya sebuah struktur terjepit (fixed-base structure) pada kondisi beban lateral yang ringan (Setiawan, 2014).

Berikut ini merupakan mekanisme pergerakan dari kedua sistem isolasi dari beban siklik akibat gempa (Gambar Gambar 2.3)

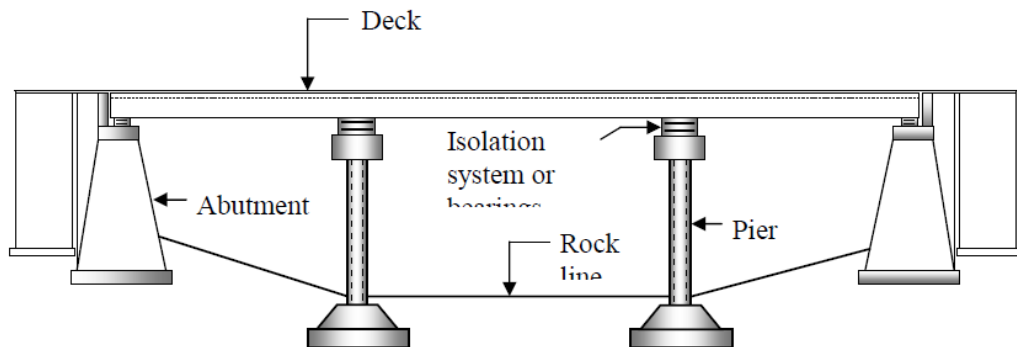


Gambar 2. 3 Mekanisme Pergerakan dan Pembentukan Kurva Histeretik Pada Isolasi Gempa (a) FPB; (b) LRB (Setiawan. 2014)

2.3 Sistem Isolasi Pada Jembatan

Tujuan utama dari sistem isolasi pada jembatan adalah untuk melindungi pilar dan pondasi dalam beberapa kasus abutmen yang terjadi. Hal ini dilakukan dengan memasang isolator gempa diantara struktur utama dan komponennya. Salah satu

manfaat dari isolasi seismik yaitu dapat digunakan pada berbagai bentuk jembatan dengan bentuk dan fungsi yang berbeda. Dari hal tersebut, pemahaman tentang efek dari desain parameter gempa sangat penting. Telah ada beberapa studi yang difokuskan pada pengaruh isolasi gempa dan desain jembatan pada respon gempa global. (Eroz dan Desrochez, 2013). Untuk sistem isolasi pada jembatan dapat dilihat pada Gambar 2.3

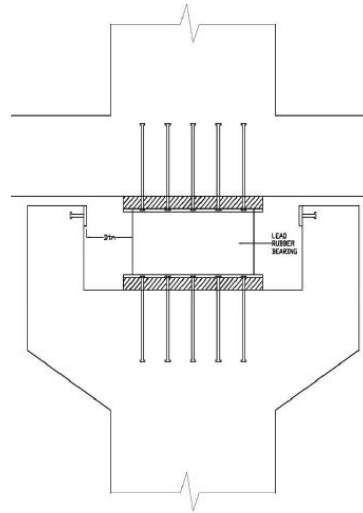


Gambar 2. 4 Konfigurasi sistim portal berpengaku Isentrik
 Sumber : Wijaya (2010)

Zhan dkk (2008) melakukan studi mengenai respon gempa non linier pada struktur jembatan menggunakan LRB. Asumsi yang digunakan untuk analisis respon gempa non linier pada beberapa bentang menerus menggunakan bantalan isolasi sebagai berikut:

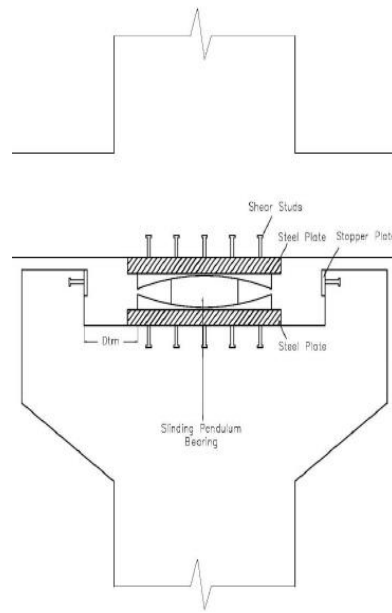
1. Struktur utama jembatan dan pilar diasumsikan tetap dalam keadaan elastis selama gempa bumi terjadi dan abutmen jembatan diasumsikan kaku. Pilar jembatan diasumsikan kaku pada pondasi tanpa mempertimbangkan efek SSI (*Soil Structure Interaction*).
2. Struktur utama jembatan dimodelkan dengan sistem beban merata yang dibagi menjadi beberapa segmen kecil yang berbeda. Setiap segmen yang berdekatan dihubungkan dengan node dan disetiap node memiliki 2 buah DOF. Massa di setiap segmen diasumsikan terdistribusi diantara 2 node yang berdekatan dalam bentuk titik massa.
3. Perilaku dari gaya deformasi bantalan isolasi dianggap sebagai bi-directional Bouc-Wen *hysteretic* model dibawah 2 arah horizontal.

Dengan asumsi yang dilakukan tersebut didapat bahwa gaya Tarik LRB akan terwujud jika memiliki puncak akselerasi yang lebih besar, terutama komponen vertikal gerakan tanah dari gaya gempa lebih besar. Maka gaya tarik LRB harus dipertimbangkan dalam mendesain isolator jika komponen vertical gerakan tanah memiliki nilai yang lebih besar. Pemasangan LRB pada jembatan dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2. 5 Pemasangan LRB Pada Struktur Jembatan
Sumber : *Earthquake Protection Systems California*, USA tshun

Selain itu Eroz dan Desrochez (2013), melakukan studi tentang pengaruh parameter desain pada respon jembatan dengan sistem isolasi menggunakan FPB. Hasil yang didapat yaitu peningkatan beban pada struktur utama mengurangi deformasi pada isolator dan meningkatkan gaya yang terjadi pada struktur sekunder. Selain itu kemiringan jembatan dapat diabaikan pada SIB (*seismically isolation bridge*) karena adanya pemisahan struktur utama dan sekunder. Pemasangan LRB pada jembatan dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2. 6 Pemasangan FPB Pada Struktur Jembatan
 Sumber : *Earthquake Protection Systems California, USA*

Secara umum efisiensi dari sistem isolasi pada jembatan dalam melindungi struktur yang rentan sudah terbukti dengan menggunakan LRB dan FPB. Penurunan yang signifikan pada kekuatan dan perpindahan pada struktur digunakan untuk mendesain ulang sistem isolasi struktur. Dengan demikian, kedua isolasi sistem jembatan dapat memperbaiki gempa yang terjadi pada jembatan. Namun, perbedaan penting yang diamati dari kedua sistem ini dalam hal geometri, perilaku hysteresis, karakteristik dissipasi energy, dll mempengaruhi respon dari komponen jembatan dan kinerja seismic secara keseluruhan pada struktur jembatan (Aviram dkk, 2012).

2.4 Analisis Statik Nonlinier Pushover

Metode analisis statik beban dorong (*static nonlinear/pushover analysis*) merupakan suatu metode analisis, yang mana dari hasil analisis antara lain diperoleh informasi berupa kurva kapasitas. Kurva kapasitas menyatakan hubungan antara gaya geser dasar terhadap peralihan atap struktur bangunan gedung. Dari kurva kapasitas kemudian dapat ditentukan daktilitas peralihan aktual struktur, yang mana bergantung pada penentuan titik peralihan pada saat leleh pertama terjadi dan titik peralihan ultimit (target peralihan yang diharapkan). (Pranata, 2006). Tujuan analisa *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi

serta untuk memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Selanjutnya dapat diidentifikasi bagian-bagian yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetailan atau stabilitasnya. Cukup banyak studi menunjukkan bahwa analisa statik *pushover* dapat memberikan hasil mencukupi (ketika dibandingkan dengan hasil analisa dinamik nonlinier) untuk bangunan regular dan tidak tinggi (Dewobroto, 2005).

Menurut Dewobroto (2005), Tahapan utama dalam analisa *pushover* adalah:

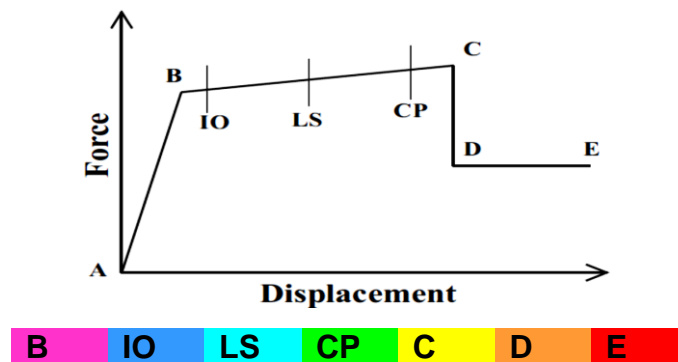
1. Menentukan titik kontrol untuk memonitor besarnya perpindahan struktur. Rekaman besarnya perpindahan titik kontrol dan gaya geser dasar digunakan untuk menyusun kurva *pushover*.
2. Membuat kurva *pushover* berdasarkan berbagai macam pola distribusi gaya lateral terutama yang ekuivalen dengan distribusi dari gaya inerti, sehingga diharapkan deformasi yang terjadi hampir sama atau mendekati deformasi yang terjadi akibat gempa. Oleh karena sifat gempa adalah tidak pasti, maka perlu dibuat beberapa pola pembebanan lateral yang berbeda untuk mendapatkan kondisi yang paling menentukan.
3. Estimasi besarnya perpindahan lateral saat gempa rencana (target perpindahan). Titik kontrol didorong sampai taraf perpindahan tersebut, yang mencerminkan perpindahan maksimum yang diakibatkan oleh intensitas gempa rencana yang ditentukan.
4. Mengevaluasi level kinerja struktur ketika titik kontrol tepat berada pada target perpindahan : merupakan hal utama dari perencanaan berbasis kinerja. Komponen struktur dan aksi perilakunya dapat dianggap memuaskan jika memenuhi kriteria yang dari awal sudah ditetapkan, baik terhadap persyaratan deformasi maupun kekuatan. Karena yang dievaluasi adalah komponen maka jumlahnya relatif sangat banyak, oleh karena itu proses ini sepenuhnya harus dikerjakan oleh computer (fasilitas *pushover* dan evaluasi kinerja yang terdapat secara *built-in* pada program SAP2000, mengacu pada FEMA - 356).

Proses *pushover* bisa dilakukan dengan prosedur *load-controlled* atau *displacement-controlled*. Prosedur *load-controlled* digunakan jika beban yang diaplikasikan telah diketahui nilainya. Misalnya, beban gravitasi bisa diaplikasikan dalam *pushover load-controlled*. Prosedur *displacement-controlled* biasanya

digunakan jika beban yang bisa ditahan oleh suatu struktur belum diketahui dengan pasti sehingga beban tersebut ditingkatkan sampai struktur mencapai suatu nilai simpangan target (Aisyah dan Megantara, 2011).

2.4.1 Batas Kinerja

Berdasarkan filosofi desain yang ada, tingkat kinerja struktur bangunan akibat gempa rencana adalah *Life Safety*, yaitu walaupun struktur bangunan mengalami tingkat kerusakan yang cukup parah namun keselamatan penghuni tetap terjaga karena struktur bangunan tidak sampai runtuh. Pada Gambar 2.2, respon linier dimulai dari titik A (*unloaded component*) dan kelelahan mula terjadi pada titik B. Respon dari titik B ke titik C merupakan respon elastis plastis. Titik C merupakan titik yang menunjukkan puncak kekuatan komponen, dan nilai absisnya yang merupakan deformasi menunjukkan dimulainya degradasi kekuatan struktur (garis C-D). Pada titik D, respon komponen struktur secara substansial menghadapi pengurangan kekuatan menuju titik E. Untuk deformasi yang lebih besar dari titik E, kekuatan komponen struktur menjadi nol (FEMA 451, 2006).



Gambar 2. 7 Kurva Kriteria Kerusakan (FEMA 356, 2000)

Antara titik B dan C terdapat titik-titik yang merupakan level kinerja dari struktur bangunan. Level kinerja bangunan (ATC-40, 1996) dibedakan menjadi lima level sebagai berikut :

1 *Immediate Occupancy* (IO)

Kondisi yang menjelaskan bahwa setelah terjadinya gempa, kerusakan struktur sangat terbatas. Sistem penahan beban vertikal dan lateral bangunan hampir sama

dengan kondisi sebelum terjadinya gempa, dan resiko korban jiwa akibat keruntuhan struktur dapat diabaikan.

2 *Damage Control*

Kondisi ini bukanlah merupakan level kinerja dari struktur, melainkan kondisi yang menjelaskan bahwa setelah terjadinya gempa, kerusakan yang terjadi berada dalam *range* antara IO dan LS

3 *Life Safety (LS)*

Kondisi yang menjelaskan bahwa setelah terjadinya gempa, kerusakan yang penting terhadap struktur terjadi. Komponen utama struktur tidak terdislokasi dan runtuh, sehingga risiko korban jiwa terhadap kerusakan struktur sangat rendah.

4 *Limited Safety*

Kondisi ini bukanlah level kinerja dari struktur, melainkan kondisi yang menjelaskan bahwa setelah terjadinya gempa, kerusakan yang terjadi berada dalam *range* antara LS dan CP.

5 *Structural Stability / Collapse Prevention (CP)*

Pada tingkatan ini, kondisi struktur setelah terjadinya gempa sangat parah, sehingga bangunan dapat mengalami keruntuhan struktur baik sebagian maupun total. Meskipun struktur masih bersifat stabil, kemungkinan terjadinya korban jiwa akibat kerusakan struktur besar. Dalam dokumen FEMA 273, kondisi *structural stability* dikenal dengan istilah *Collapse Prevention (CP)*.

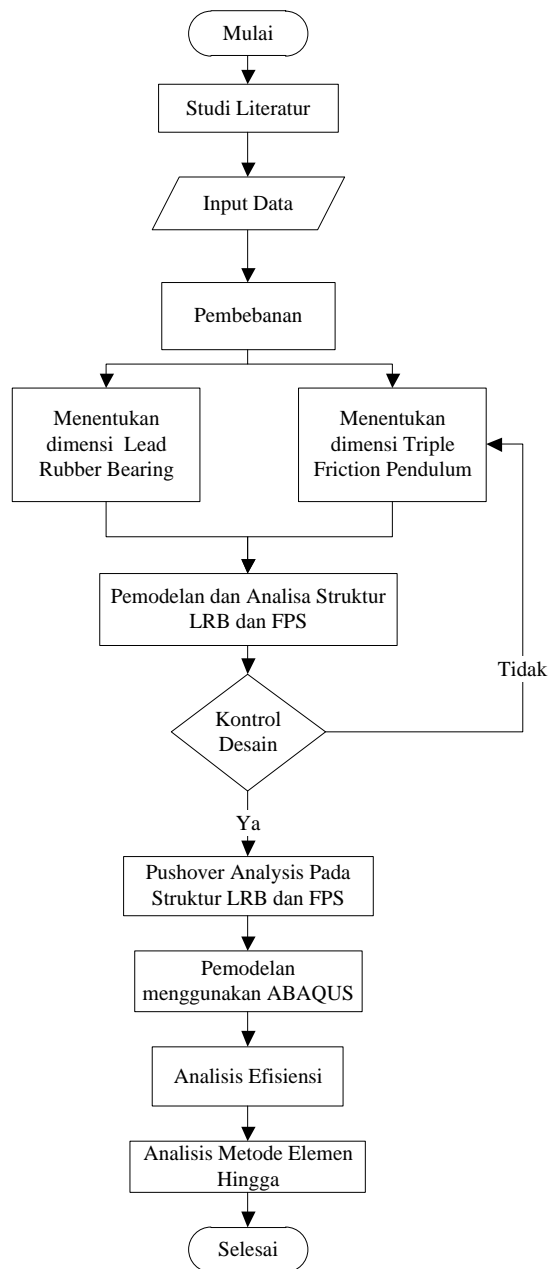
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI

3.1 Skema Penelitian

Dalam penyelesaian studi ini diperlukan metode dan urutan yang jelas dan sistematis. Tahapan- tahapan yang akan dilakukan pada studi ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Flowchart Perencanaan

3.2 Studi Literatur

Studi literatur adalah mencari referensi teori yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang ditemukan. Sumber literatur berupa jurnal ilmiah, buku, laporan penelitian, tesis, disertasi, majalah, dokumen pemerintah, dan media cetak maupun elektronik. Berikut ini merupakan literatur yang dipakai pada studi:

- a. SNI 1725:2016 tentang “*Pembebanan untuk jembatan*”
- b. SNI 2833: 2016 tentang “*Perancangan jembatan terhadap beban gempa*”
- c. SNI 1729:2015 tentang “*Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*”
- d. SNI 1727:2013 tentang “*Beban Minimum untuk Perancangan Gedung dan Struktur lain*”.
- e. SNI 1726:2012 tentang “*Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*”.
- f. FEMA 356 “*Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*”
- g. *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*

3.2.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dan informasi struktur yang akan dimodelkan pada struktur ini yaitu Proyek LRT (*Light Rail Transit*) direncanakan akan menghubungkan wilayah tengah kota Jakarta dengan daerah pinggiran kota.

3.3 Desain Struktur

Pada tahap *preliminary Design* dilakukan perkiraan dimensi awal dari elemen-elemen struktur pada jembatan. Terdapat beberapa spesifikasi yang akan digunakan, yaitu spesifikasi material yang meliputi spesifikasi beton, tulangan baja dan *bearing pad*.

1. Spesifikasi Beton

Tabel 3. 1 Spesifikasi Kuat Tekon Beton

Komponen Struktur	f'_c (MPa)	E_c (MPa)	Poisson ratio	Koef suhu thermal beton Per 1° C	Faktor Ultimate untuk creep	Koef. Shrinkage
Pier	33.2	27081	0.2	12×10^{-6}	2	0.0002
Poer	29	25310				
Tiang Pancang (Tusuk konde / Pile Head Treatment (PHT))	50	33234				

2. Spesifikasi Tulangan Baja

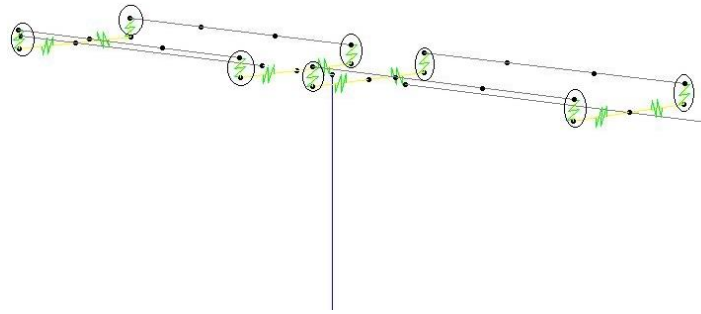
Pada perencanaan beton bertulang, ada tiga jenis tipe tulangan yang dipakai. Dimana masing-masing mutu tulangan tersebut berbeda-beda. Adapun mutu tulangan tersebut dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 3. 2 Spesifikasi Mutu Tulangan Dalam Desain

Jenis Tulangan	F_y (MPa)	E_s (MPa)	Poisson ratio
Tulangan polos	240	200000	0.3
Tulangan ulir	400		
Wire mesh	500		

3. Spesifikasi *Bearing Pad*

Agar struktur jembatan memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mendisipasikan beban gempa, maka pada struktur jembatan dipasang *Seismic Isolation Bearing* dengan jenis LRB (*Lead Rubber Bearing*) dengan pengaturan seperti yang di tunjukkan pada gambar.



Gambar 3. 2 Pemodelan Posisi Seismic Bearing

Jenis *seismic bearing* yang digunakan adalah tipe *Lead Rubber Bearing* (LRB) dengan properti fisik yang ditampilkan pada tabel sebagai berikut:

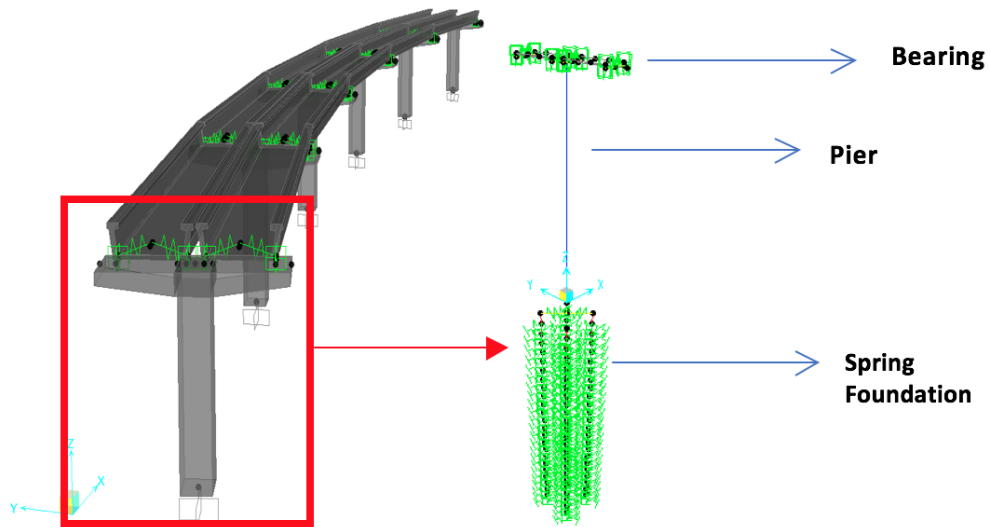
Agar struktur jembatan memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mendisipasikan beban gempa, maka pada struktur jembatan dipasang *seismic isolation bearing* dengan jenis LRB (*Lead Rubber Bearing*) dengan pengaturan seperti yang di tunjukkan pada Gambar. Jenis *seismic bearing* yang digunakan adalah tipe *Lead Rubber Bearing* (LRB) dengan properti fisik yang ditampilkan pada tabel sebagai berikut:

Tabel 3. 3 Detail Spesifikasi *Bearing*

Properti Material	LRB Tipe 1	LRB Tipe 2	LRB Tipe 3
Bearing Displacement	< 315mm	< 315 mm	< 315 mm
Stiffness	4,3 kN/mm	5,53 kN/mm	3,15 kN/mm
Yield strength	80 kN	80 kN	80 kN
height	252 mm	298 mm	356 mm

3.4 Sistem Struktur

Sistem struktur yang akan dibahas dalam laporan ini menggunakan model *elevated structures* (struktur lintas atas) dengan dua jalur kereta yang ditahan menggunakan balok girder prategang yang ditumpu pada pilar (*pier*) beton bertulang dengan sistem *simply supported beam* (tumpuan sederhana) (lihat Gambar 3.3). Struktur pier merupakan struktur kolom beton bertulang. Pada studi ini hanya akan ditinjau 1 pilar saja.



Gambar 3. 3 Model Struktur LRT

3.5 Model Struktur

1) Bearing Pad:

- Bearing pad juga disebut rubber isolator.
- Bearing pad dimodelkan sebagai link

2) Pier Head:

- Pier Head akan menerima beban dari bearing pad
- Pier Head dimodelkan sebagai frame

3) Pier atau Pilar:

- Pier atau pilar memiliki sifat seperti kolom.
- Pier dimodelkan sebagai frame
- Hubungan Pier dengan Poer menggunakan model link
- Poer dimodelkan sebagai perletakkan Jepit

3.6 Pembebanan

Model Beban yang bekerja pada struktur LRT terdiri dari:

1. Beban Mati (DL)
2. Beban Superimposed DL
3. Beban Hidup Kereta Api (LL)
4. Beban Impact

5. Beban Longitudinal
6. Beban Angin
7. Hunting Force
8. Beban Gempa

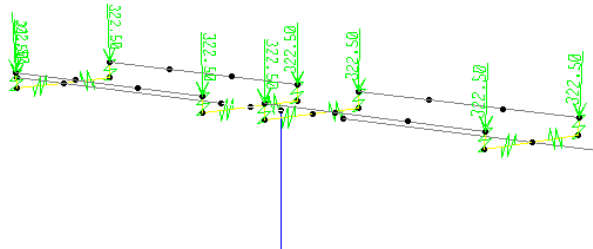
Berikut adalah penjelasan dari masing-masing macam beban di atas.

3.6.1 Beban mati (DL)

Berat Sendiri Girder dihitung secara otomatis oleh program SAP2000. Berat sendiri struktur juga dapat dihitung secara manual dengan nilai luas penampang, panjang bentang dan berat struktur.

3.6.2 Beban *Superimposed DL*

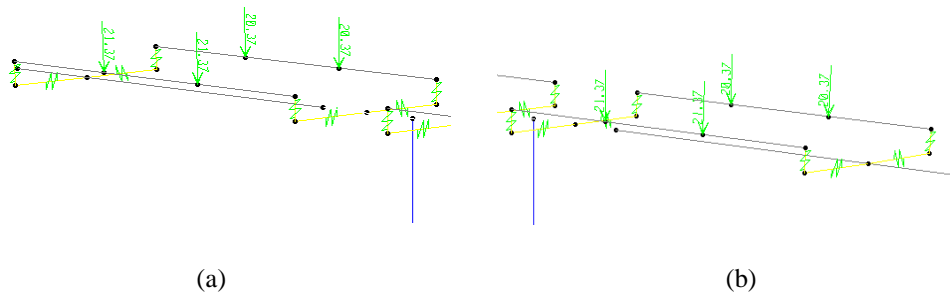
Beban tambahan struktur terdiri dari beban rel dan beban plinth, dengan besaran 2.15 t/m. Gambar 3.4 menampilkan pembebanan *superimposed dead load* pada SAP2000 yang dimodelkan sebagai beban merata disepanjang girder. Beban tambahan struktur terdiri dari beban rel dan beban plinth, dengan besaran 322.5 kN/m. Pembebanan *superimposed dead load* pada SAP2000 yang dimodelkan sebagai beban titik.



Gambar 3. 4 Beban Superimposed

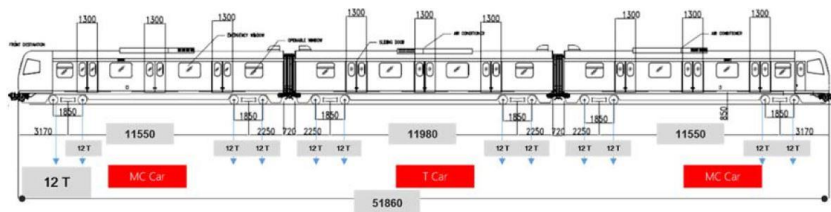
3.6.3 Beban hidup (LL)

Beban hidup dimodelkan sebagai beban titik, dimana beban untuk masing-masing axle pada kereta sebesar 12 ton yang kemudian dirubah menjadi beban titik dengan adanya penyesuaian antara konfigurasi pembebanan dengan panjang bentang sepanjang 30 m. Sehingga didapatkan beban sebesar 21.365 ton m dan 20.635 ton m (Gambar 3.5).



Gambar 3. 5 Beban Hidup (a) *Train Left* (b) *Train Right*

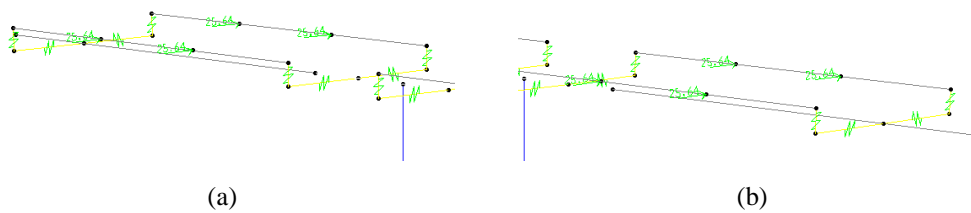
Sementara itu, beban impact yang digunakan adalah 30% dari beban hidup. Gambar 3.6 menampilkan konfigurasi pembebanan untuk setiap axle pada kereta.



Gambar 3. 6 Konfigurasi pembebanan untuk setiap axle pada kereta

3.6.4 Beban longitudinal

Besar beban *longitudinal force* yang diakibatkan oleh beban hidup mengacu kepada ACI 343 1R-12 sebesar 0.15-0.3 LL. Gambar 3.7 menampilkan pembebanan *longitudinal force* pada SAP2000 yang dimodelkan sebagai beban terpusat pada joint untuk arah memanjang jembatan. Untuk Beban ultimate sebesar 251.4 kN/m dan 125.7 kN/m untuk beban servis.



Gambar 3. 7 Beban Longitudinal (a) *Left* (b) *Right*

3.6.5 Beban angin

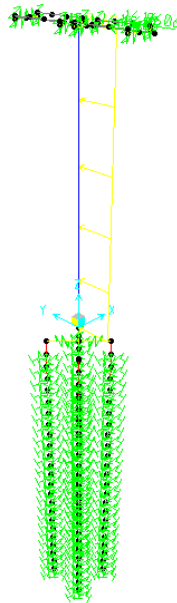
Beban angin bekerja di beberapa bidang yang terkena angin yaitu:

1. Di salah satu sisi bidang balok girder
2. Di sepanjang pier (pilar)
3. Di salah satu sisi bidang kereta api

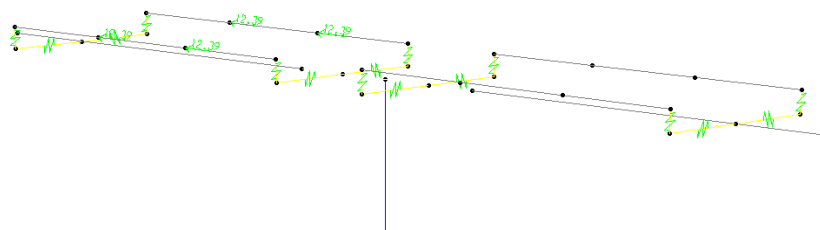
Sesuai dengan peraturan menteri perhubungan PM. 60 tahun 2012 terdapat 2 macam beban angin:

- Beban angin yang bekerja satu sisi bidang dari struktur (3 kN/m^2). Karena beban yang diinput berupa beban titik, maka dikalikan dengan panjang bentang dan lebar girder sehingga menjadi 157.5 kN/m^2
- Beban angin yang bekerja di bidang kereta api (1.5 kN/m^2). Karena beban yang diinput berupa beban titik, maka dikalikan dengan panjang bentang dan lebar girder sehingga menjadi 121.5 kN/m^2

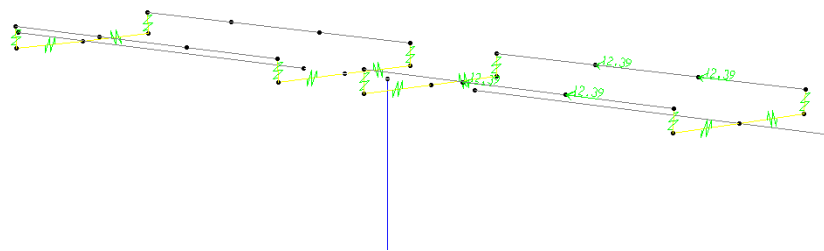
Model beban bisa dilihat di bawah ini:



Gambar 3. 8 Beban Angin Pada Struktur



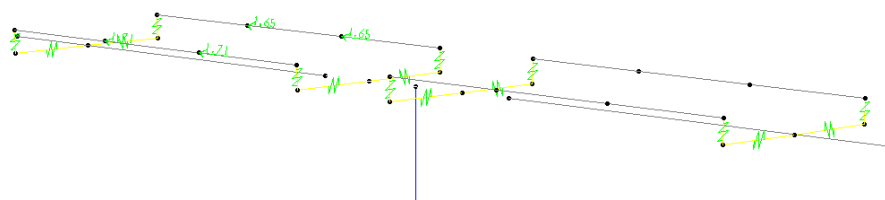
Gambar 3. 9 Beban Angin Pada *Train Left*



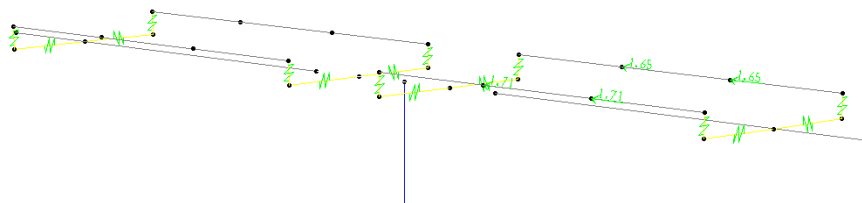
Gambar 3. 10 Beban Angin Pada *Train Left Right*

3.6.6 Beban *Hunting force*

Beban *Hunting force* terjadi akibat interaksi lateral kendaraan dengan *guideway*. Beban ini bekerja pada rel dan arahnya lateral sebesar 8%LL. Model beban bisa dilihat di bawah ini:



Gambar 3. 11 Beban *Hunting Force Left*



Gambar 3. 12 Beban *Hunting Force Right*

3.6.7 Beban gempa

Beban gempa dihitung menggunakan bantuan perangkat lunak SAP 2000 dengan metode analisis *Time History*. Data gempa diambil pada wilayah gempa daerah Surabaya. Data gempa diambil dari www.petagempa.pusjatan.pu.go.id sehingga didapatkan nilai PGA, S_s dan S_1 . Data yang telah didapat kemudian dihitung untuk mendesain respon spektrum 1000 tahun berdasarkan SNI 1726-2012. Perhitungan Beban Gempa dilakukan sesuai dengan peraturan gempa SNI 03-1726-2012 dengan tahapan:

1) Menentukan kategori resiko bangunan gedung I-IV (SNI-1726-2014 Pasal 4.1.2)

Tabel 3. 4 Kategori Resiko Bangunan Gedung dan Non Gedung Untuk Beban Gempa

Jenis Pemakaian	Kategori Resiko
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki resiko rendah terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk, antara lain:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fasilitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan perikanan - Fasilitas sementara - Gudang penyimpanan - Rumah jaga dan struktur kecil lainnya 	I
<p>Semua gedung dan struktur lain, kecuali yang termasuk dalam kategori risiko I, III, IV, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Perumahan - Rumah toko dan rumah kantor - Pasar - Gedung perkantoran - Gedung apartemen/ Rumah susun - Pusat perbelanjaan/ Mall - Bangunan industri - Fasilitas manufaktur - Pabrik 	II
<p>Gedung dan non gedung yang memiliki resiko tinggi terhadap jiwa manusia pada saat terjadi kegagalan, termasuk, tapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bioskop - Gedung pertemuan - Stadion - Fasilitas kesehatan yang tidak memiliki unit bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas penitipan anak - Penjara - Bangunan untuk orang jompo <p>Gedung dan struktur lainnya, tidak termasuk kedalam kategori risiko IV, yang memiliki potensi untuk menyebabkan dampak ekonomi yang besar dan/atau gangguan massal terhadap kehidupan masyarakat sehari-hari bila terjadi kegagalan, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pusat pembangkit listrik biasa - Fasilitas penanganan air - Fasilitas penanganan limbah - Pusat telekomunikasi <p>Gedung dan non gedung yang tidak termasuk dalam kategori risiko IV, (termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk fasilitas manufaktur, proses, penanganan, penyimpanan, penggunaan atau tempat pembuangan bahan bakar berbahaya, bahan kimia berbahaya, limbah berbahaya, atau bahan yang mudah meledak) yang mengandung bahan beracun atau peledak di mana jumlah kandungan bahannya melebihi nilai batas yang disyaratkan oleh instansi yang berwenang dan cukup menimbulkan bahaya bagi masyarakat jika terjadi kebocoran.</p>	III

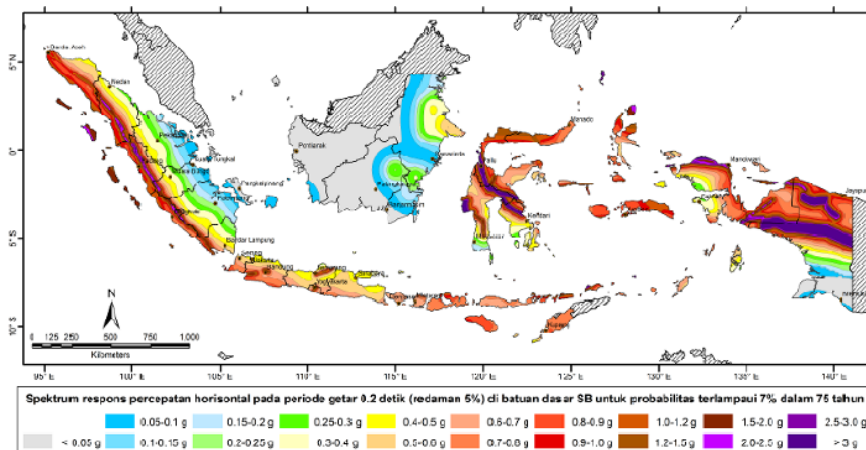
<p>Gedung dan non gedung yang ditunjukkan sebagai fasilitas yang penting, termasuk, tetapi tidak dibatasi untuk:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bangunan-bangunan monumental - Gedung sekolah dan fasilitas pendidikan - Rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya yang memiliki fasilitas bedah dan unit gawat darurat - Fasilitas pemadam kebakaran, ambulans, dan kantor polisi, serta garasi kendaraan darurat - Tempat perlindungan terhadap gempa bumi, angin badai, dan tempat perlindungan darurat lainnya - Fasilitas kesiapan darurat, komunikasi, pusat operasi dan fasilitas lainnya untuk tanggap darurat - Pusat pembangkit energi dan fasilitas public lainnya yang dibutuhkan pada saat keadaan darurat - Struktur tambahan (termasuk menara telekomunikasi, tangki penyimpanan bahan bakar, menara pendingin, struktur stasiun listrik, tangki air pemadam kebakaran atau struktur rumah atau struktur pendukung air atau material atau peralatan pemadam kebakaran) yang disyaratkan untuk beroperasi pada saat keadaan darurat <p>Gedung dan non gedung yang dibutuhkan untuk mempertahankan fungsi struktur bangunan lain yang masuk ke dalam kategori risiko IV.</p>	IV
---	----

2) Menentukan faktor keutamaan gempa (SNI-1726-2012 Pasal 4.1.2)

Tabel 3. 5 Faktor Keutamaan Gempa

Kategori risiko	Faktor keutamaan gempa, I_e
I atau II	1.0
III	1.25
IV	1.50

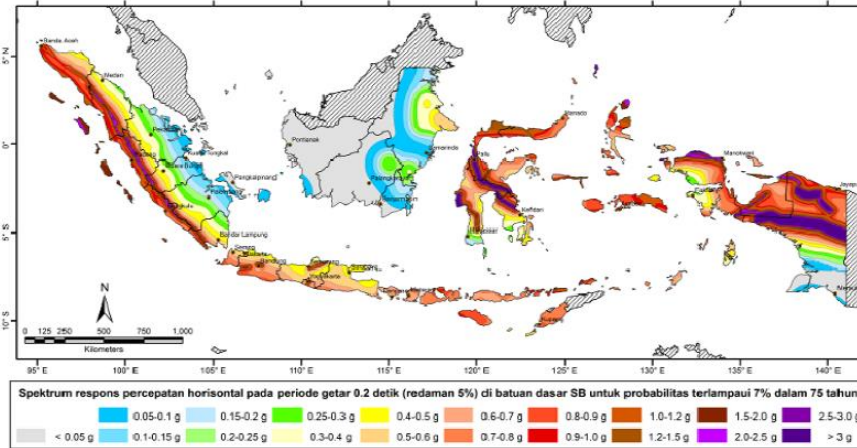
3) Menentukan Nilai PGA sesuai dengan SNI 2833-2013 Pasal 5.2.1 Gambar 1.



Gambar 5 - Peta respons spektra percepatan 0.2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

Gambar 3. 13 Peta Respon Spektra Percepatan 0.2 detik di Batuan Dasar untuk Probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (PGA)

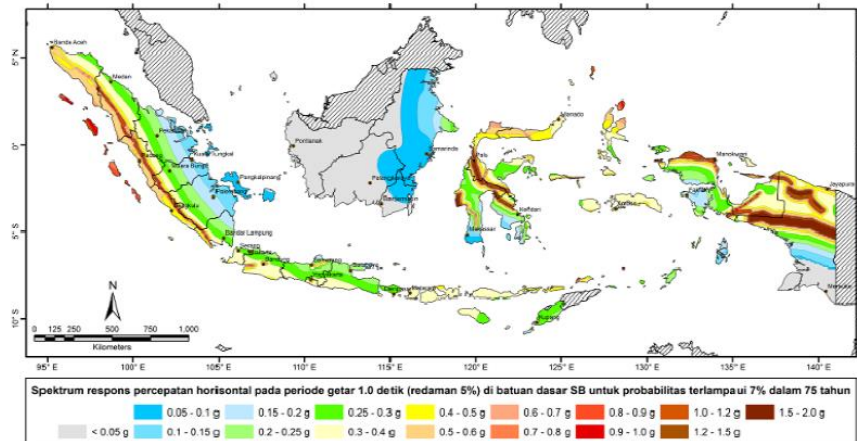
- 4) Menentukan percepatan tanah (SNI 2833-2013) Pasal 5.2.1
 S_s = adalah parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode pendek ($T=0.2$ detik) mengacu pada Peta Gempa Indonesia 2010 (Gambar 5);



Gambar 5 - Peta respons spektra percepatan 0.2 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

Gambar 3. 14 Peta Respon Spektra Percepatan 0.2 detik di Batuan Dasar untuk Probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (S_s)

- S_I = parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode 1.0 detik mengacu pada Peta Gempa Indonesia 2010 (Gambar 6) ;



Gambar 6 - Peta respons spektra percepatan 1 detik di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

Gambar 3. 15 Peta Respon Spektra Percepatan 1.0 detik di Batuan Dasar untuk Probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun (S_I)

- 5) Menentukan Klasifikasi Situs (SNI-1726-2012 Pasal 5.3)

Tabel 3. 6 Klasifikasi Situs

Kelas Situs			
SA (batuan keras)	>1500 m/s	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500 m/s	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750 m/s	>50	≥ 100 kN/m ²

SD (tanah sedang)	175 sampai 350 m/s	15-50	50 sampai 100 kN/m ²
SE (tanah lunak)	< 175 m/s	< 15	<50 kN/m ²
	Atau setiap profil tanah yang mengandung 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : Indeks plastisitas, $PI > 20$ Kadar air, $w \geq 40\%$ Kuat geser niralir < 25 kPa		
SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut : Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat senditif, tnah tersementasi lemah Lempung sangat organik dan/ atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)		
	- Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan $PI > 75$ Lapisan lempung lunak/ setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan < 50 kPa		

6) Menentukan faktor koefisien situs (F_a , F_v , F_{PGA}) (SNI-2833-2013 Pasal 5.3.2)

Untuk penentuan respons spektra di permukaan tanah, diperlukan suatu factor amplifikasi pada periode nol detik, periode pendek ($T=0,2$ detik) dan periode 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode nol detik (F_{PGA}), faktor amplifikasi periode pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 1 detik (F_v). Tabel 3.6 dan Tabel 3.7

Tabel 3. 7 Faktor amplifikasi untuk periode 0 detik dan 0,2 detik (F_{PGA}/F_a)

Klasifikasi Situs	$PGA \leq 0.1$	$PGA = 0.2$	$PGA = 0.3$	$PGA = 0.4$	$PGA > 0.5$
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
Batuan Keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah Keras (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah Sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah Lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Tabel 3. 8 Besarnya nilai faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (F_v)

Klasifikasi Situs	$S_I \leq 0,1$	$S_I = 0,2$	$S_I = 0,3$	$S_I = 0,4$	$S_I \geq 0,5$
Batuan Keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah Keras (SC)	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
Tanah Sedang (SD)	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
Tanah Lunak (SE)	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

7) Menghitung parameter percepatan desain (S_{DS} , S_{D1}) (SNI-2833-2013 Pasal 5.4)

Respons spektra di permukaan tanah ditentukan dari 3 (tiga) nilai percepatan puncak yang mengacu pada peta gempa Indonesia 2010 (P_{GA} , S_s dan S_1), serta nilai factor amplifikasi F_{PGA} , F_a , dan F_v . Perumusan respons spektra adalah sebagai berikut:

$$A_s = F_{PGA} \cdot P_{GA} \quad (3.1)$$

$$S_{DS} = F_a \cdot S_s \quad (3.2)$$

$$S_{D1} = F_v \cdot S_1 \quad (3.3)$$

$$T_0 = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.4)$$

$$T_0 = 0.2T_s \quad (3.5)$$

Setelah itu, data respon spektrum yang dihasilkan kemudian dirubah menjadi grafik *time history* dengan menggunakan bantuan *software* SMQKE. Data *time history* yang akan digunakan sebanyak 7 data gempa dimana itu merupakan rata rata dari pergerakan gempa yang dihasilkan.

3.7 Pemodelan dan Analisa Struktur LRB dan FPB

Pemodelan untuk LRB dan FPB akan dimodelkan menggunakan *software* SAP2000. Pemodelan akan disesuaikan dengan detail dan spesifikasi LRB dan FPB pada brosur.

3.8 Pushover Analisis pada Struktur LRB dan FPB

Dalam perencanaan ini menggunakan analisis struktur dengan metode Analisis statik nonlinear Pushover yang merupakan analisis yang dilakukan untuk menggambarkan perilaku keruntuhan dan kapasitas dari suatu struktur secara keseluruhan, mulai dari kondisi elastis, plastis, hingga elemen-elemen struktur mengalami keruntuhan akibat beban gempa. Dengan kata lain, analisis pushover digunakan sebagai sarana untuk memperlihatkan kondisi/ respon inelastis (nonlinear) suatu bangunan saat mengalami gempa. Analisis ini dilakukan dengan cara memberikan pola beban lateral statik pada struktur yang nilainya terus ditingkatkan secara bertahap hingga mencapai target perpindahan (*displacement*) dari suatu titik acuan. Pada analisis ini yang menjadi titik acuan adalah titik pada

lantai atap dan besarnya deformasi maksimum yang boleh terjadi pada struktur ditetapkan terlebih dahulu oleh perencana.

3.9 Analisis Efisiensi

Setelah melakukan desain jembatan dengan menggunakan FPB dan LRB, maka dilakukan analisis efisiensi pada struktur. Analisis ini dilihat dari hasil *pushover* analisis yang dihasilkan. Aspek yang akan ditinjau yaitu tingkat kerusakan, level kinerja struktur, *displacement*, gaya geser dasar, daktilitas, respon struktur dan juga energi yang di dissipasi struktur pada kondisi gempa desain dan gempa rencana maksimum. Selain itu dilakukan juga analisa *pushover* untuk mengevaluasi keruntuhan struktur.

3.10 Analisa Metode Elemen Hingga

Analisa metode elemen hingga akan dilakukan untuk memodelkan *pier* beton bertulang dalam bentuk 3 dimensi. Dari hasil analisis ini akan dilakukan verifikasi dengan hasil dari SAP2000. Dalam analisis ini juga akan dilihat mekanisme sendi plastis dan kerusakan yang terjadi pada elemen. Sehingga gambaran dari perilaku dan kemampuan elemen dalam menerima beban dapat diketahui. Analisa metode elemen hingga ini dilakukan dengan program bantu ABAQUS. Berikut ini merupakan tahapan yang dilakukan dalam melakukan Analisa metode elemen hingga:

1. Menggambar elemen struktur

Penggambaran elemen struktur disesuaikan dengan ukuran dan material yang dimodelkan pada SAP2000 sehingga dapat dilakukan validasi hasil.

2. Input *material properties*

Model struktur yang akan dibuat yaitu beton bertulang sehingga input material yang dibutuhkan yaitu beton dan baja. Berikut penjelasan dari masing masing material:

Beton

Pada input material beton, terdapat beberapa parameter yaitu *general* dan *mechanical*. Pada material *general* dilakukan input *density* beton sedangkan pada *mechanical* terdapat 2 *material behaviour* yaitu *elasticity* dan *plasticity*. Pada *elasticity* dipilih perilaku material *elastic* dimana perlu diinput nilai

modulus young dan *poisson ratio* dari beton. Pada *plasticity* dipilih CDP (*Concrete Damage Plasticity*). Model CDP pada analisa ini memiliki fungsi yang menunjang dalam proses simulasi (Irawan, 2017), yaitu:

- Menyediakan kemampuan umum untuk memodelkan beton dan material *quasi- brittle* pada semua jenis struktur (*beam, truss, shell*, dan elemen *solid* lainnya)
- Menggunakan konsep *isotropic damaged elasticity* yang dikombinasikan dengan *isotropic tensile* dan *compressive plasticity* untuk mengetahui perilaku inelastic dari material beton.
- Dapat digunakan untuk beton bertulang
- Didesain sebagai aplikasi pada beton akibat beban monotonic, siklis maupun beban dinamis.
- Dapat mengontrol efek *stiffnes recovery* selama pembebanan siklis yang mengindikasikan degradasi kekakuan dari suatu model.
- Dapat digunakan untuk mengontrol *viscosity* untuk meningkatkan tingkat konvergensi dalam proses iterasi selama proses *running*.
- Model/ eleme struktur dengan material beton sangat fleksibel dan mampu diprediksi perilaku strukturnya akibat pembebanan. Berdasarkan kondisi struktur yang menerima beban, maka dapat diasumsikan bahwa ada dua mekanisme kegagalan yang terjadi yaitu *tensile cracking* dan *compressive crushing* dari material betonnya.

Pada CDP terdapat beberapa parameter yang perlu diinput, yaitu *Plasticity*, *compressive behavior* dan *tensile behavior*. Data yang diinput pada *plasticity* diambil dari sebuah pendekatan oleh Kmiecik dan Kaminski (2011) yang terdapat pada Tabel 3.9

Tabel 3. 9 Parameter *Plasticity* Beton

<i>Dilatation Angle</i> (Ψ)	<i>Eccentricity</i>	<i>Biaxial/ uniaxial compression plastic strain ratio</i> (f_{bo}/f_{co})	<i>Deviatoric stress invariant ratio</i> (K)	<i>Viscosity Parameter</i>
36	0.1	1.16	0.667	0

Parameter *plasticity* dijabarkan oleh Kmiecik dan Kaminski (2011) memiliki penjelasan sebagai berikut:

- *Dilatation angle* adalah sudut kemiringan permukaan kegagalan terhadap sumbu hidrostatik, diukur pada bidang meridional. Secara fisik, *dilatation angle* adalah sudut pelebaran yang ditafsirkan sebagai sudut geser beton
- *Eccentricity* adalah nilai positif kecil yang menyatakan tingkat pendekatan dari hiperbola potensial plastis ke asimtot.
- F_{b0}/f_{c0} adalah rasio kekuatan di daerah biaksial terhadap kekuatan di daerah uniaxial.
- K adalah rasio jarak antara sumbu hidrostatik dari meridian tekan dan meridian Tarik di penampang deviatoric.
- *Viscosity parameter* adalah parameter dari tahanan aliran fluida yang merupakan gesekan antara molekul molekul cairan satu dengan yang lain.

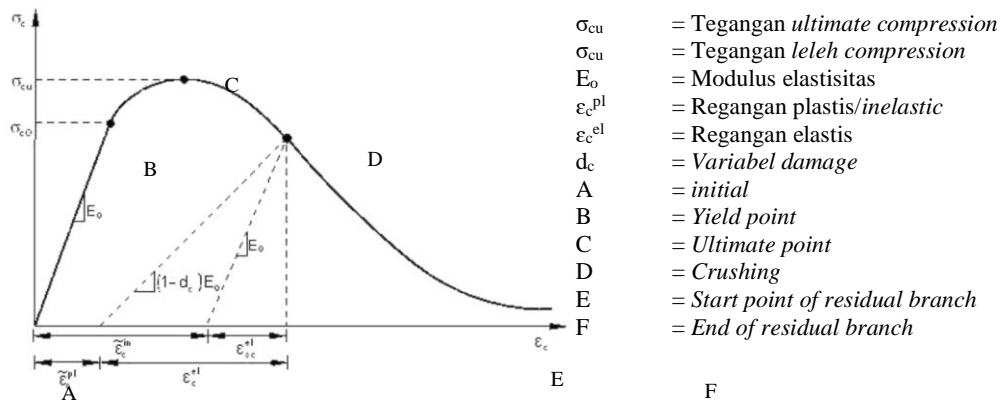
Data yang diinput pada *compressive behavior* berupa nilai tegangan regangan tekan beton pasca elastis. Kurva tegangan-regangan beton akibat beban tekan uniaksial dapat dilihat pada Gambar 3.16. Untuk parameter respon tegangan regangan tekan beton dirumuskan pada persamaan 3.1 (Kmiecik dan kaminski,2011). Untuk rumusan regangan nominal ultimate, tegangan tekan pada titik leleh dan tegangan pada titik plastis ditunjukkan pada persamaan 3.2 sampai 3.6.

$$\varepsilon_{cr} = 0.0014[2 - \exp(-0.024f_{cm}) - \exp(-0.140f_{cm})] \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{cul} = 0.0035 \quad (3.2)$$

$$\sigma_c = 0.4f_{cm} \text{ (Titik A-B)} \quad (3.3)$$

$$\sigma_t = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\mu}, \eta \leq \frac{\varepsilon_{cul}}{\varepsilon_c} \text{ (Titik B-C-D)} \quad (3.4)$$



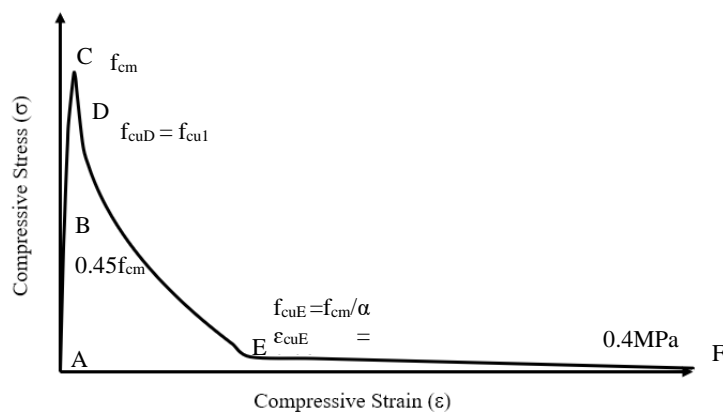
Gambar 3. 16 Kurva Tegangan Regangan Beton Akibat Beban Tekan Uniaksial (Kmiecik dan kaminski,2011)

Perilaku tekan pada beton diketahui hanya sebatas pada regangan nominal ϵ_{cu1} sehingga dapat menyebabkan overestimasi terhadap *crushing strength* dari beton. Oleh karena itu, kurva *compression stress-strain* pada EN 1994-1-1: *Eurocode 4* diperpanjang melebihi regangan nominal ultimit pada beton dengan persamaan:

$$\sigma_c \epsilon_c = f_{cm} \left[\frac{1}{\beta} - \frac{\sin\left(\mu^{\sigma_{cu}} \cdot \frac{\alpha_{tE}\pi}{2}\right)}{\beta \sin\left(\frac{\alpha_{tE}\pi}{2}\right)} + \frac{\mu}{\alpha} \right] \epsilon_{cuD} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cuE} \quad (\text{Point D-E}) \quad (3.5)$$

$$\sigma_c \epsilon_c = \frac{[f_{cuE}(\epsilon_{cuF} - \epsilon_c) + f_{cuF}(\epsilon_c - \epsilon_{cuE})]}{(\epsilon_{cuF} - \epsilon_{cuE})}, \epsilon_c > \epsilon_{cuE} \quad (\text{Point E-F}) \quad (3.6)$$

Gambar diagram tegangan dan regangan berdasarkan perumusan perhitungan dari Pavilic dkk,2013 seperti pada Gambar 3.17



Gambar 3. 17 Kurva Tegangan-Regangan Beton Akibat Beban Tekan Uniaksial (Pavlovic dkk, 2013)

Data yang diinput pada *tensile behavior* berupa nilai tegangan regangan tekan beton pasca elastis. Kurva tegangan-regangan beton akibat beban Tarik uniaksial dapat dilihat pada Gambar 3.17. Untuk parameter respon tegangan regangan tekan beton dirumuskan pada persamaan 3.7 sampai 3.9 (Kmiecik dan kaminski,2011).

Tegangan nominal pada titik leleh (Kmiecik dan kaminski,2011)

$$f_{ct} = 0.62\sqrt{f_{cm}} \quad (3.7)$$

Used stress pada titik leleh (EN1994-1-1: Eurocode 4)

$$f_{cy} = 0.9f_{ct} \quad (3.8)$$

Hubungan tegangan regangan pada kondisi plastis (Wang dan Hsu,2001)

$$\sigma_t = f_{ct} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t} \right)^{0.7}, \varepsilon_t > \varepsilon_{cr} \quad (3.9)$$

Baja

Pada input material baja, terdapat beberapa parameter yaitu *general* dan *mechanical*. Pada material *general* dilakukan input *density* baja sedangkan pada *mechanical* terdapat 2 *material behavior* yaitu *elasticity* dan *plasticity*. Pada *elasticity* dipilih perilaku material *elastic* dimana perlu diinput nilai *modulus young* dan *poisson ratio* dari beton. Pada *plasticity* dipilih *plastic* dimana diinput *yield stress* dari material tersebut.

3. *Assembly*

Setelah melakukan pemodelan tiap *part* maka perlu dilakukan *assembly* untuk membentuk sebuah elemen struktur menjadi satu kesatuan. *Assembly* yaitu pengaturan posisi dari tiap elemen sesuai dengan elemen struktur yang akan dianalisis. Setelah dilakukan *assembly* perlu adanya penggabungan antara kedua elemen (baja dan beton) agar tidak terjadi selip dan elemen tersebut menjadi satu kesatuan. Untuk penggabungan dilakukan pada *module embedded* dimana beton sebagai *host region* dan tulangan baja sebagai *embeded region*.

4. *Input beban dan boundary condition*

Pada elemen struktur dilakukan *input* beban gravitasi, beban luar dan beban *pushover*. Beban gravitasi diberikan agar berat sendiri struktur dihitung oleh

program. Beban luar yang diberikan disesuaikan dengan beban yang di *input* pada SAP2000 dengan tipe beban *pressure*. Untuk beban luar dan beban gravitasi di *input* pada *module load* sedangkan untuk beban *pushover* di *input* pada *boundary condition*. Selain itu pada *boundary condition* juga diatur perletakan yang digunakan. Perletakan yang digunakan yaitu jepit (Encastre $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$).

5. *Meshing*

Pembuatan *meshing* pada elemen struktur dimaksudkan untuk membagi elemen menjadi bagian lebih kecil sehingga analisis elemen akan lebih detail. Ada beberapa tahapan dalam *meshing* elemen, yaitu:

- Kontrol *mesh*, untuk menentukan bentuk elemen yang akan digunakan (*hex, hex-dominated, tet* dan *wedge*).
- *Element Type*, untuk menentukan jenis elemen yang digunakan (*standard, linear, quadratic*)
- *Mesh size*, untuk menentukan ukuran *mesh* yang akan dipakai. Penentuan ukuran *mesh* dapat dilakukan secara manual atau secara otomatis oleh program.

6. Validasi hasil Analisa metode elemen hingga dengan SAP2000

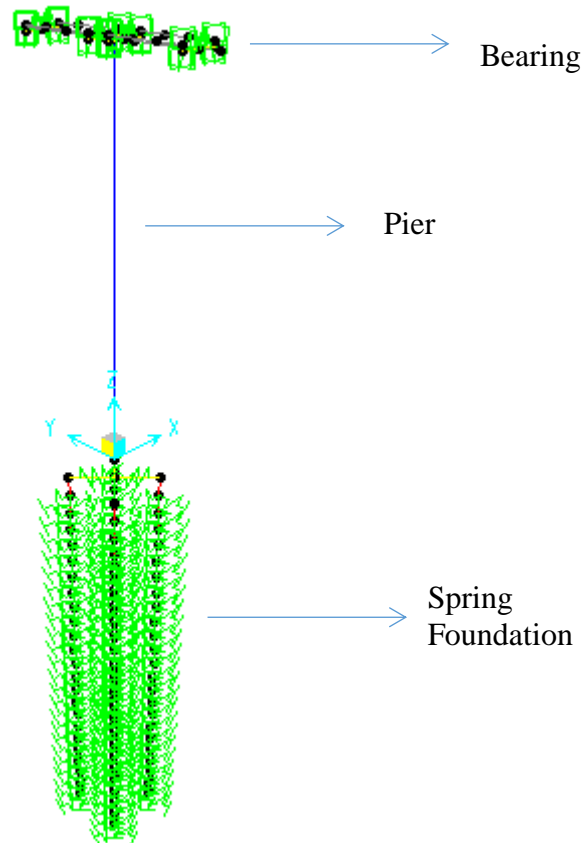
Setelah dilakukan analisis metode elemen hingga, dilakukan validasi terhadap hasil dari SAP2000. Aspek yang ditinjau yaitu sendi plastis yang terjadi dan analisa kerusakan struktur.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur dimodelkan menggunakan *software* SAP2000 dengan model struktur :



Gambar 4. 1 Pemodelan Struktur Pada *Software* SAP2000

Detail struktur:

Dimensi Pier	: 2 x 2 meter
Tinggi Pier	: 16 meter
Jumlah Spun Pile	: 4
Bearing	: Dimodelkan sebagai link (untuk LRB dan FPB)

4.2 Pembebanan Gempa

1) Faktor Keutamaan

Sesuai dengan (SNI-1726-2014 Pasal 4.1.2) untuk berbagai kategori risiko struktur bangunan gedung dan non gedung pengaruh gempa rencana terhadapnya harus dikalikan dengan suatu faktor keutamaan I_e . Struktur

LRT termasuk struktur non gedung sehingga termasuk pada kategori I dan dilihat dari Tabel 3.2 untuk kategori I diperoleh nilai $I=1$.

2) Percepatan Puncak Batuan Dasar (PGA)

Nilai PGA diambil dari Puskim sesuai dengan wilayah yang ditinjau, sehingga untuk wilayah Surabaya didapatkan nilai $PGA = 0.325$

3) Parameter Percepatan Tanah (S_s, S_1)

Sesuai dengan Gambar 3.16 untuk nilai S_s sesuai dengan wilayah perencanaan kota Surabaya berada pada warna kuning dengan range 0.4-0.5 sehingga diambil nilai $S_s = 0.5$. Sedangkan untuk nilai S_1 berada pada range 0.2-0.25g sehingga diambil nilai $S_1 = 0.25$ (Gambar 3.17)

4) Kelas Situs

Kelas situs yang digunakan pada struktur yaitu SE (Tanah Lunak).

5) Faktor Koefisien Situs (F_a, F_v, F_{PGA})

Untuk nilai F_a dapat dilihat pada Tabel 3.6 dengan melihat nilai S_s dan kelas situs nya, sehingga didapatkan nilai $F_a = 1.7$. Sedangkan untuk nilai F_v dilihat pada Tabel 3.7 dengan melihat nilai S_1 dan kelas situs tanah yang dipakai, sehingga didapatkan nilai $F_v = 3$ (interpolasi). Untuk nilai F_{PGA} dilihat pada Tabel 3.6 dengan melihat nilai PGA sehingga didapatkan nilai $F_{PGA} = 1.27$.

6) Parameter Percepatan Desain (S_{DS}, S_{D1})

Untuk menentukan percepatan desain untuk tanah pada periode pendek ($T=0.2$ detik) (S_{DS}) dan pada periode 1.0 (S_{D1}) ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$S_{DS} = F_a \cdot S_s = 1.7 \times 0.5 = 0.85$$

$$S_{D1} = F_v \cdot S_1 = 3 \times 0.25 = 0.75$$

7) Perumusan Respon Spektra

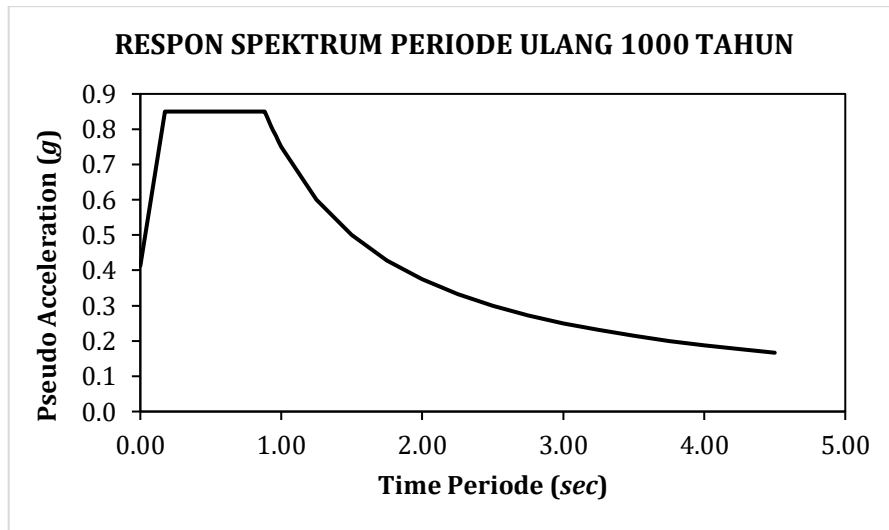
Untuk menentuka perumusan respon spectra ditentukan dengan perumusan:

$$A_s = F_{PGA} \cdot PGA = 1.27 \times 0.325 = 0.41$$

$$T_0 = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = \frac{0.75}{0.85} = 0.18$$

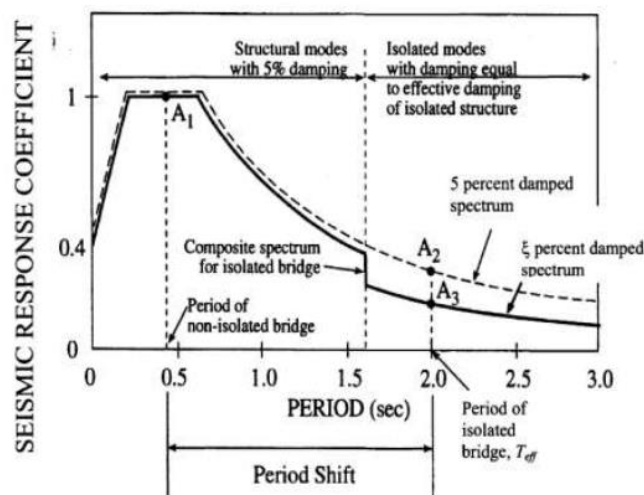
$$T_0 = 0.2T_s = 0.2 \times 0.18 = 0.036$$

Setelah itu, dibuat grafik respon spektrum dari data gempa yang telah dihitung (Gambar 4.2)



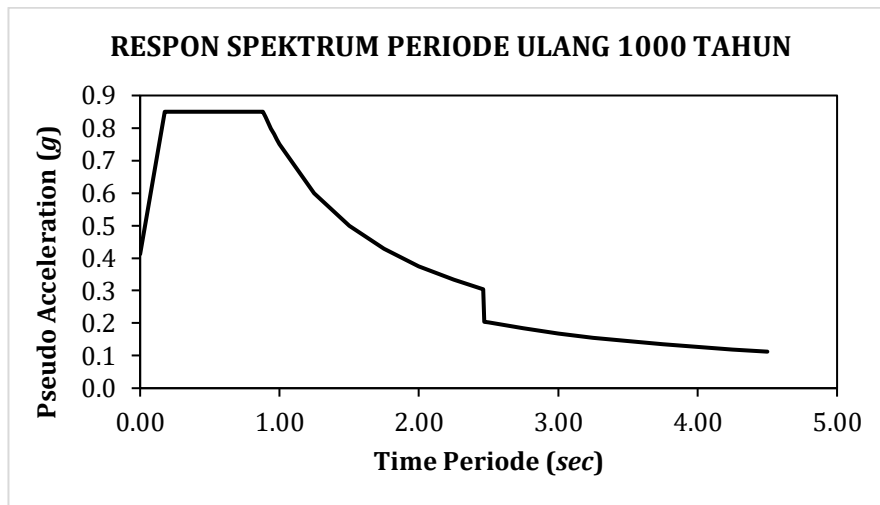
Gambar 4. 2 Grafik Respon Spektrum yang dihasilkan

Gambar diatas merupakan grafik respon spektrum yang dihasilkan untuk struktur tanpa isolasi gempa. Sehingga untuk perencanaan struktur jembatan LRT dengan isolasi gempa grafik diatas perlu dirubah dengan ditambahkan redaman. Menurut peraturan “AASHTO *guide specification for isolation seismic design*” untuk struktur yang diberikan isolasi seismik, didesain seperti pada Gambar 4.3



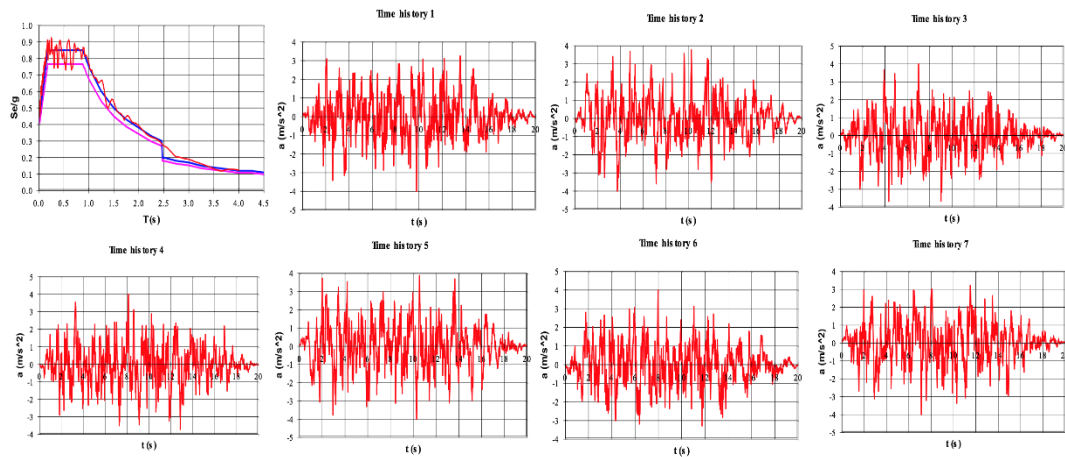
Gambar 4. 3 Respon Spektra untuk Struktur yang diberikan Isolasi Seismik

Dengan menyesuaikan struktur menggunakan isolasi gempa didapatkan grafik respon spektrum baru dengan redaman seperti pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Grafik Respon Spektrum (Isolasi Seismik)

Perencanaan gempa pada struktur ini akan menggunakan *Time History* sehingga data respon spektrum yang dihasilkan perlu dirubah menjadi sebuah grafik. Untuk merubah Respon Spektrum kedalam grafik *Time History* digunakan bantuan *software* SMQKE. Digunakan 7 konfigurasi grafik yang berbeda beda pada struktur jembatan (Gambar 4.5)



Gambar 4. 5 Data *Time History* yang digunakan

4.3 Lead Rubber Bearing (LRB)

Pemodelan LRB dibuat 3 buah dengan dimensi LRB yang berbeda beda. Tabel 4.1 menunjukkan dimensi LRB yang akan digunakan.

Tabel 4. 1 Dimensi LRB yang digunakan

Properti Material	LRB Tipe 1	LRB Tipe 2	LRB Tipe 3
Bearing Displacement	< 315mm	< 315 mm	< 375 mm
Stiffness	4,3 kN/mm	5,53 kN/mm	3,15 kN/mm
Yield strength	80 kN	80 kN	80 kN
height	252 mm	298 mm	356 mm

Dengan dimensi yang sudah ditentukan, maka data yang telah didapatkan dapat diinput kedalam SAP2000. Untuk lebih jelasnya, berikut ini merupakan langkah langkah dalam menentukan dan menghitung LRB:

1. Menentukan dimensi LRB yang akan digunakan

Dalam menentukan dimensi LRB dapat dilihat dari brosur yang sudah ada. Pada studi ini digunakan brosur dari Freyssinet (dapat dilihat pada Lampiran). Namun, data yang tersedia pada brosur perlu diolah kembali karena perlu adanya penyesuaian beban struktur yang ada dengan perencanaan yang dilakukan. Sehingga dilakukan iterasi pada ketiga dimensi LRB yang dipilih. Pemilihan LRB dilakukan berdasarkan kebutuhan struktur yang direncanakan seperti gaya geser, *displacement* dan beban struktur yang ingin dicapai atau sebagai batasan dari perencanaan struktur yang dibuat. Pada pemodelan LRB ini digunakan batasan *displacement* untuk pemodelan LRB < 315mm.

2. Melakukan iterasi LRB

Iterasi dilakukan untuk penyesuaian beban struktur dengan ukuran LRB yang digunakan. Berikut ini merupakan contoh tahapan perhitungan iterasi pada LRB berdasarkan *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO).

Informasi Struktur:

$$W_{ss} = 4154.01 \text{ kN} \quad (\text{Berat Girder})$$

$$W_{pp} = 768 \text{ kN} \quad (\text{Berat Pier})$$

$$W_{eff} = W_{ss} + W_{pp} = 4922.01 \text{ kN} \quad (\text{Berat efektif})$$

$$g = 9810 \text{ mm/s}^2 \quad (\text{Beban Gravitasi})$$

$$\begin{aligned}
Q_{di} &= 80 \text{ kN} && (\text{Yield Strength}) \\
K_{di} &= 0.43 \text{ kN/mm} && (\text{Stiffness}) \\
n &= 8 \text{ Buah} && (\text{Jumlah Bearing}) \\
S_{D1} &= 0.75 \text{ g} \\
d &= 267.42 \text{ mm} && (\text{asumsi displacement}) \\
Q_{d,j} &= n \times Q_{di} && (\text{Characteristic Strength of the whole structure}) \\
&= 8 (80) \\
&= 640 \text{ kN} \\
K_{d,j} &= n \cdot K_{di} && (\text{Post-yield stiffness of the whole structure}) \\
&= 8 (0.43) \\
&= 3.44 \text{ kN/mm}
\end{aligned}$$

$$K_{sub,j} = \frac{1}{k} = \frac{1}{0.121} = 8.26 \text{ kN/mm} \quad (k = \text{kekakuan pier di SAP2000})$$

$$\alpha_j = \frac{(K_{d,j} \cdot d) + Q_{d,j}}{K_{sub,j} \cdot d - Q_{d,j}} = \frac{(3.44)(267.42) + 640}{(8.26)(267.42) - 640} = 0.9935$$

$$K_{eff,j} = \frac{\alpha_j \cdot K_{sub,j}}{(1 + \alpha_j)} = \frac{(0.9935)(8.26)}{(1 + 0.9935)} = 4.12 \text{ kN/mm}$$

$$d_{isol,j} = \frac{d}{(1 + \alpha_j)} = \frac{267.42}{(1 + 0.9935)} = 134.14 \text{ mm}$$

$$K_{isol,j} = \frac{Q_{d,j}}{d_{isol,j}} + K_{d,j} = \frac{640}{134.14} + 3.44 = 8.21 \text{ kN/mm}$$

$$d_{sub,j} = d - d_{isol,j} = 267.42 - 134.14 = 133.28 \text{ mm}$$

$$F_{sub,j} = K_{sub,j} \cdot d_{sub,j} = (8.26) (133.28) = 1101.46 \text{ kN}$$

$$Q_{d,j} \cdot d_{isol,j} = (640)(134.14) = 85852.16 \text{ kNmm}$$

$$K_{eff,j} (d_{isol,j} + d_{sub,j})^2 = (4.12)(134.14 + 133.28)^2 = 294551.30 \text{ kN}$$

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{K_{eff,j}}{g \cdot \sum K_{eff}}} = 2\pi \sqrt{\frac{4.12}{(9810)(4.12)}} = 2.193 \text{ sec}$$

$$\xi = \frac{2(Q_{dj} \cdot d_{isol,j})}{\pi \cdot K_{eff,j} (d_{isol,j} + d_{sub,j})^2} = \frac{2(80)(134.14)}{\pi(4.12)(134.14 + 133.28)^2} = 0.186$$

$$BL = \left(\frac{\xi}{0.05} \right)^{0.3} = \left(\frac{0.186}{0.05} \right)^{0.3} = 1.482 \rightarrow k \geq 0.3; k \leq 0.3 \text{ pakai } 1.7$$

$$d = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \left(\frac{S_{D1} \cdot T_{eff}}{BL} \right) = \left(\frac{9810}{4\pi^2} \right) \left(\frac{(0.75)(2.193)}{1.482} \right) = 275.75 \text{ mm}$$

$$Cek : \left(\frac{d_{asumsi}}{d} \right) = \left(\frac{267.32}{275.75} \right) = 1.0 (OK)$$

Setelah melakukan perhitungan manual, dan *displacement* yang diasumsikan dibagi dengan *displacement* yang dihasilkan sesuai (=1) maka asumsi dapat dipakai.

3. Input data ke dalam SAP2000.

Pada SAP2000 ver 14 LRB dimodelkan sebagai link dengan tipe *Rubber Isolator*. Tipe link yang digunakan yaitu *Rubber isolator* dimana untuk *directional properties* menggunakan U1(*fixed*) dan U2 U3 (*nonlinear*). Berikut ini merupakan data yang dimasukkan untuk *properties link* pada U2 dan U3 sesuai dengan hitungan LRB yang telah dilakukan (Gambar pada Lampiran):

Kekakuan efektif : 8.26 kNmm

Kekakuan : 4.3 kNmm

Yield strength : 80 kN

Post yield strength ratio` : 0.1

4.4 Pemodelan Friction Pendulum System (FPB)

Pemodelan FPB dimodelkan dengan 3 dimensi FPB yang berbeda. Berikut ini dimensi FPB yang akan digunakan:

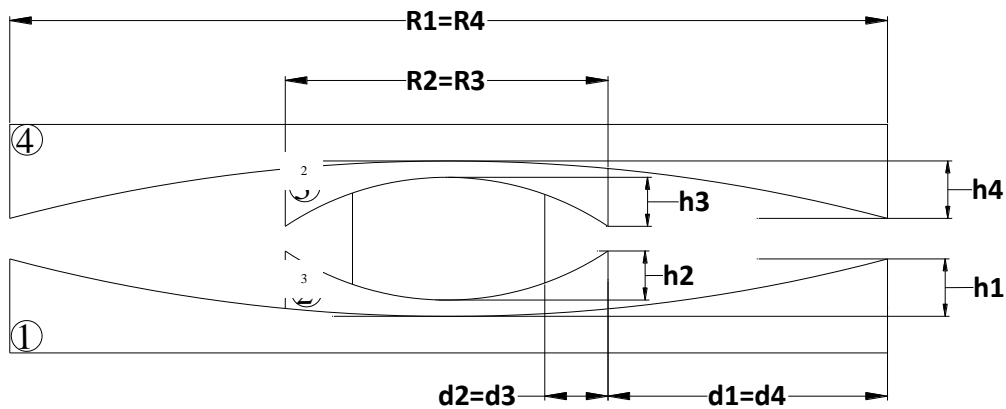
Tabel 4. 2 Dimensi FPB yang digunakan

Properties	FPB 1	FPB 2	FPB 3
$R_{1eff} = R_{4eff}$ (mm)	2133	3395	6934
$R_{2eff} = R_{3eff}$ (mm)	330	526	1074
$d_1^* = d_4^*$ (mm)	339.8	540.4	1103.48
$d_2^* = d_3^*$ (mm)	41.5	65.9	30.85
$\mu_1 = \mu_4$ lower bound	0.071	0.078	0.093
$\mu_2 = \mu_3$ lower bound	0.053	0.066	0.093
μ lower bound	0.068	0.076	0.093
$\mu_1 = \mu_4$ upper bound	0.085	0.094	0.112
$\mu_2 = \mu_3$ upper bound	0.064	0.079	0.111
μ upper bound	0.082	0.092	0.112

Dengan dimensi yang sudah ditentukan, maka data yang telah didapatkan dapat diinput kedalam SAP2000. Untuk lebih jelasnya, berikut ini merupakan langkah langkah dalam menentukan dan menghitung FPB:

1. Menentukan dimensi FPB yang akan digunakan

Dalam menentukan dimensi FPB dapat dilihat dari brosur yang sudah ada. Namun pada studi ini untuk ukuran FPB yang digunakan mengacu pada beberapa jurnal diantaranya “*Dynamic Analysis of High Rise Seismically Isolated Buildings*” oleh Khloud El-Bayoumi. Sebelum menghitung FPB kita perlu menentukan gaya vertikal pada struktur. Untuk struktur pada studi ini diasumsikan gaya vertikal sebesar 450 ton. Gambar dibawah ini merupakan detail dimensi pada FPB.



Gambar 4. 6 Detail Dimensi pada FPB

Berikut ini merupakan salah satu contoh dimensi FPB yang digunakan:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_4 = 2235 \text{ mm} \\
 R_2 &= R_3 = 406 \text{ mm} \\
 d_1 &= d_4 = 356.05 \text{ mm} \\
 d_2 &= d_3 = 51.06 \text{ mm} \\
 h_1 &= h_4 = 102 \text{ mm} \\
 h_2 &= h_3 = 76 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$R_{1eff} = R_{4eff} = R_1 - h_1 = 2235 - 102 = 2133 \text{ mm}$$

$$R_{2eff} = R_{3eff} = R_2 - h_2 = 406 - 76 = 330 \text{ mm}$$

$$d_1^* = d_4^* = d_1 \frac{R_{1eff}}{R_1} = (356.05) \frac{2133}{2235} = 339.8 \text{ mm}$$

$$d_2^* = d_3^* = d_2 \frac{R_{2eff}}{R_2} = (51.06) \frac{330}{406} = 41.5 \text{ mm}$$

2. Menghitung Kemampuan Geser Bearing

Gaya vertikal struktur (asumsi) = 450 ton

- Tekanan Bearing pada Permukaan 1 dan 4

$$P = \frac{W}{\pi(h_1 + h_4)^2} = \frac{450}{\pi(102+102)^2} = 0.00344t / mm^2 = 4.89ksi$$

3 cycle friction $\mu = 0.122 - 0.01P \rightarrow$ Constantinou, M.C., Whittaker, A.S., Kalpakidis, Y., Fenz, D.M. and Warn, G.P. (2007a) "Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading,"

$$3 \text{ cycle friction } \mu = 0.122 - 0.01(4.89) = 0.073$$

Adjust for high velocity (-0.015) = 0.073 - 0.015 = 0.058 (lower bound friction)

$$1st \text{ cycle friction } \mu = (1.2)(0.058) = 0.070$$

$$Lower \text{ bound } \mu_{1=\mu 4} = 0.058$$

$$Upper \text{ bound } \mu_{1=\mu 4} = 0.070$$

- Tekanan Bearing pada Permukaan 2 dan 3

$$P = \frac{W}{\pi(h_2 + h_3)^2} = \frac{450}{\pi(76+76)^2} = 0.0062t / mm^2 = 8.818ksi$$

$$3 \text{ cycle friction } \mu = 0.122 - 0.01P = 0.122 - 0.01(8.81) = 0.034$$

Adjust for high velocity (-0.005) = 0.034 - 0.005 = 0.029 (lower bound friction)

$$1st \text{ cycle friction } \mu = (1.2)(0.029) = 0.035$$

$$Lower \text{ bound } \mu_{1=\mu 4} = 0.029$$

$$Upper \text{ bound } \mu_{1=\mu 4} = 0.035$$

$\mu =$ gaya pada perpindahan 0 dibagi dengan beban normal

$$\mu = \mu_1 - \left((\mu_1 - \mu_2) \frac{R_{2eff}}{R_{1eff}} \right)$$

$$Lower \text{ bound } \mu = 0.058 - \left((0.058 - 0.029) \frac{330}{2133} \right) = 0.05352$$

$$Upper \text{ bound } \mu = 0.070 - \left((0.070 - 0.035) \frac{330}{2133} \right) = 0.06423$$

Tabel 4. 3 Hasil Perhitungan Kemampuan Geser Bearing

<i>Geometric Properties</i>			<i>Frictional Properties</i>	
$R_{1eff}=R_{4eff}$	mm	2133	<i>Lower bound</i> $\mu_1=\mu_4$	0.058
$R_{2eff}=R_{3eff}$	mm	330	<i>Lower bound</i> $\mu_2=\mu_3$	0.029
$d_1^* = d_4^*$	mm	339.8	<i>Lower bound</i> μ	0.05352
$d_2^* = d_3^*$	mm	41.5	<i>Upper bound</i> $\mu_1=\mu_4$	0.070
			<i>Upper bound</i> $\mu_2=\mu_3$	0.035
			<i>Upper bound</i> μ	0.06423

3. Menghitung D_D (*Upper Bound Analysis*)

Dari perhitungan Sebelumnya didapatkan:

S_1	μ	μ_1	D_y	F_{d1}	W	#bearing
0.228	0.064	0.070	0.011574	0.069	450	8
			Σ	251.259	3600	

S_1 = parameter respons spektral percepatan gempa untuk periode 1.0 detik mengacu pada Peta Gempa Indonesia 2010 (**Gambar 3** atau **Gambar 6**) dimana untuk wilayah Surabaya berada pada range 0.2-0.25g.

$$D_D = 315 \text{ mm} = 0.315 \text{ m}$$

Kekakuan efektif:

$$Q_d = \mu \cdot \Sigma W = (0.064)(3600) = 231.21 \text{ ton}$$

$$K_d = \Sigma F_D / D_D = (251.259) / (0.315) = 797.65 \text{ ton/m (Eq 17.8-4, ASCE 4-10)}$$

$$K_{eff} = K_d + \frac{Q_d}{D_D} = 797.65 + \frac{231.21}{0.315} = 1531.660 \text{ ton/m}$$

Periode Efektif: (Eq 17.5-2, ASCE 7-10)

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma W}{(K_{eff})(g)}} = 2\pi \sqrt{\frac{3600}{(1531.66)(9.8)}} = 3.077 \text{ (Eq 17.5-2, ASCE 7-10)}$$

Efektif *damping*: (Eq 17.8-7, ASCE 7-10)

$$\beta_D = \frac{E}{2\pi K_{eff} D_D^2} = \frac{4\mu \Sigma W (D_D - D_y)}{2\pi K_{eff} D_D^2} = \frac{4(0.064)(3600)(0.315 - 0.0115)}{2\pi (1531.66)(0.315)^2} = 0.29388$$

Damping reduction factor:

$$\beta = \left(\frac{\beta_{eff}}{0.05} \right)^{0.3} = \left(\frac{0.29338}{0.05} \right)^{0.3} = 1.7012$$

Check D_D' (Eq 17.5-1, ASCE 7-10)

$$D'_D = \frac{S_{D1} \cdot T_{eff}^2}{4\pi^2 \beta} g = \frac{(0.228)(3.077)^2}{4\pi^2 (1.7012)} (9.8) = 0.315 \text{ m (OK)}$$

4. Menghitung *Link/Support Properties data (Upper bound)* untuk SAP2000

- Penampang Utama

1) Menentukan penampang *bearing (rotational inertia I)*

Diameter isolator = 0.305 m

Tinggi = 0.32 m

Luas = $\frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{1}{4} \pi (0.305)^2 = 0.073 \text{ m}^2$

E = 10^7 (Setengah dari modulus baja aktual karena *bearing* bukan logam padat)

$$K_{eff} = \frac{W}{R_{1eff}} + \frac{\mu W}{D_D} = \frac{450}{2.133} + \frac{(0.064)(450)}{(0.315)} = 3.077 \text{ det}$$

$$I = \frac{K_{eff} h^3}{12E} = \frac{(302.7)(0.32)^3}{12(10^7)} = 8.26633 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

2) Menentukan massa *bearing*

Menentukan diameter *bearing*:

$D_{m \max} = 0.315 \text{ m}$

$D_{TM} = 1.15 D_{m \max} \quad (17.5.3.5, \text{ASCE } 7-10)$

$= (1.15) (0.315)$

$= 0.36225 \text{ m}$

$D = 2D_{TM} = 2(0.36225) = 0.7245 \text{ m}$

Standard diameter dan berat *bearing* (Kravchuk et al.2008):

D = 0.9144 m W = 1 ton

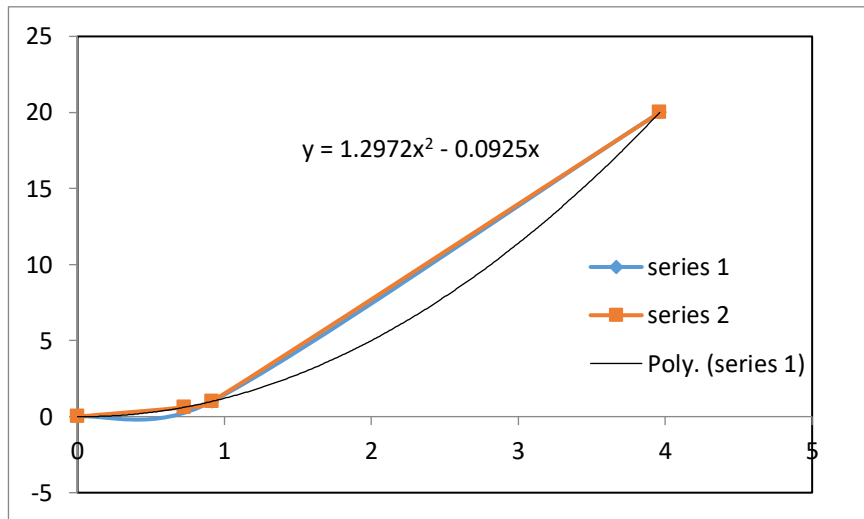
D = 3.9624 m W = 20 ton

Menentukan diameter dan berat *bearing* menggunakan *by best-fit polynomial curve – Nicholas Mars, 2013*

D = 0.7245 m ; g = 9.81 m/s²

D	W
0	0
0.7245	0.61388
0.9144	1
3.9624	20

D	W
0	0
0.9144	1
3.9624	20



Gambar 4. 7 Kurva Polinomial (Nocholas Mars,2013)

Dari Grafik diatas didapatkan persamaan:

$$\begin{aligned}
 W &= 1.2972D^2 - 0.0925D ; \text{dimana } D \text{ dalam satuan (ft)} \\
 &= 1.2972 (0.7245^2) - 0.0925(0.7245) \\
 &= 0.613884 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

$$M = \frac{W}{g} = \frac{0.613884}{9.81} = 0.0626 \text{ ton det}^2/\text{m}$$

5. Menghitung *Directional Properties* (U1)

$$\text{Diameter isolator} = 0.305 \quad \text{m}$$

$$\text{Tinggi} = 0.32 \quad \text{m}$$

$$\text{Luas} = 0.073 \quad \text{m}^2$$

$$\text{Kekakuan efektif} = \frac{AE}{L} = \frac{(0.73)(10^7)}{0.32} = 2284375 \text{ ton/m}$$

$$\text{Damping efektif} = \beta_D = 29.39\%$$

6. Menghitung *Directional Properties* (U2, U3)

- Menentukan *linear properties*

$$\text{Kekakuan efektif} = 231.21$$

$$\text{Damping efektif} = 29.38\%$$

$$h_1 = h_4 = 0.102 \text{ m}$$

$$h_2 = h_3 = 0.076 \text{ m}$$

- Menentukan *nonlinear properties*

$$\text{Kekakuan} = \mu \cdot W / Dy$$

$$Dy = (\mu_1 - \mu_2) R_{2\text{eff}} = (\mu_1 - \mu_2) R_{2\text{eff}} = (0.070 - 0.035) (330) = 0.01157 \text{ m}$$

$$\text{Stiffnes of outer surface} = 0.070 \frac{450}{0.01157} = 2708.17$$

$$\text{Stiffnes of inner surface} = 0.035 \frac{450}{0.01157} = 1344.54$$

$$\text{Friction co. Slow: } \mu_1 \text{ for outer surface} = 0.070$$

$$\mu_2 \text{ for inner surface} = 0.035$$

$$\text{Friction co. Fast: } 2\mu_1 \text{ for outer surface} = 0.139$$

$$2\mu_2 \text{ for inner surface} = 0.069$$

$$\text{Rate Parameter} = \frac{\text{Friction co. Slow}}{\text{Friction co. Fast}} = 0.5$$

Radius of sliding surface:

$$\text{for outer surface} = R_{1\text{eff}} = 2.133 \text{ m}$$

$$\text{for inner surface} = R_{2\text{eff}} = 0.33 \text{ m}$$

Stop distance:

$$\text{For outer surface } u^{**} = 2Dy + 2d_1 = 0.702747 \text{ m}$$

$$\text{For outer surface } u^{**} = 2Dy = 0.023147 \text{ m}$$

7. Input data kedalam SAP2000

Dengan dimensi yang sudah ditentukan dan dihitung sebelumnya, maka data yang telah didapatkan dapat diinput kedalam SAP2000. Pemodelan FPB dimodelkan menggunakan link dengan *link/support type Triple Pendulum Isolator*.

Untuk tipe *link/support* digunakan *Triple Pendulum Isolator* dimana untuk *directional properties* menggunakan U1, U2 dan U3 (*nonlinear*).

Sesuai dengan perhitungan dimensi FPB yang telah dilakukan, maka berikut ini merupakan beberapa hitungan yang perlu dimasukkan ke dalam data *Link properties* pada SAP2000 (Gambar pada Lampiran):

Rotational inertia : $8.26633 \times 10^{-8} \text{ m}^4$

Arah vertikal (U1) untuk linear dan nonlinear analisis

Kekakuan efektif : 2284375 ton/m

Damping efektif : 0.2939

Arah lateral (U2 dan U3)

Kekakuan efektif : 194.07 ton/m

Damping efektif : 0.2939

Tinggi permukaan luar : 0.102

Tinggi permukaan dalam : 0.076

Kekakuan : 2708.17

Friction co. Slow : μ_1 for outer surface = 0.070

μ_2 for inner surface = 0.035

Friction co. Fast : $2\mu_1$ for outer surface = 0.139

$2\mu_2$ for inner surface = 0.069

Radius of sliding surface:

for outer surface : 2.133 m

for inner surface : 0.33 m

Stop distance:

For outer surface : 0.702747 m

For outer surface : 0.023147 m

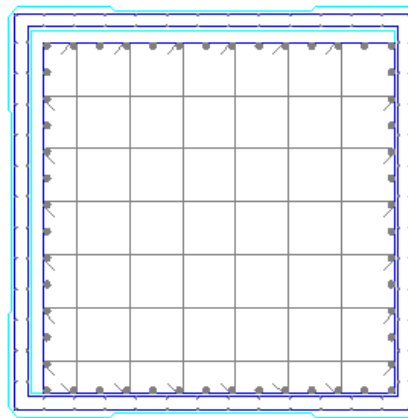
4.5 Pushover Analysis

Analisis statik nonlinier merupakan prosedur analisis untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa, tujuan analisis pushover adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta untuk memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Prosedur analisis dengan

memberikan beban statis dalam arah lateral yang ditingkatkan secara bertahap (*increment*) hingga mencapai target perubahan bentuk (*displacement*) tertentu.

4.5.1 Momen Kurvatur

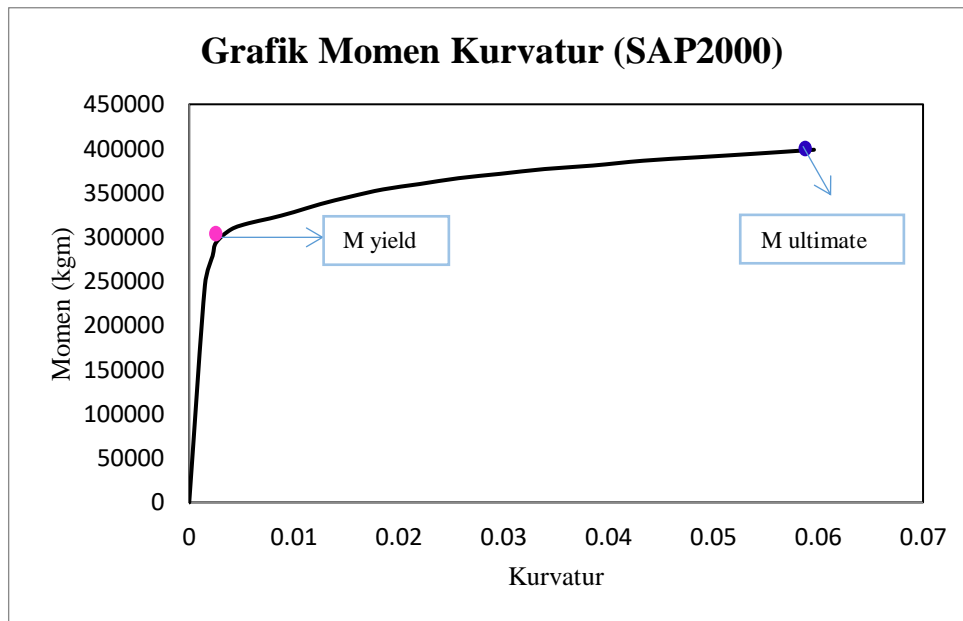
Sebelum menentukan *hinge properties* dilakukan perhitungan momen kurvatur agar kapasitas penampang yang digunakan sesuai dengan perencanaan. Berikut ini merupakan data penampang pier yang digunakan dalam struktur dengan menggunakan SAP2000.



Gambar 4. 8 *Section Properties pier*

Tinggi pier	: 16000	mm
Tebal selimut beton	: 45	mm
Jumlah Tul. Longitudinal	: 52	bh
Diameter Tul. Longitudinal	: 32	mm
<i>Confined area</i>	: 2280100	mm ²
Diamter Sengkang	: 16	mm
Mutu Beton	: 33.2	MPa
Modulus Young beton	: 27081.14	MPa
Fy	: 400	MPa
Modulus Young Tulangan	: 200000	MPa

Setelah input *section properties* pada SAP2000, maka dihasilkan output momen kurvatur pada penampang (Gambar 4.9)



Gambar 4. 9 Output Momen Kurvatur

Dari gambar diatas dapat dihitung berapa besarnya Momen/Myield :

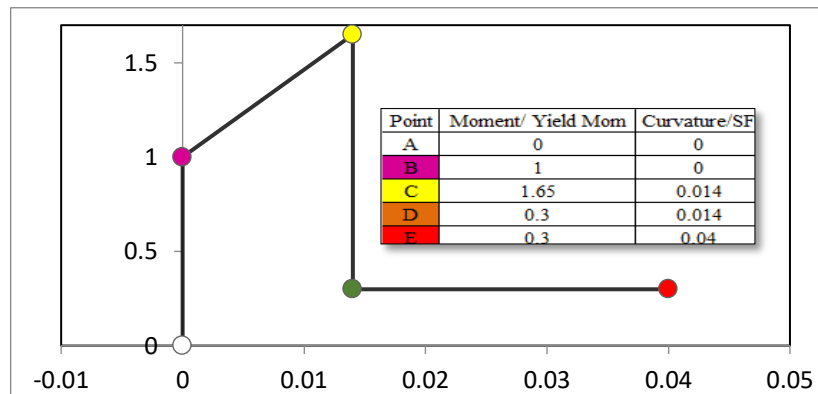
$$M_{ult} = 398616.387 \text{ kgm}$$

$$M_{yield} = 245512.791 \text{ kgm}$$

$$\frac{M_{ult}}{M_{yield}} = \frac{398616.387}{245512.791} = 1.65$$

4.5.2 Penentuan *Hinge Properties*

Dalam analisis *pushover*, *hinge properties* harus didefinisikan untuk menentukan perilaku nonlinear dari struktur. Komponen struktur yang dianalisis adalah komponen yang berperilaku sebagai kolom, sehingga *hinge* yang digunakan adalah P-M2-M3, di mana *hinge* tersebut dapat menangkap perilaku aksial dan biaksial *bending moment*. Di samping itu, nilai momen-kurvatur dalam *default* SAP2000 harus disesuaikan dengan kapasitas penampang yang telah ditentukan sebelumnya agar perilaku struktur yang dimodelkan sesuai dengan penampang yang digunakan.



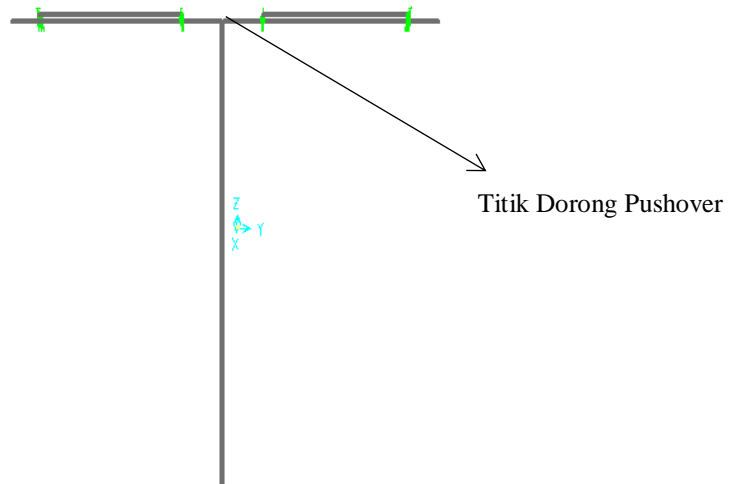
Gambar 4. 10 Rasio Momen Ultimate dan Yield

Selain itu, nilai momen-kurvatur dalam *default* SAP2000 harus disesuaikan dengan kapasitas penampang yang telah ditentukan sebelumnya agar perilaku struktur yang dimodelkan sesuai dengan penampang yang digunakan. Sehingga grafik momen kurvatur pada *hinge properties* di SAP (Lampiran) dirubah seperti Gambar 4.10.

4.5.3 Lokasi Titik Pushover

Analisis *pushover* merupakan metode analisis statis nonlinear di mana struktur dipengaruhi oleh beban gravitasi (berat sendiri) dan beban dorong. Beban dorong dalam analisis *pushover* dapat dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu *load control* atau *displacement control*. Prosedur dorongan dilakukan secara monotonik yang terus meningkat melalui perilaku elastis dan inelastis struktur sampai kondisi akhir struktur tercapai.

Lokasi titik (*joint*) dorong pada struktur sangat penting karena akan berpengaruh pada output *displacement* dan *base shear*. Gambar 4.11 merupakan lokasi dimana struktur didorong.



Gambar 4. 11 Titik Struktur didorong pada SAP2000

4.5.4 Menentukan *Load Case Pushover*

Lode case pada model SAP2000 merupakan tipe pembebanan yang akan diberikan pada struktur yang dimodelkan. Diasumsikan beban mati yang bekerja pada struktur sebesar 100% (a) dan beban *pushover* diberikan dalam bentuk *displacement control* dengan nilai simpangan dorongan maksimum *default* SAP 1.625 m (b). Sedangkan simulasi keruntuhan pada struktur dilakukan dengan cara *multiple state* (c) yaitu simpangan diberikan secara bertahap sampai mencapai nilai dorongan maksimum. Sehingga dapat dilihat perilaku elastis dan non elastis pada model struktur (Gambar pada Lampiran).

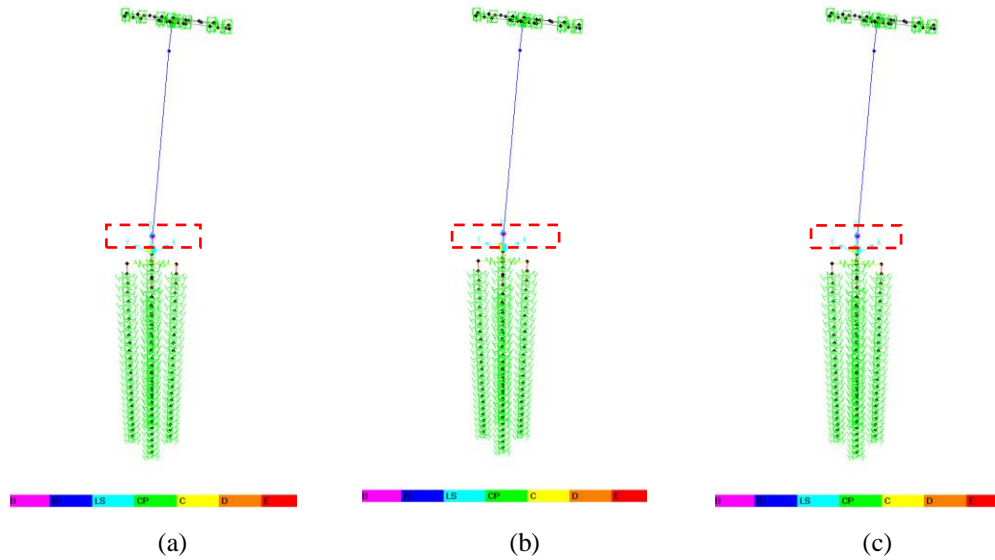
4.5.5 Model *Pushover*

Pushover dimodelkan pada pier utama struktur untuk melihat dimana letak leleh pertama dan bagaimana keruntuhan yang terjadi pada struktur tersebut. Selain itu dibuat juga *pushover* pada pondasi dan *pier* untuk mengetahui leleh pertama struktur apakah pada pondasi atau *pier* terlebih dahulu. Jika struktur leleh pada *pier* terlebih dahulu maka struktur tersebut aman, sedangkan jika leleh terjadi pada pondasi terlebih dahulu struktur dinyatakan gagal.

4.6 Lokasi Leleh pertama Komponen Struktur

4.6.1 Lead Rubber Bearing (LRB)

1. Pushover Pada Pier



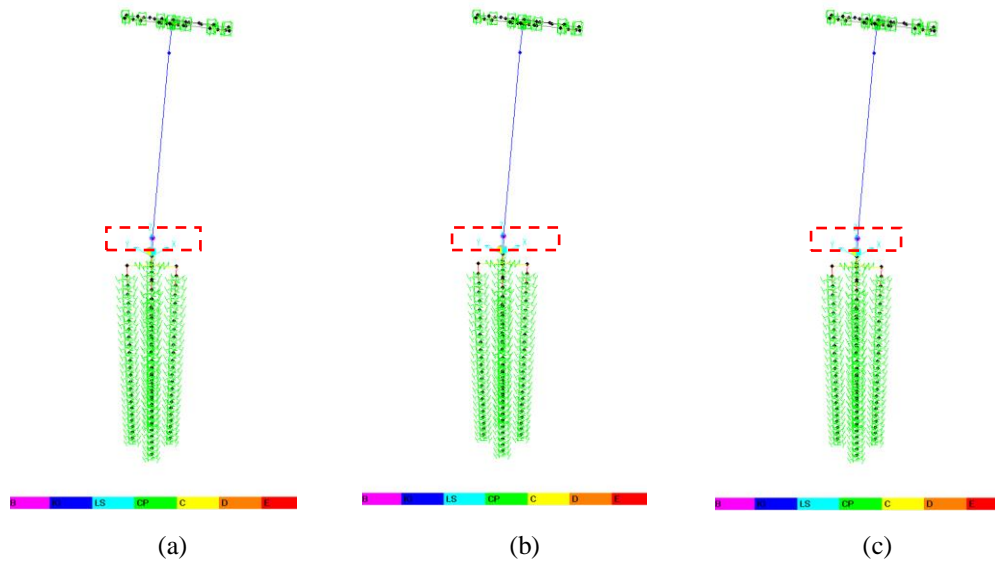
Gambar 4. 12 Lokasi Leleh Pertama pada Struktur (a) LRB tipe 1; (b) LRB tipe 2; (c) LRB tipe 3 Pushover pada Pier

Dari Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa titik leleh pertama terjadi di bagian bawah pier. Panjang *hinge* yang dimodelkan pada struktur sebesar 0.1 dari total panjang pier. *Drift* yang terbesar terjadi pada LRB 1 sebesar 0.1007 m dengan gaya geser 64.124 ton.

Tabel 4. 4 *Drift* dan Gaya Geser yang Terjadi pada LRB (*Pushover Pier*)

LRB	<i>Drift</i> (m)	Gaya Geser (ton)
1	0.10070	64.1240
2	0.09864	62.8118
3	0.09576	62.5367

2. Pushover Pada Pier dan Pondasi



Gambar 4. 13 Lokasi Leleh Pertama pada Struktur (a) LRB tipe 1; (b) LRB tipe 2; (c) LRB tipe 3 Pushover pada Pier dan Pondasi

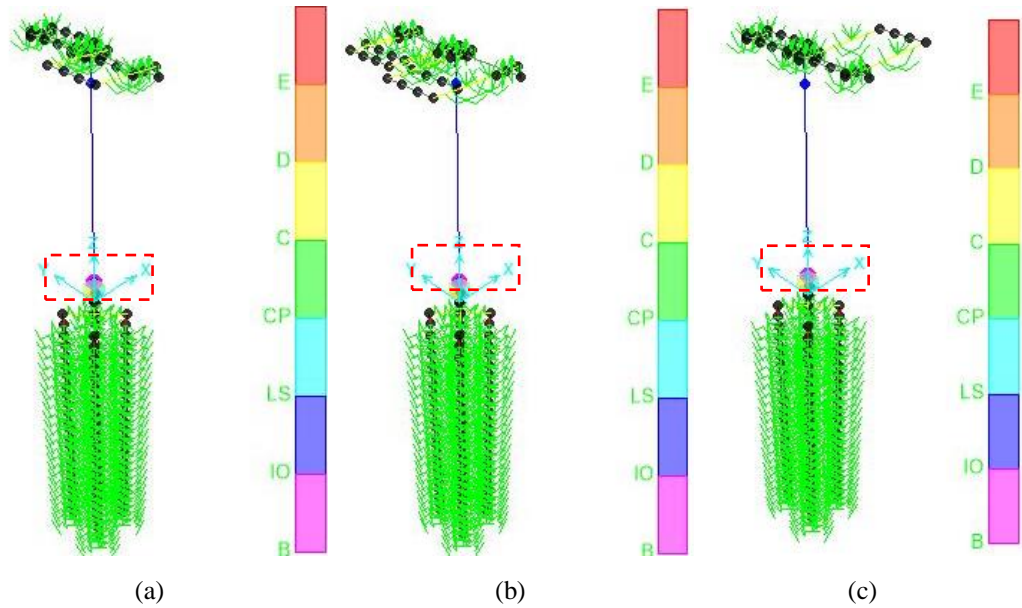
Dari Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa titik leleh pertama terjadi pada *pier*, sehingga struktur dapat dikatakan memenuhi syarat sesuai perencanaan. Panjang *hinge* yang dimodelkan pada struktur sebesar 0.1 dari total panjang pier. *Drift* yang terbesar terjadi pada LRB 1 sebesar 0.137488 m dengan gaya geser 87.2564 ton.

Tabel 4. 5 *Drift* dan Gaya Geser yang Terjadi pada LRB (*Pushover* Pondasi & *Pier*)

LRB	<i>Drift</i> (m)	Gaya Geser (ton)
1	0.137448	87.2564
2	0.137027	87. 2561
3	0.137027	86. 9474

4.6.2 Friction Pendulum System (FPB)

1. Pushover Pada Pier



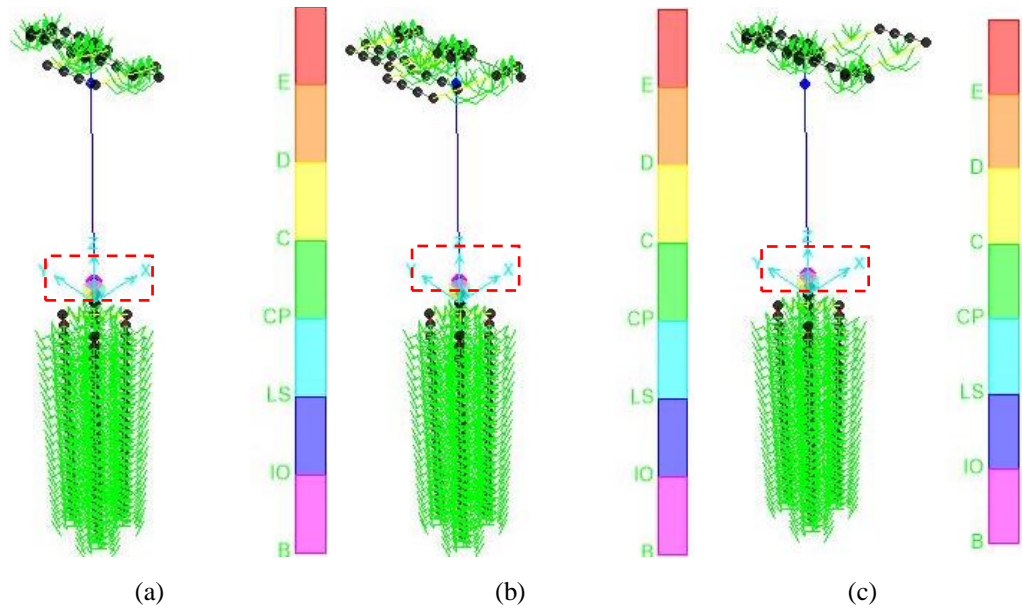
Gambar 4. 14 Lokasi Leleh Pertama pada Struktur (a) FPB tipe 1; (b) FPB tipe 2; (c) FPB tipe 3 *Pushover* pada *Pier*

Dari Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa titik leleh pertama terjadi di bagian bawah pier. Panjang *hinge* yang dimodelkan pada struktur sebesar 0.1 dari total panjang pier. *Drift* yang terbesar terjadi pada TFP 1 sebesar 0.078624 m dengan gaya geser 63.2415 ton.

Tabel 4. 6 *Drift* dan Gaya Geser yang Terjadi pada LRB (*Pushover Pier*)

FPB	<i>Drift</i> (m)	Gaya Geser (ton)
1	0.075927	63.2415
2	0.078624	63.0415
3	0.075861	61.4495

2. Pushover Pada Pier dan Pondasi



Gambar 4. 15 Lokasi Leleh Pertama pada Struktur (a) FPB tipe 1; (b) FPB tipe 2; (c) FPB tipe 3 Pushover pada Pondasi

Dari Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa titik leleh pertama terjadi pada pondasi, sehingga struktur dapat dikatakan memenuhi syarat sesuai perencanaan. Panjang *hinge* yang dimodelkan pada struktur sebesar 0.1 dari total panjang pier. *Drift* yang terbesar terjadi pada FPB 1 sebesar 0.07585 m dengan gaya geser 83.4495 ton.

Tabel 4. 7 *Drift* dan Gaya Geser yang Terjadi pada FPB (*Pushover* Pondasi & Pier)

FPB	<i>Drift</i> (m)	Gaya Geser (ton)
1	0.07585	83.4495
2	0.07396	82.1649
3	0.07014	81.6624

Dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan 4.6 (*Pushover Pier*) untuk struktur dengan menggunakan isolasi seismik FPB memiliki simpangan 23% lebih kecil dibandingkan dengan LRB, dan struktur dengan FPB dapat mereduksi gaya geser 2-3% dibandingkan dengan LRB. Sedangkan untuk Tabel 4.5 dan 4.7 (*Pushover Pier & Pondasi*) untuk struktur dengan menggunakan isolasi seismik FPB memiliki

simpangan 45% lebih kecil dibandingkan dengan LRB, dan struktur dengan FPB dapat mereduksi gaya geser 5% dibandingkan dengan LRB.

4.7 Level Kinerja Struktur

Level kinerja struktur ditentukan berdasarkan *demand spectrum* dari data gempa sesuai perencanaan. Titik level kinerja diperoleh dari titik perpotongan kurva *pushover* dan *demand spectrum*. Titik perpotongan yang terjadi dapat didapatkan dari output SAP berdasarkan data gempa dan kurva kapasitas yang didapatkan. Tabel 4.8 dan 4.9 menunjukkan besarnya nilai dari titik kinerja struktur pada masing-masing dimensi LRB dan FPB yang terjadi.

Tabel 4. 8 Nilai Level Kinerja Struktur Pada LRB

<i>Pushover Pier</i>			<i>Pushover Pondasi dan Pier</i>		
LRB	<i>Drift (m)</i>	Gaya Geser (ton)	LRB	<i>Drift (m)</i>	Gaya Geser (ton)
1	0.180	71.714	1	0.183	89.551
2	0.178	71.535	2	0.180	89.189
3	0.169	70.370	3	0.178	89.086

Tabel 4. 9 Nilai Level Kinerja Struktur Pada FPB

<i>Pushover Pier</i>			<i>Pushover Pondasi dan Pier</i>		
FPB	<i>Drift (m)</i>	Gaya Geser (ton)	FPB	<i>Drift (m)</i>	Gaya Geser (ton)
1	0.116	70.458	1	0.155	87.342
2	0.102	70.345	2	0.143	86.836
3	0.082	70.031	3	0.139	86.653

Dari data titik kinerja struktur yang dihasilkan, struktur dengan isolasi seismik menggunakan FPB memiliki simpangan lebih kecil 36% dibandingkan dengan LRB. Untuk gaya geser yang dihasilkan tidak terlalu jauh, perbedaannya sekitar 4 %.

4.8 Kerusakan Sendi Plastis

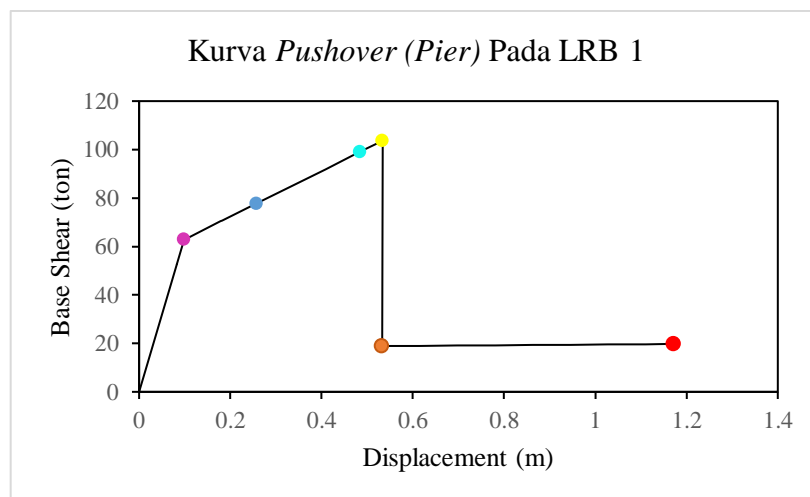
Setelah kinerja struktur diketahui, maka langkah selanjutnya adalah menentukan tingkat kinerja dari struktur mengacu pada FEMA 356. Berdasarkan nilai *acceptance criteria*, dapat dievaluasi kinerja lokal dari masing masing elemen struktur untuk tiap model LRB dan FPB sehingga dapat dilihat kerusakan sendi

plastis yang terjadi berada di mana. Analisa *Pushover* yang dilakukan akan menghasilkan sebuah kurva kapasitas dari struktur tersebut. Kurva kapasitas / *pushover* memperlihatkan level kinerja bangunan yang mengacu pada ATC-40 yaitu *Immediate Occupancy (IO)*, *Damage Control*, *Life Safety (LS)*, *Limited Safety*, dan *Collapse Prevention (CP)*. Untuk tahapan sendi plastis pada kedua isolator dapat dilihat pada lampiran.

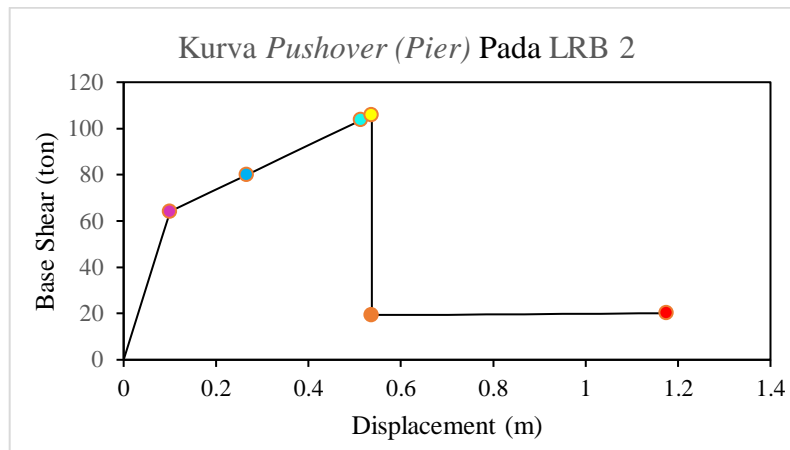
4.8.1 Lead Rubber Bearing (LRB)

Dibawah ini merupakan kurva kapasitas yang dihasilkan dari struktur dengan menggunakan isolasi seismik *Lead Rubber Bearing (LRB)*. Struktur dengan analisa *pushover* pada *pier* maupun pada pondasi memiliki level kinerja yang tidak jauh berbeda. Untuk posisi tingkat kerusakan yang terjadi masih pada range sesuai dengan kinerja struktur berdasarkan ATC-40.

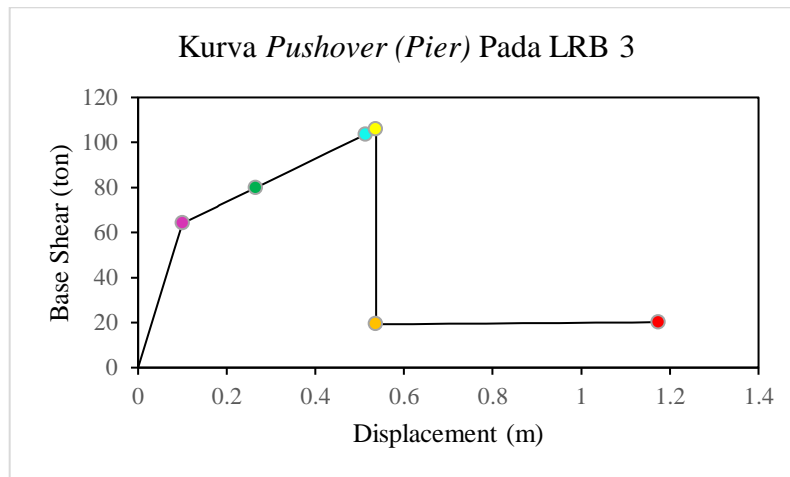
Pada Gambar 4.16 dan 4.17 terdapat titik warna warni yang menunjukkan tingkat kerusakan yang terjadi pada struktur. Warna merah muda menunjukkan struktur berada pada kondisi leleh pertama, warna biru menunjukkan struktur pada level *Immediate Occupancy (IO)*, warna *tosca* menunjukkan struktur pada level *Life Safety*, warna kuning menunjukkan struktur pada kondisi *ultimate strength*, warna *orange* menunjukkan struktur pada kondisi *residual strength* dan warna merah menunjukkan struktur pada kondisi gagal / *failure point*.



(a)

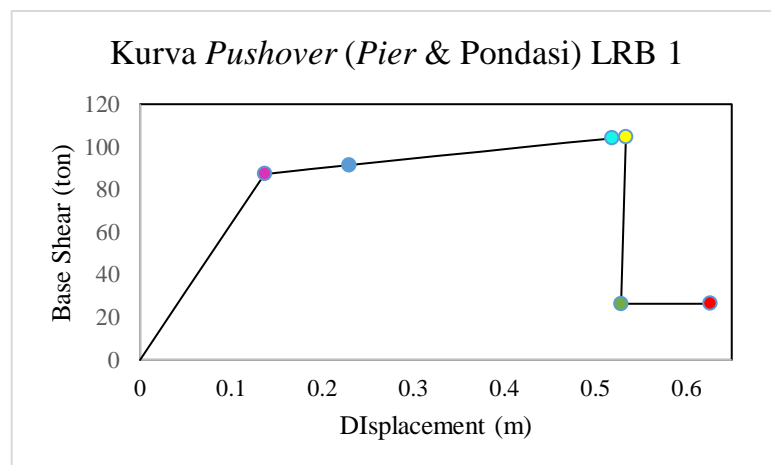


(b)

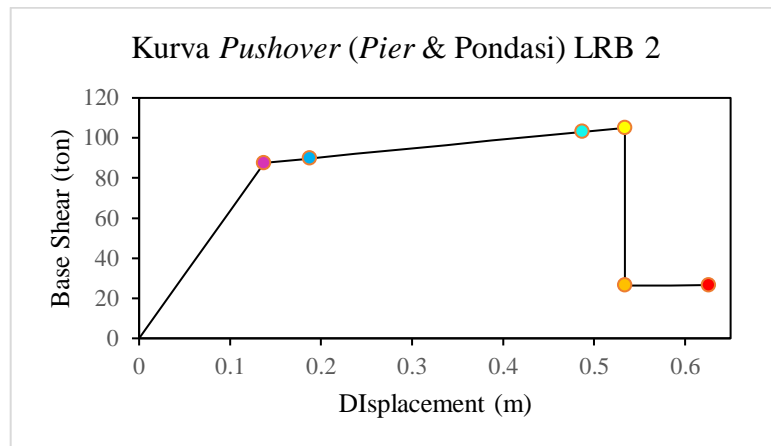


(c)

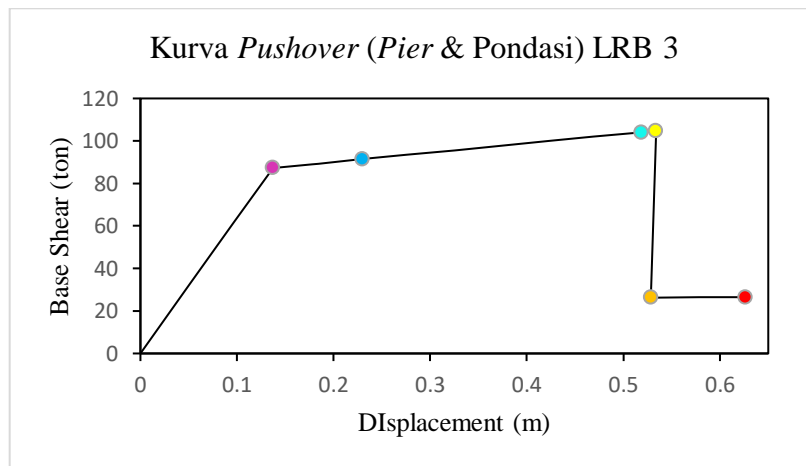
Gambar 4. 16 Mekanisme Sendi Plastis yang Terjadi (a) LRB tipe 1; (b) LRB tipe 2; (c) LRB tipe 3 Pushover pada Pier



(a)



(b)

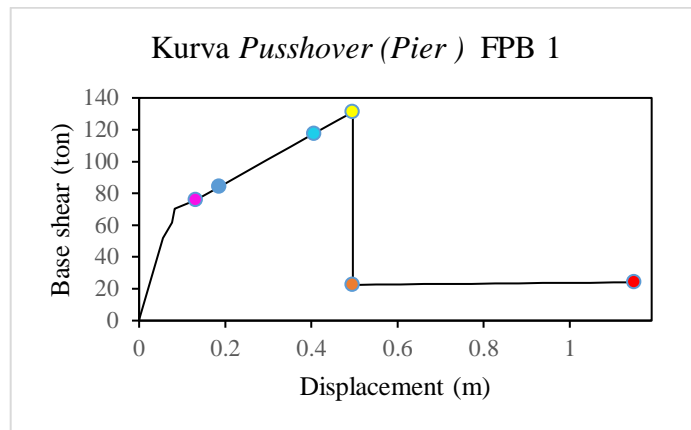


(c)

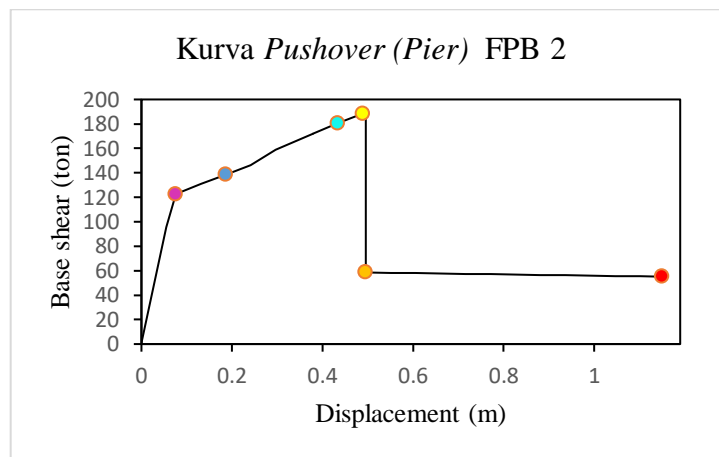
Gambar 4. 17 Mekanisme Sendi Plastis yang Terjadi (a) LRB tipe 1; (b) LRB tipe 2; (c) LRB tipe 3 *Pushover* pada *Pier* dan *Pondasi*

4.8.2 *Friction Pendulum System (FPB)*

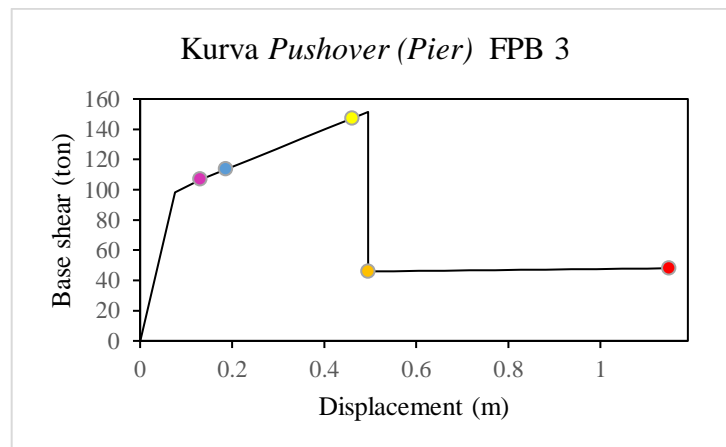
Sama halnya seperti struktur dengan menggunakan isolasi seismik LRB, *Friction Pendulum System (FPB)* memiliki level kinerja dengan tingkat kerusakan yang terjadi masih pada range sesuai dengan kinerja struktur berdasarkan ATC-40.



(a)

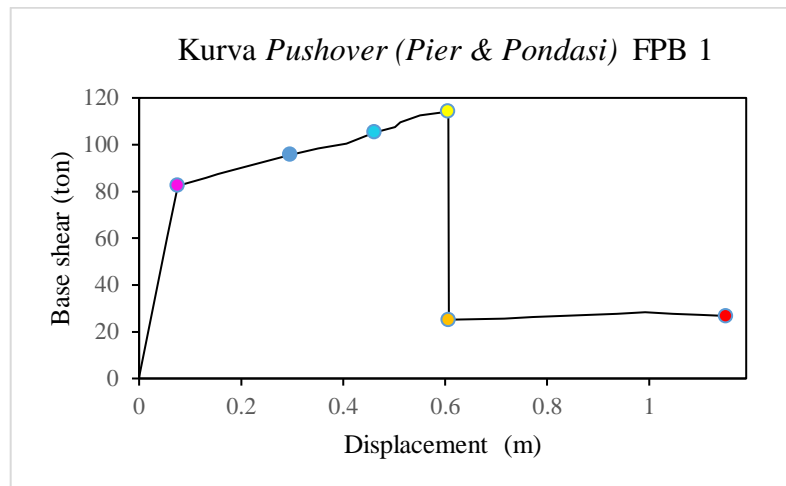


(b)

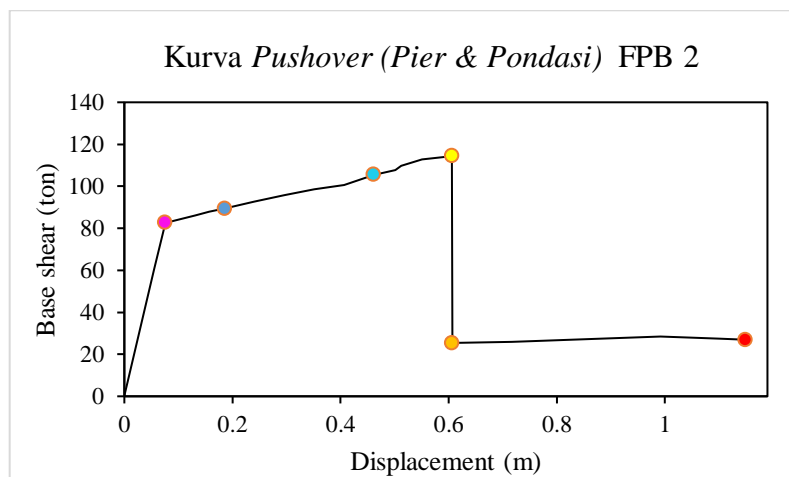


(c)

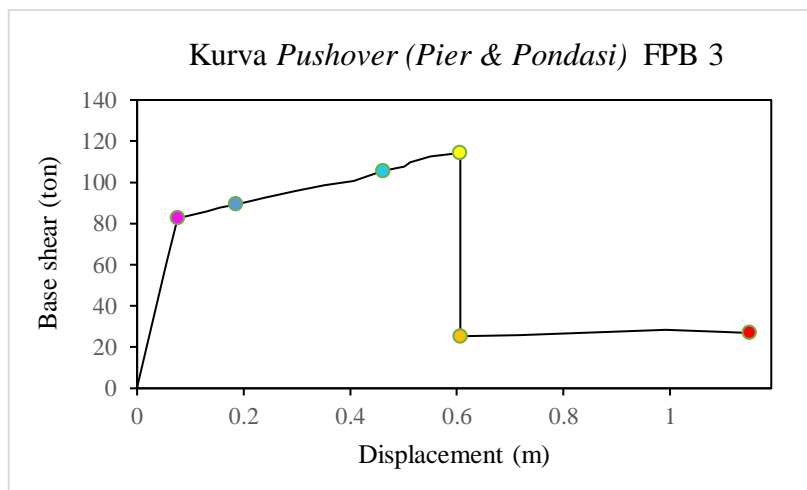
Gambar 4. 18 Mekanisme Sendi Plastis yang Terjadi (a) FPB tipe 1; (b) FPB tipe 2; (c) FPB tipe 3 *Pushover* pada *Pier*



(a)



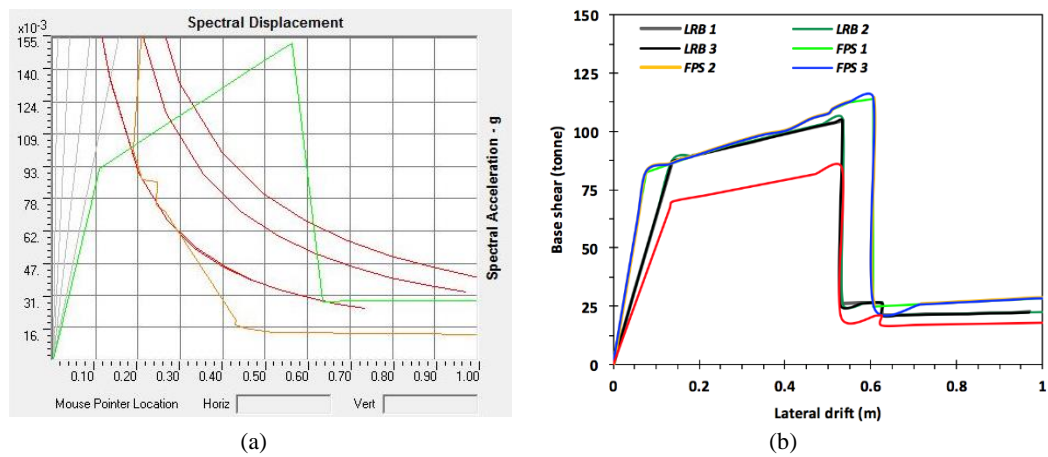
(b)



(c)

Gambar 4. 19 Mekanisme Sendi Plastis yang Terjadi (a) FPB tipe 1; (b) FPB tipe 2; (c) FPB tipe 3 Pushover pada Pier dan Pondasi

Pada subbab 4.7 dan 4.8 telah dibahas kinerja struktur dan sendi plastis pada masing masing isolator sehingga dapat terlihat perbedaan dari LRB dan FPB. Tingkat kinerja struktur pada kedua isolator diperoleh dari perpotongan titik antara gaya lateral dan *spectral demand* (Gambar 4.20). Jika dibandingkan dengan struktur tanpa isolator, kinerja struktur ketiga nya masih dalam *range Intermediate Occupancy- Life Safety (IO-SF)*. Namun, dalam hal daktilitas struktur struktur dengan isolator lebih daktil dibandingkan struktur tanpa isolator dapat dilihat pada Gambar 4.20 (b) dimana struktur dengan isolator memiliki garis datar lebih panjang dan tinggi.



Gambar 4. 20 Hasil *Pushover* (a) Level Kinerja Struktur; (b) *Base Shear* vs *Lateral Drift* Pada Struktur

Dari analisis struktur yang telah dirangkum pada Tabel 4.10 dan 4.11, dapat disimpulkan bahwa FPB memberikan kinerja struktur lebih baik ditunjukkan dari gaya geser yang lebih rendah 28% dibandingkan dengan LRB. Namun secara keseluruhan, kedua isolator menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan struktur tanpa isolator.

Tabel 4. 10 *Base shear* dan *displacement* LRB

LRB	Pushover analysis		Time history analysis	
	Drift (m)	Base Shear (ton)	Drift x (m)	Drift y (m)
1	0.183	89.551	0.162	0.050
2	0.180	89.189	0.149	0.044
3	0.178	89.086	0.145	0.042

Tabel 4. 11 *Base shear* dan *displacement* FPB

FPB	Pushover analysis		Time history analysis	
	Drift (m)	Base Shear (ton)	Drift x (m)	Drift y (m)
1	0.116	70.457	0.137	0.045
2	0.102	70.345	0.136	0.053
3	0.082	70.031	0.134	0.043

4.9 Analisis Efisiensi

4.9.1 Displacement Pada LRB dan FPB

Berikut ini merupakan resume *displacement pier* yang dihasilkan pada masing masing pemodelan berdasarkan beban gempa pada struktur. Untuk data lengkap dapat dilihat pada lampiran.

Tabel 4. 12 *Displacement Pier* LRB dan FPB

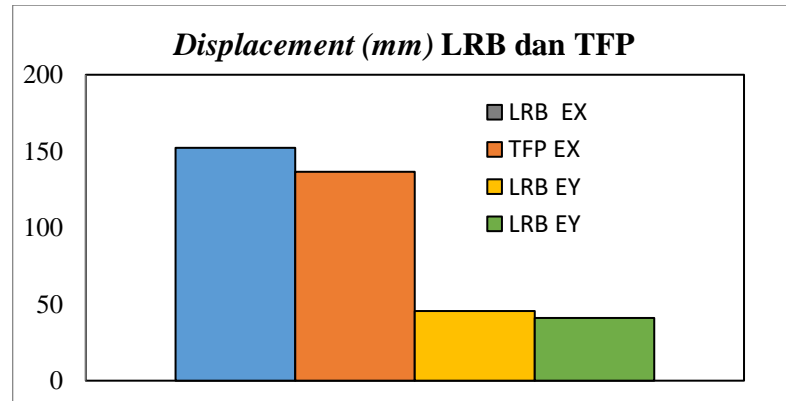
LRB1(mm)			FPB1(mm)		
Arah	U1	U2	Arah	U1	U2
X	162.04082	50.509022	X	137.364855	41.5568
Y	48.686854	168.011624	Y	41.197525	138.565
LRB2(mm)			FPB2(mm)		
Arah	U1	U2	Arah	U1	U2
X	149.46063	44.11942	X	136.371245	41.2561
Y	44.621842	146.983041	Y	40.898606	137.565
LRB3(mm)			FPB3(mm)		
Arah	U1	U2	Arah	U1	U2
X	145.14493	42.393482	X	134.43567	40.3567
Y	43.473876	141.545022	Y	38.46789	135.329

Dilihat dari tabel diatas dapat disimpulkan bahwa nilai perpindahan pada struktur LRB lebih besar 10% daripada FPB. *Displacement* pada LRB dan FPB harus memenuhi syarat 2% dari tinggi struktur. Tabel 4.10 merupakan kontrol *displacement* pada struktur, semua sistem isolasi memenuhi syarat *displacement* yang telah ditentukan.

Tabel 4. 13 Kontrol *Displacement* Pada LRB dan FPB

Tipe	arah defleksi lateral	Tinggi Pier	EQ (mm)		IJJIN EQ	KONTROL EQ
			MAX	MIN		
LRB 1	X	16	162.040815	-177.163908	320	Ok
	Y	16	43.473876	-53.035368	320	Ok
LRB 2	X	16	149.460627	-142.698348	320	Ok
	Y	16	44.621842	-42.6062	320	Ok
LRB 3	X	16	145.144928	-133.926156	320	Ok
	Y	16	43.473876	-40.250239	320	Ok
FPB 1	X	16	137.364855	-126.283411	320	Ok
	Y	16	41.197525	-37.879966	320	Ok
FPB 2	X	16	136.371245	-127.82031	320	Ok
	Y	16	40.898606	-38.338838	320	Ok
FPB 3	X	16	134.43567	-125.93822	320	Ok
	Y	16	38.46789	-34.759321	320	Ok

Jika Disajikan dalam sebuah grafik, maka perbandingan *displacement* rata rata akibat gempa arah X dan akibat gempa arah Y yang terjadi pada struktur LRB dan FPB adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 21 Grafik *Displacement* yang terjadi pada LRB dan FPB

4.9.2 Energi Dissipasi Struktur

Tabel 4.12 menunjukkan besarnya gaya disipasi yang dihasilkan oleh masing masing isolasi seismik. Energi disipasi pada struktur dihitung berdasarkan luasan kurva kapasitas yang dihasilkan. Berdasarkan hasil tersebut, struktur dengan isolasi seismik FPB dapat mereduksi energi disipasi lebih besar dibandingkan dengan LRB sekitar 2-3%. Sedangkan jika dibandingkan sesuai dengan tipe nya antara FPS dan LRB untuk tipe 1 sampai 3 secara berurutan memiliki perbedaan disipasi energi sebesar 4%, 7% dan 6%.

Tabel 4. 14 Energi Disipasi Pada LRB dan FPB

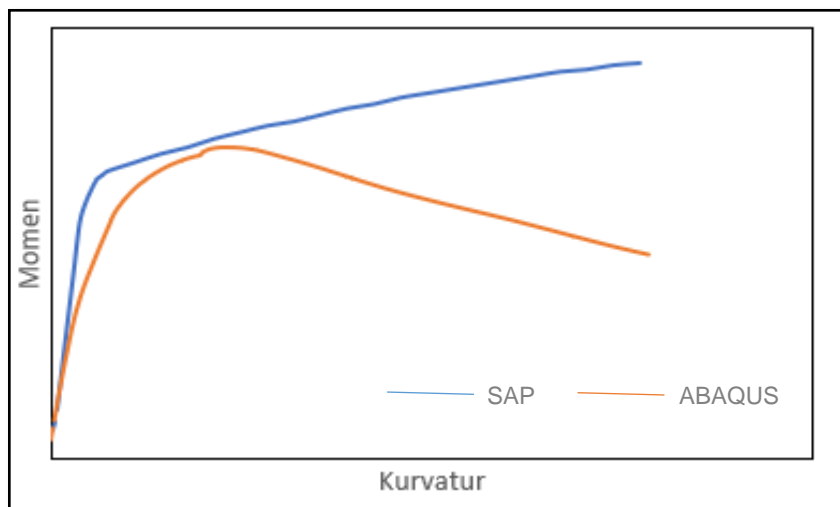
LRB (<i>Pier</i>)	Energi Disipasi (ton mm)	FPB (<i>Pier</i>)	Energi Disipasi (ton mm)
1	39196.1497	1	37538.2724
2	40290.767	2	43310.9634
3	41277.7219	3	43698.3711
LRB (<i>Pier & Pondasi</i>)	Energi Disipasi (ton mm)	FPB (<i>Pier & Pondasi</i>)	Energi Disipasi (ton mm)
1	40084.7397	1	43520.0581
2	42220.661	2	43660.5857
3	44072.3062	3	43687.82.89

Dari Tabel 4.12 diatas, didapatkan rasio energi disipasi pada masing masing isolasi stuktur yang memiliki kenaikan rata- rata sebesar 15% dibandingkan dengan struktur tanpa isolator (RL). Untuk nilai disipasi antara kedua isolator, FPB memiliki energi disipasi yang lebih besar dibandingkan dengan LRB.

Tabel 4. 15 Rasio Energi Disipasi

Type	Rasio LRB/RL	Rasio of FPB/RL
1	1.084	1.177
2	1.141	1.180
3	1.165	1.181

Gambar 5.19 menunjukkan hasil momen kurvatur yang dihasilkan dari SAP2000 dan ABAQUS. Dilihat dari grafik grafik kurvatur yang dihasilkan oleh SAP2000 mengalami kenaikan tegangan secara bertahap, pada ABAQUS mengalami kenaikan dan penurunan tegangan secara bertahap. Dapat dikatakan bahwa pemodelan dengan SAP2000 kurang valid karena kurvatur yang dihasilkan tidak mengalami penurunan tegangan dimana secara teoritis seharusnya model struktur mengalami penurunan tegangan.



Gambar 5. 1 Momen Kurvatur Antara Xtract dan ABAQUS

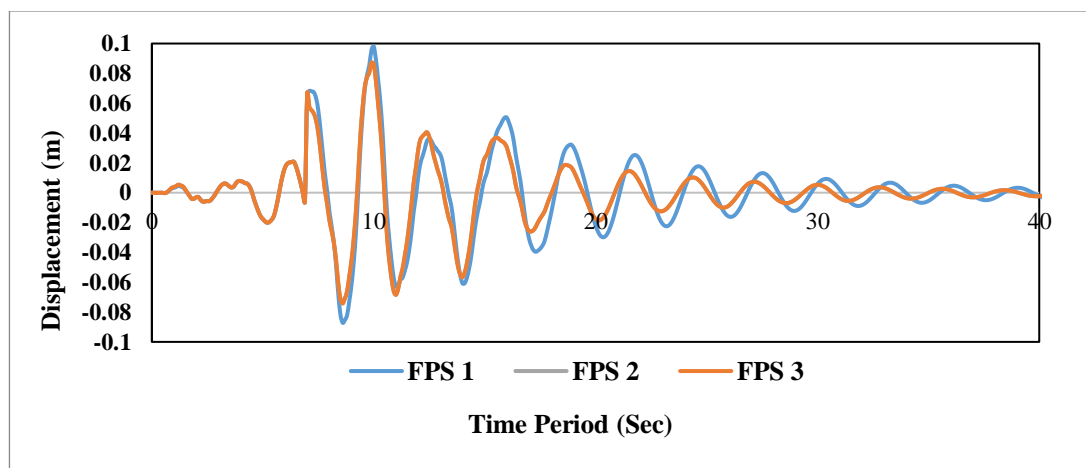
4.9.3 Daktilitas Struktur

Tabel 4.13 menunjukkan nilai daktilitas pada isolasi seismik LRB dan FPB. Daktilitas dihitung dari rasio antara simpangan maksimum struktur Gedung saat mencapai kondisi ambang keruntuhan atau kondisi ultimate dan simpangan struktur

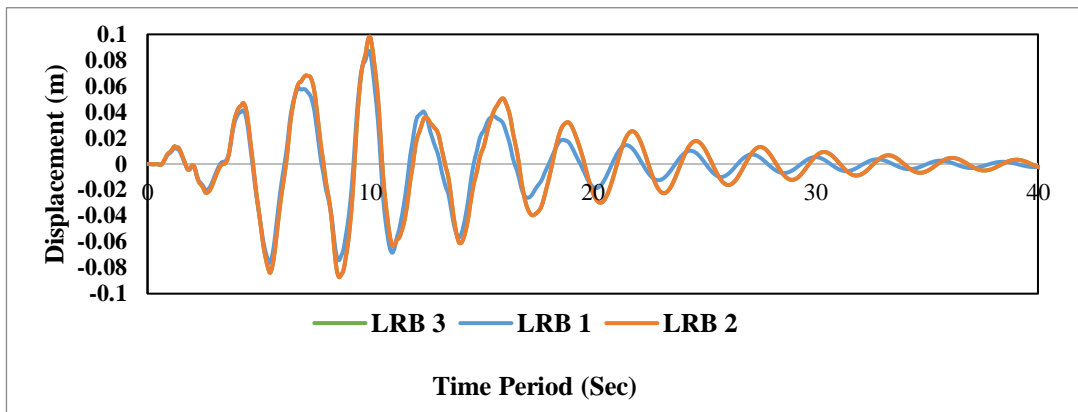
pada saat terjadinya leleh pertama (*first yield*). Kondisi ultimate merupakan kondisi dimana struktur masih dalam regime post elastik dan masih dibatasi sampai daerah *Immediate Occupancy (IO) to Life Safety (LS)*. Dari data yang yang dihasilkan, nilai daktilitas pada struktur dengan menggunakan isolasi seismic FPB memiliki nilai daktilitas lebih tinggi dibandingkan dengan LRB. Perbedaan daktilitas antara LRB dan FPB sebesar 20%. Sedangkan jika dibandingkan sesuai dengan tipe nya antara FPS dan LRB untuk tipe 1 sampai 3 secara berurutan memiliki perbedaan daktilitas sebesar 20%, 22% dan 17%.

4.9.4 Respon Struktur

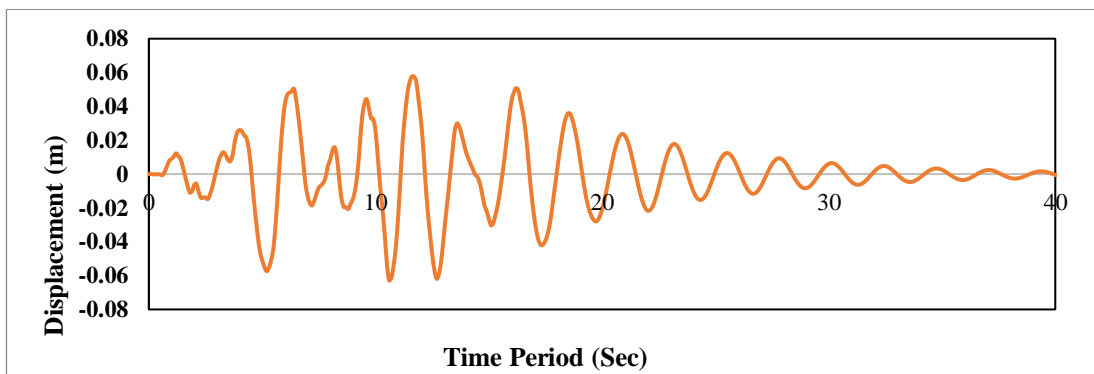
Berdasarkan Gambar 4.22 dan 4.23 dapat terlihat respon struktur yang dihasilkan oleh masing masing sistem isolasi FPB dan LRB. Pada kedua sistem ini memiliki respon struktur yang baik terhadap gempa dibandingkan dengan respon struktur pada struktur dengan menggunakan elastomer (Gambar 4.24). Namun jika dibandingkan antara FPB dan LRB, struktur dengan sistem isolasi FPB memiliki respon yang lebih baik dibandingkan dengan LRB. Hal ini dilihat berdasarkan nilai *displacement* yang dihasilkan oleh FPB lebih rendah dibandingkan dengan LRB. FP



Gambar 4. 22 Respon Struktur *Friction Pendulum System* (FPB)

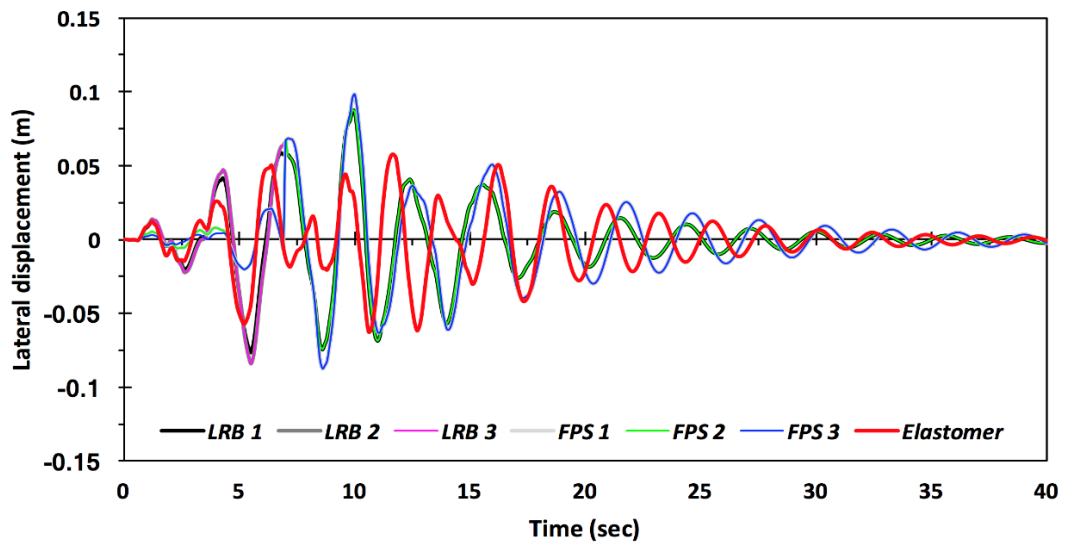


Gambar 4. 23 Respon Struktur *Lead Rubber Bearing* (LRB)



Gambar 4. 24 Respon Struktur Elastomer

Jika digabungkan dalam 1 grafik respon struktur (Gambar 4.25) , dapat terlihat struktur dengan menggunakan elastomer memiliki lebih banyak puncak tanpa pengurangan *displacement* yang signifikan dari waktu ke waktu. Sementara pada struktur dengan isolasi seismik memberikan redaman yang baik dalam mengisolasi gaya gempa yang diterima oleh kolom sehingga mengurangi gaya geser yang terjadi.



Gambar 4. 25 Respon Struktur Dengan dan Tanpa Isolator

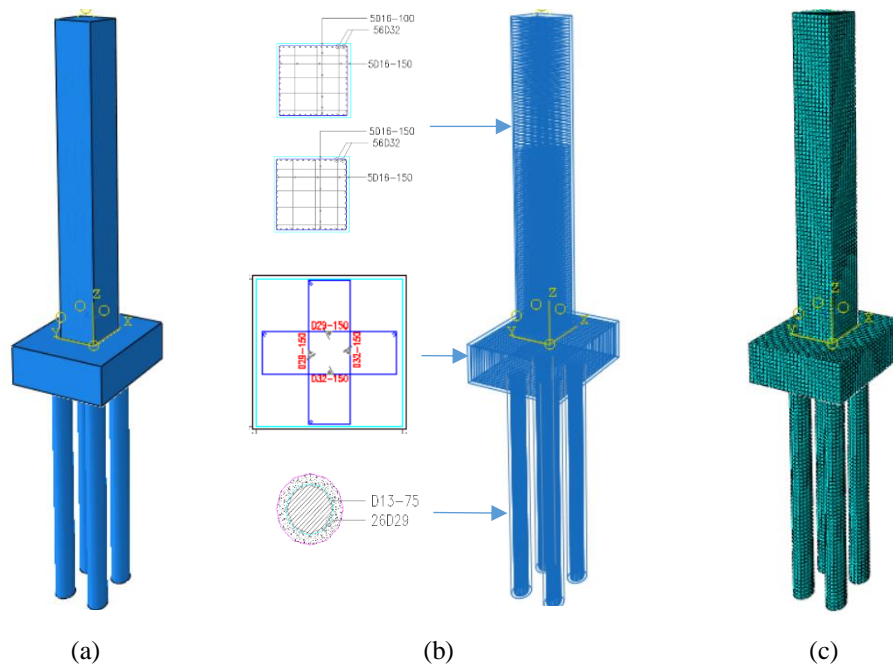
BAB V

ANALISA METODE ELEMEN HINGGA

Pada bab ini akan dibahas tentang pemodelan *pier* beton bertulang dengan menggunakan program bantu ABAQUS. Pemodelan ini dilakukan untuk selanjutnya dibandingkan dengan hasil dari pemodelan menggunakan SAP2000. Pemodelan hanya dilakukan pada struktur bagian *pier* saja untuk melihat sendi plastis dan keruntuhan yang terjadi pada struktur dengan beban yang sama dengan model pada SAP2000.

5.1 Pemodelan

Pada program ABAQUS di modelkan 3 elemen struktur yaitu *pier*, *poer* dan tiang pancang. Ukuran *pier* yang digunakan 2 x 2 meter dengan ketinggian 16 meter, untuk *poer* digunakan ukuran 5 x 5 meter dengan ketebalan 2 meter dan untuk pancang digunakan diameter 1000 mm dengan Panjang dimodelkan 12 meter. Pada ABAQUS untuk elemen *pier*, *poer* dan pancang di modelkan dengan elemen *solid* dan tulangan dimodelkan dengan elemen *truss*. Untuk pemodelan yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5. 2(a) Model *Pier*; (b) Model Tulangan; (c) *Meshing* pada ABAQUS

5.2 Material

5.2.1 Beton

Data material yang diinput pada *software* ABAQUS pada material beton terdiri dari beberapa parameter, yaitu

1. *Density*

Density yaitu berat jenis beton yang digunakan pada model struktur. Pada model digunakan berat jenis beton 2.5×10^{-9} ton/mm³.

2. *Elastic*

Pada parameter ini ada 2 variabel yang dibutuhkan yaitu *young modulus* dan *poisson ratio*. Nilai modulus elastisitas dan *poisson ratio* yang digunakan sesuai dengan Tabel 3.1. Untuk komponen struktur *pier*, *poer* dan pancang memiliki nilai modulus yang berbeda.

3. CDP (*Concrete Damage Plasticity*)

Input data CDP digunakan untuk memasukkan parameter nonlinier dari beton dan untuk melihat perilaku elemen saat kondisi plastis. Pada CDP ada beberapa parameter yang perlu diinput, yaitu:

a) *Plasticity*

Pada parameter ini digunakan parameter yang dijabarkan oleh Kmeieck dan Kaminski (2011) seperti ditunjukkan pada Tabel 3.9.

b) *Compression Behavior*

Pada parameter ini perlu adanya perhitungan dengan menggunakan perumusan yang dijabarkan oleh Paviloc, dkk (2013) sesuai dengan persamaan 3.7 sampai 3.9. Karena mutu beton pada komponen struktur *pier* (33,2 MPa), *poer* (29 MPa) dan pancang (50 MPa) berbeda maka dibuat CDP yang berbeda pula. Data yang dimasukkan pada *compression behavior* yaitu parameter *inelastic strain*, *compression stress* dan *compression damage*. Data lengkap ketiga parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.1, 5.2 dan 5.3. Untuk grafik hubungan *compression stress* dengan *strain* dapat dilihat pada Gambar 5.2, 5.3 dan 5.4. Sedangkan untuk grafik *compression damage parameter* dapat dilihat pada Gambar 5.5, 5.6 dan 5.7

Tabel 5. 1 *Inelastic Strain, Compression Stress dan Compression Damage* Beton f'c 33.2 MPa

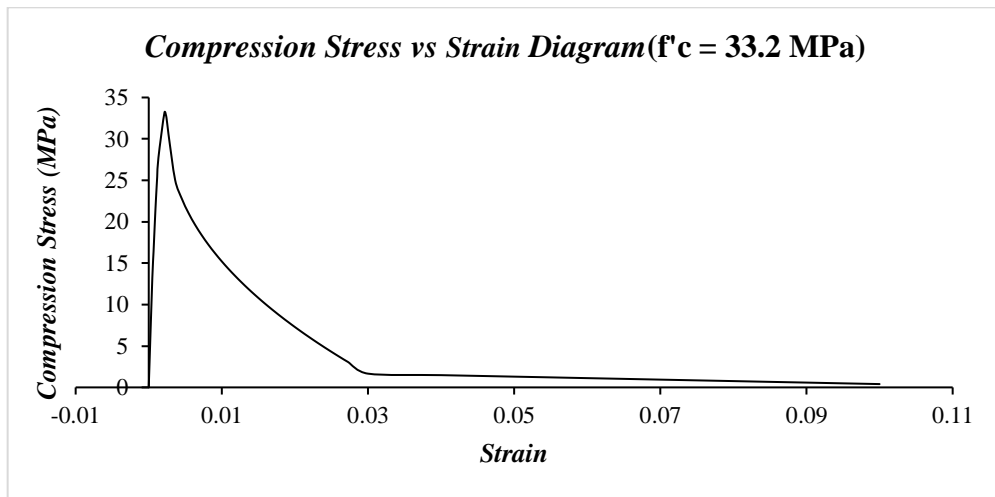
Point	Compression Stress (Mpa)	Inelastic Strain	Compression Damage (dc)	Point	Compression Stress (Mpa)	Inelastic Strain	Compression Damage (dc)
A	0.0000	0.0000	0.0000		10.4618	0.0149	0.6849
B	13.2800	0.0000	0.0000		9.7841	0.0159	0.7053
	16.3626	0.0002	0.0000		9.1304	0.0168	0.7250
	19.7284	0.0003	0.0000		8.4986	0.0177	0.7440
	22.7539	0.0005	0.0000		7.8867	0.0186	0.7624
	25.4259	0.0007	0.0000		7.2931	0.0195	0.7803
	27.7305	0.0008	0.0000		6.7164	0.0204	0.7977
C	33.2000	0.0017	0.0000		6.1553	0.0213	0.8146
	32.5594	0.0019	0.0193		5.6087	0.0222	0.8311
D	30.5758	0.0022	0.0790		5.0757	0.0231	0.8471
	25.0481	0.0031	0.2455		4.5553	0.0240	0.8628
	22.7909	0.0040	0.3135		4.0468	0.0250	0.8781
	21.0718	0.0049	0.3653		3.5495	0.0259	0.8931
	19.6312	0.0058	0.4087		3.0627	0.0268	0.9078
	18.3687	0.0068	0.4467	E	1.6600	0.0295	0.9500
	17.2325	0.0077	0.4809		1.4800	0.0395	0.9554
	16.1922	0.0086	0.5123		1.3000	0.0495	0.9608
	15.2278	0.0095	0.5413		1.1200	0.0595	0.9663
	14.3253	0.0104	0.5685		0.9400	0.0695	0.9717
	13.4747	0.0113	0.5941		0.7600	0.0795	0.9771
	12.6684	0.0122	0.6184		0.5800	0.0895	0.9825
	11.9005	0.0131	0.6416	F	0.4000	0.0995	0.9880
	11.1663	0.0140	0.6637				

Tabel 5. 2 *Inelastic Strain, Compression Stress dan Compression Damage* Beton f'c 29 MPa

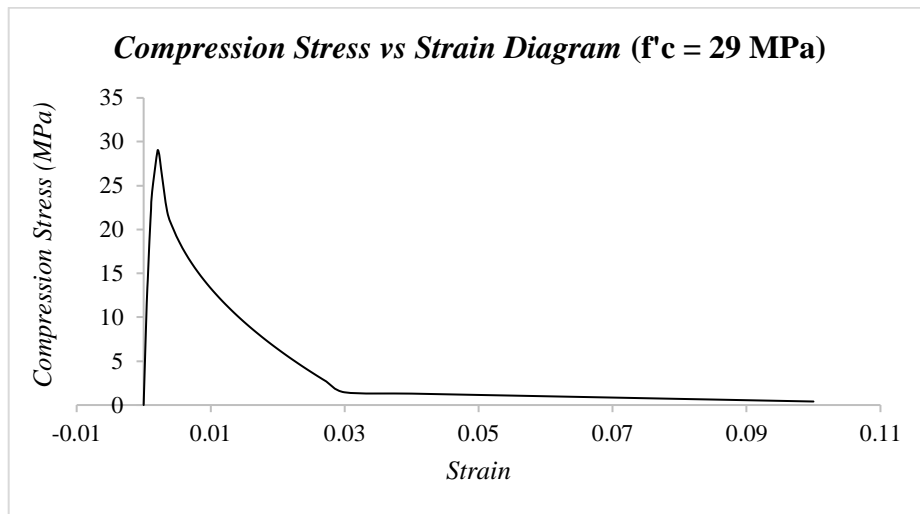
Point	Compression Stress (Mpa)	Inelastic Strain	Compression Damage (dc)	Point	Compression Stress (Mpa)	Inelastic Strain	Compression Damage (dc)
A	0.0000	0.0000	0.0000		9.2053	0.0149	0.6826
B	11.6000	0.0000	0.0000		8.6082	0.0158	0.7032
	14.3092	0.0002	0.0000		8.0323	0.0168	0.7230
	17.3025	0.0003	0.0000		7.4757	0.0177	0.7422
	19.9741	0.0005	0.0000		6.9366	0.0186	0.7608
	22.3165	0.0006	0.0000		6.4136	0.0195	0.7788
	24.3219	0.0008	0.0000		5.9055	0.0204	0.7964
C	29.0000	0.0016	0.0000		5.4111	0.0213	0.8134
	28.4868	0.0019	0.0177		4.9295	0.0222	0.8300
D	26.9190	0.0021	0.0718		4.4598	0.0231	0.8462
	22.0520	0.0031	0.2396		4.0013	0.0241	0.8620
	20.0644	0.0040	0.3081		3.5532	0.0250	0.8775
	18.5505	0.0049	0.3603		3.1150	0.0259	0.8926
	17.2819	0.0058	0.4041		2.6861	0.0268	0.9074
	16.1699	0.0067	0.4424	E	1.4500	0.0295	0.9500
	15.1693	0.0076	0.4769		1.3000	0.0395	0.9552
	14.2530	0.0085	0.5085		1.1500	0.0495	0.9603
	13.4035	0.0094	0.5378		1.0000	0.0595	0.9655
	12.6086	0.0104	0.5652		0.8500	0.0695	0.9707
	11.8594	0.0113	0.5911		0.7000	0.0795	0.9759
	11.1491	0.0122	0.6155		0.5500	0.0895	0.9810
	10.4727	0.0131	0.6389	F	0.4000	0.0995	0.9862
	9.8258	0.0140	0.6612				

Tabel 5. 3 *Inelastic Strain, Compression Stress* dan *Compression Damage* Beton $f'c$ 50 MPa

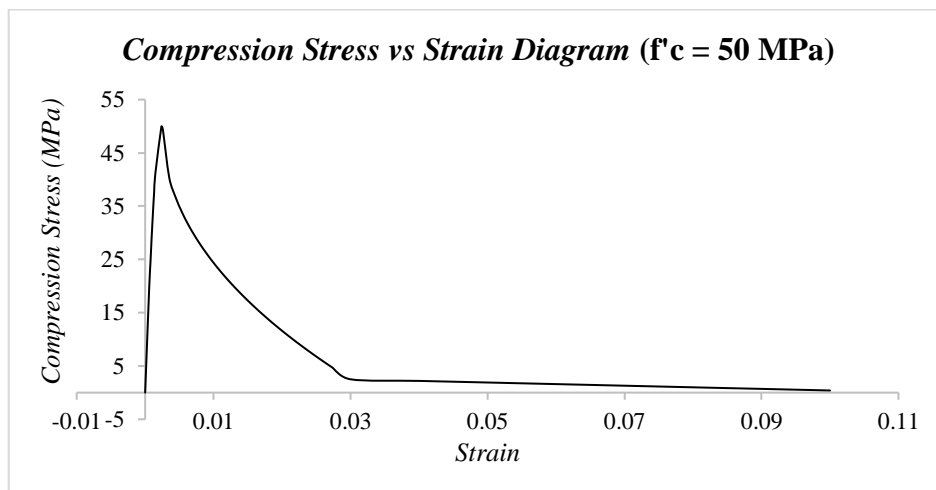
Point	Compression Stress (Mpa)	Inelastic Strain	Compression Damage (dc)	Point	Compression Stress (Mpa)	Inelastic Strain	Compression Damage (dc)
A	0.0000	0.0000	0.0000		16.7856	0.0148	0.6643
B	20.0000	0.0000	0.0000		15.6870	0.0157	0.6863
	24.5673	0.0002	0.0000		14.6272	0.0166	0.7075
	29.3118	0.0004	0.0000		13.6026	0.0175	0.7279
	33.6788	0.0005	0.0000		12.6101	0.0184	0.7478
	37.6327	0.0007	0.0000		11.6472	0.0194	0.7671
	41.1334	0.0009	0.0000		10.7114	0.0203	0.7858
C	50.0000	0.0018	0.0000		9.8009	0.0212	0.8040
	49.8290	0.0019	0.0034		8.9137	0.0221	0.8217
D	49.2985	0.0020	0.0140		8.0484	0.0230	0.8390
	40.3801	0.0029	0.1924		7.2035	0.0239	0.8559
	36.7348	0.0038	0.2653		6.3777	0.0248	0.8724
	33.9572	0.0047	0.3209		5.5700	0.0257	0.8886
	31.6286	0.0057	0.3674		4.7792	0.0267	0.9044
	29.5870	0.0066	0.4083	E	2.5000	0.0294	0.9500
	27.7493	0.0075	0.4450		2.2000	0.0394	0.9560
	26.0661	0.0084	0.4787		1.9000	0.0494	0.9620
	24.5052	0.0093	0.5099		1.6000	0.0594	0.9680
	23.0442	0.0102	0.5391		1.3000	0.0694	0.9740
	21.6669	0.0111	0.5667		1.0000	0.0794	0.9800
	20.3611	0.0120	0.5928		0.7000	0.0894	0.9860
	19.1170	0.0130	0.6177	F	0.4000	0.0994	0.9920
	17.9273	0.0139	0.6415				



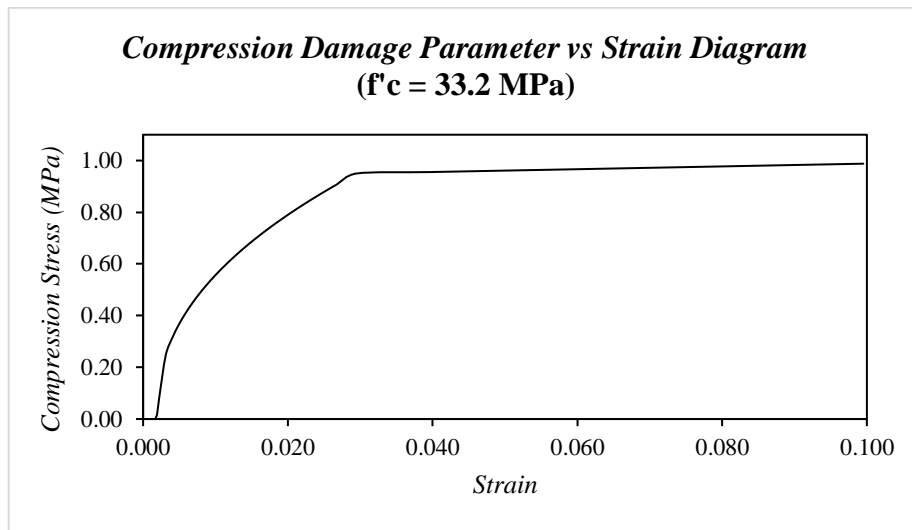
Gambar 5. 3 Interaksi Antara *Compression Stress* dan *Inelastic Strain* untuk beton dengan $f'c = 33.2$ MPa



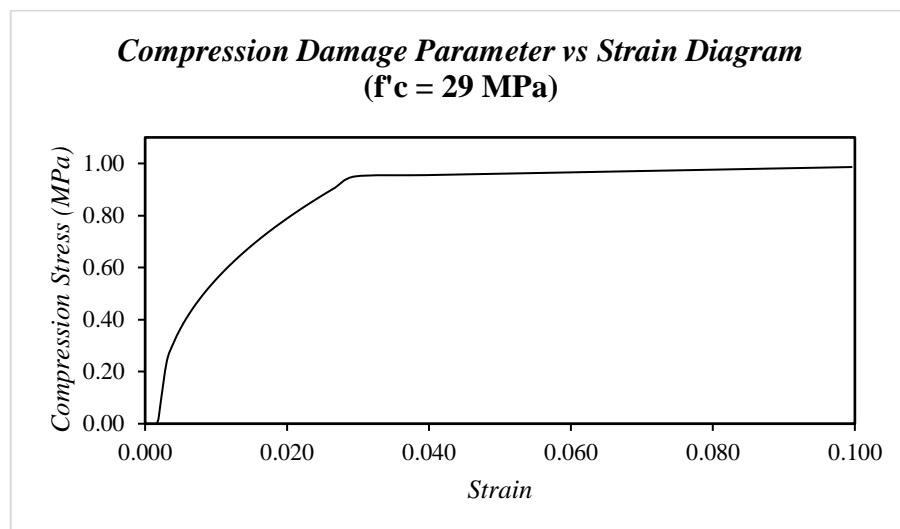
Gambar 5. 4 Interaksi Antara *Compression Stress* dan *Inelastic Strain* untuk beton dengan $f'_c = 29$ MPa



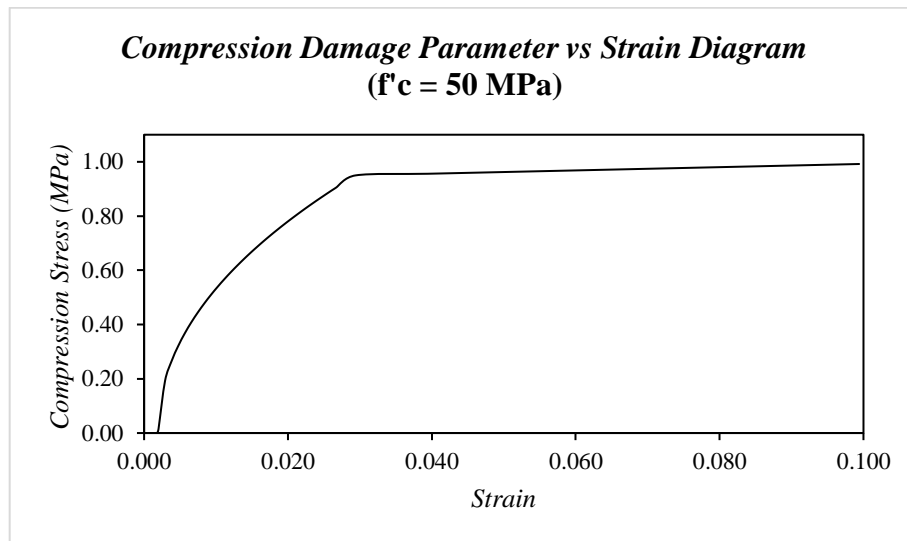
Gambar 5. 5 Interaksi Antara *Compression Stress* dan *Inelastic Strain* untuk beton dengan $f'_c = 50$ MPa



Gambar 5. 6 Interaksi Antara *Compression Stress* dan *Inelastic Strain* untuk beton dengan $f'_c = 33.2$ MPa



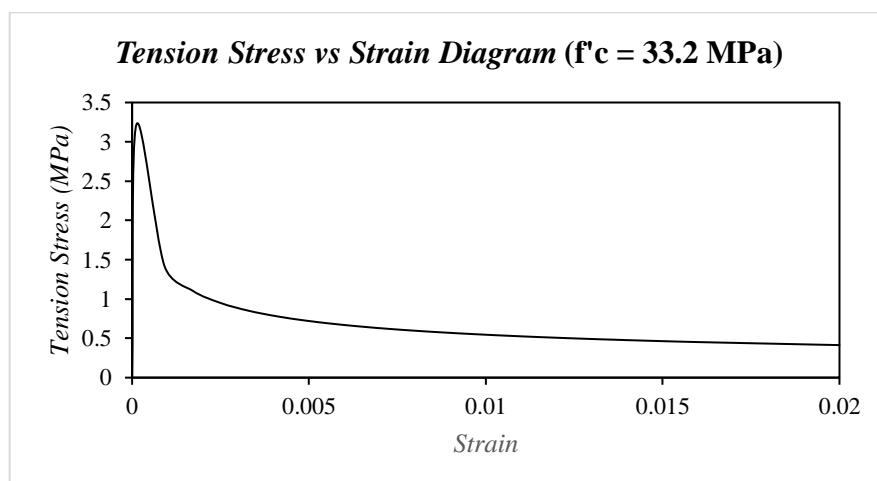
Gambar 5. 7 Interaksi Antara *Compression Stress* dan *Inelastic Strain* untuk beton dengan $f'_c = 29$ MPa



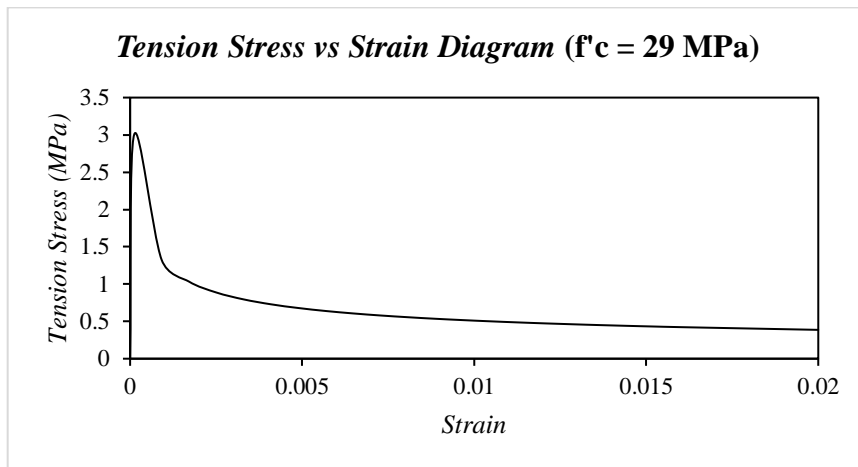
Gambar 5. 8 Interaksi Antara *Compression Stress* dan *Inelastic Strain* untuk beton dengan $f'c = 50$ MPa

c) *Tensile Behavior*

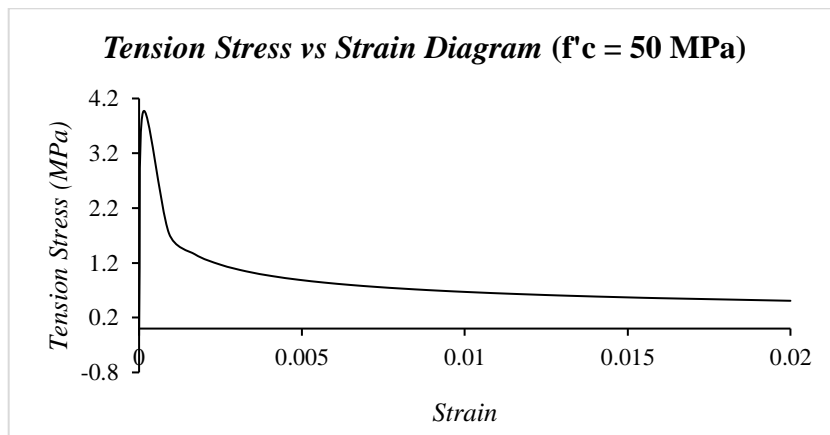
Pada parameter ini perlu adanya perhitungan dengan menggunakan perumusan yang dijabarkan oleh Kmeiecik dan Kaminski (2011) sesuai dengan persamaan 3.7 sampai 3.9. Data yang dimasukkan pada *tensile behavior* yaitu parameter *cracking strain*, *tension stress* dan *tension damage*. Untuk data ketiga parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.4, 5.5 dan 5.6 Sedangkan untuk grafik hubungan *tension stress* dengan *strain* dapat dilihat pada Gambar 5.6, 5.7 dan 5.8.



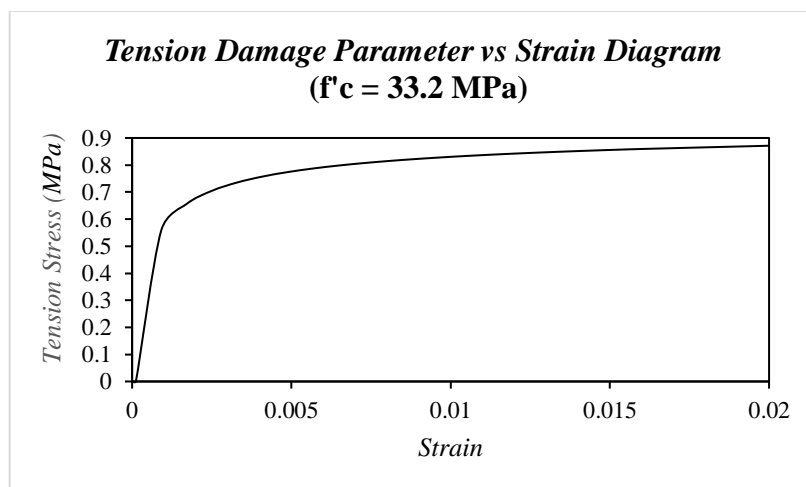
Gambar 5. 9 Interaksi Antara *Tension Stress* dan *Inelastic Strain* untuk beton dengan $f'c = 33.2$ MPa



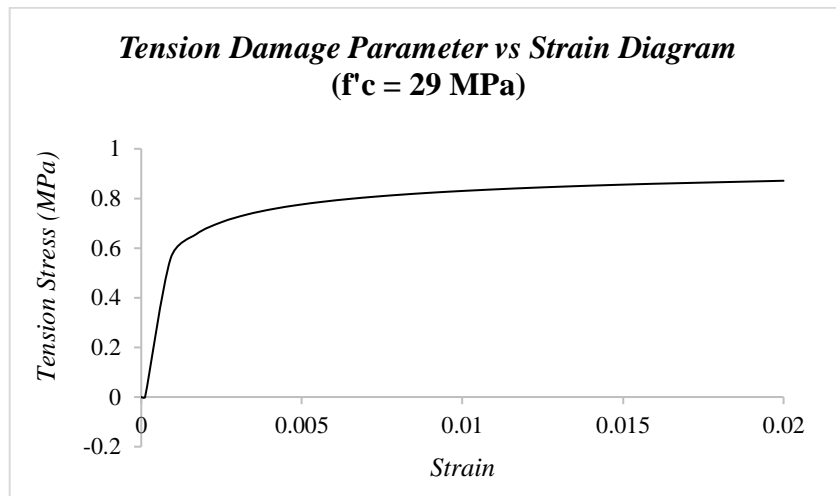
Gambar 5. 10 Interaksi Antara *Tension Stress* dan *Inelastic Strain* untuk beton dengan $f'_c = 29$ MPa



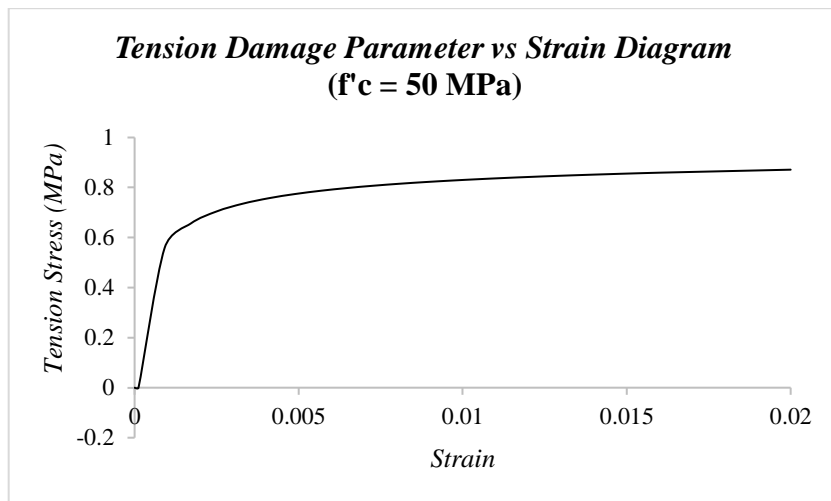
Gambar 5. 11 Interaksi Antara *Tension Stress* dan *Inelastic Strain* untuk beton dengan $f'_c = 50$ MPa



Gambar 5. 12 Diagram Interaksi *Tension Damage* vs *Cracking Strain* Beton $f'_c = 33.2$ MPa



Gambar 5. 13 Diagram Interaksi *Tension Damage* vs *Cracking Strain* Beton $f'_c = 33.2$ MPa



Gambar 5. 14 Diagram Interaksi *Tension Damage* vs *Cracking Strain* Beton $f'_c = 33.2$ MPa

Tabel 5. 4 *Tension Stress, Inelastic Strain dan Tension Damage* Beton

f'c 33.2 Mpa			f'c 29 Mpa			f'c 50 Mpa		
Tension Stress (Mpa)	Inelastic Strain	Tension Damage (dt)	Tension Stress (Mpa)	Inelastic Strain	Tension Damage (dt)	Tension Stress (Mpa)	Inelastic Strain	Tension Damage (dt)
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.000
3.2152	0.0000	0.0000	3.0049	0.0000	0.0000	0.000	0.0000	0.0000
1.4212	0.0008	0.5580	1.3282	0.0008	0.5580	0.000	0.0008	0.0000
1.1064	0.0016	0.6559	1.0340	0.0016	0.6559	0.000	0.0016	0.0000
0.9496	0.0024	0.7047	0.8875	0.0024	0.7047	0.000	0.0024	0.0000
0.8504	0.0032	0.7355	0.7948	0.0032	0.7355	0.000	0.0032	0.0000
0.7800	0.0040	0.7574	0.7290	0.0040	0.7574	0.000	0.0040	0.0000
0.7266	0.0048	0.7740	0.6791	0.0048	0.7740	0.000	0.0048	0.0000
0.6841	0.0056	0.7872	0.6394	0.0056	0.7872	0.000	0.0056	0.0000
0.6492	0.0064	0.7981	0.6067	0.0064	0.7981	0.000	0.0064	0.0000
0.6198	0.0072	0.8072	0.5793	0.0072	0.8072	0.000	0.0072	0.0000
0.5946	0.0080	0.8151	0.5557	0.0080	0.8151	0.000	0.0080	0.0000
0.5727	0.0087	0.8219	0.5352	0.0087	0.8219	0.000	0.0087	0.0000
0.5533	0.0095	0.8279	0.5172	0.0095	0.8279	0.000	0.0095	0.0000
0.5361	0.0103	0.8333	0.5011	0.0103	0.8333	0.000	0.0103	0.0000
0.5206	0.0111	0.8381	0.4866	0.0111	0.8381	0.000	0.0111	0.0000
0.5066	0.0119	0.8424	0.4735	0.0119	0.8424	0.000	0.0119	0.0000
0.4938	0.0127	0.8464	0.4615	0.0127	0.8464	0.000	0.0127	0.0000
0.4821	0.0135	0.8501	0.4506	0.0135	0.8501	0.000	0.0135	0.0000
0.4713	0.0143	0.8534	0.4405	0.0143	0.8534	0.000	0.0143	0.0000
0.4613	0.0151	0.8565	0.4311	0.0151	0.8565	0.000	0.0151	0.0000
0.4520	0.0159	0.8594	0.4224	0.0159	0.8594	0.000	0.0159	0.0000
0.4136	0.0199	0.8714	0.3866	0.0199	0.8714	0.000	0.0199	0.0000

5.2.2 Baja

Data material yang diinput pada *software* ABAQUS pada material baja terdiri dari beberapa parameter, yaitu

1. *Density*

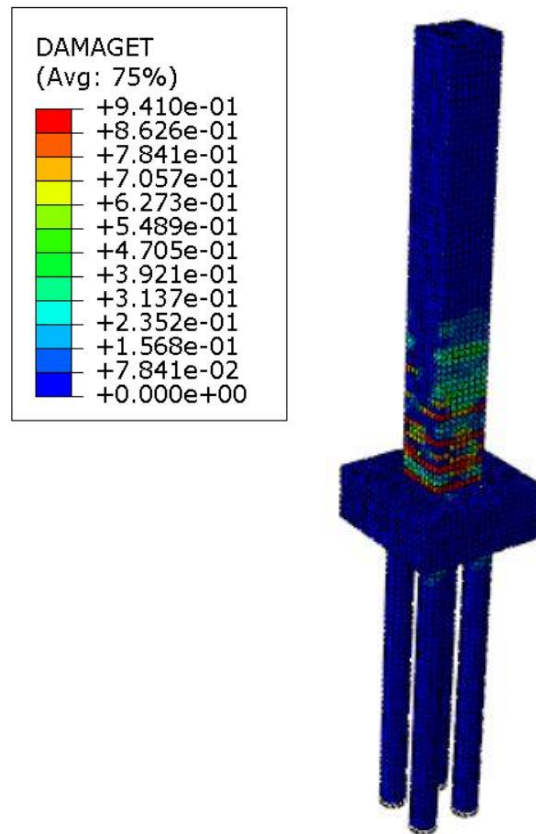
Density yaitu berat jenis beton yang digunakan pada model struktur. Pada model digunakan berat jenis beton $7.85 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$.

2. *Elastic*

Pada parameter ini ada 3 variabel yang dibutuhkan yaitu *young modulus*, *poisson ratio* dan *yield stress*. Nilai modulus elastisitas dan *poisson ratio* yang digunakan sesuai dengan Tabel 3.2.

5.3 Hasil Pemodelan

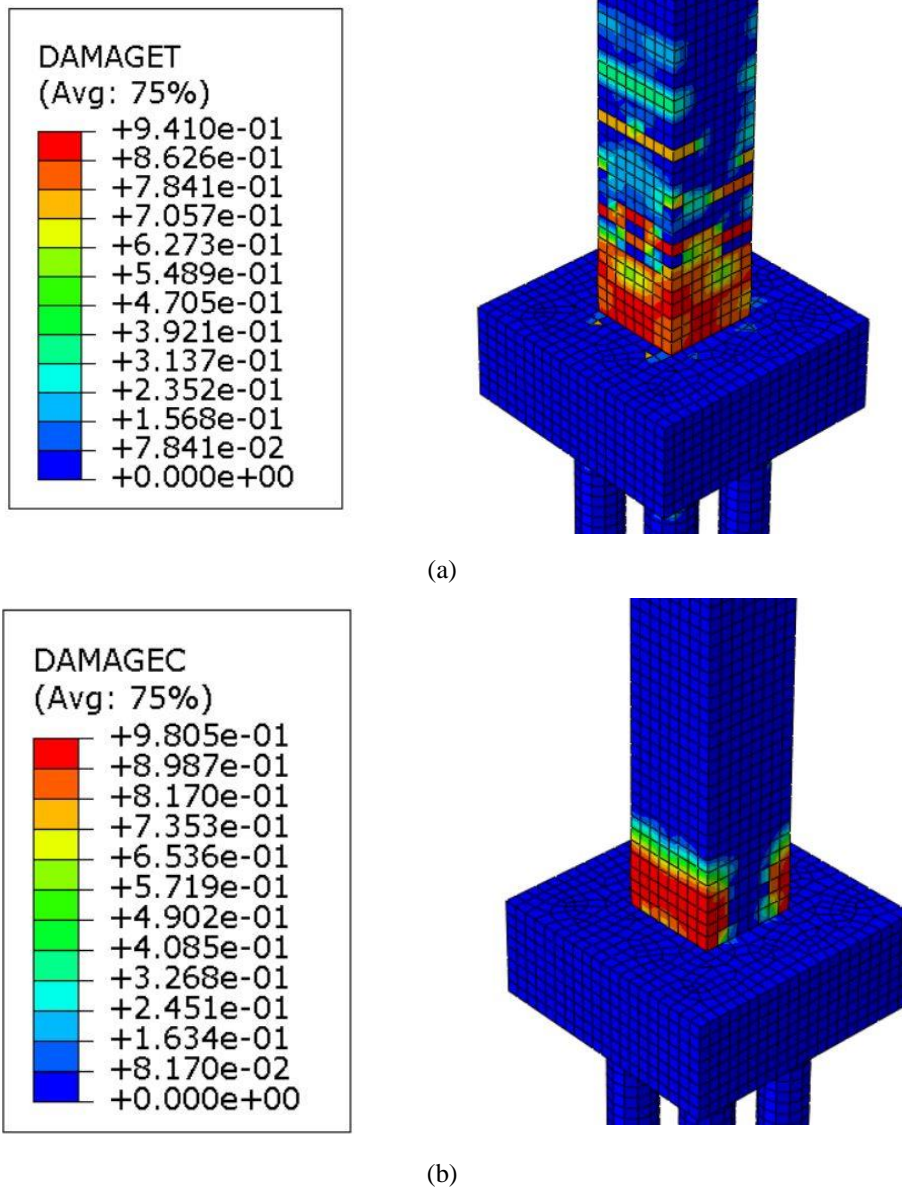
Gambar 5.14 menunjukkan hasil pemodelan struktur dengan menggunakan ABAQUS secara keseluruhan. Kerusakan pada struktur berada pada elemen kolom bagian bawah dimana sendi plastis terjadi pada elemen kolom. Hasil yang didapat dari pemodelan sesuai dengan perencanaan struktur dimana keruntuhan atau kegagalan elemen struktur terjadi pada elemen kolom.



Gambar 5. 15 Hasil Analisis FEM

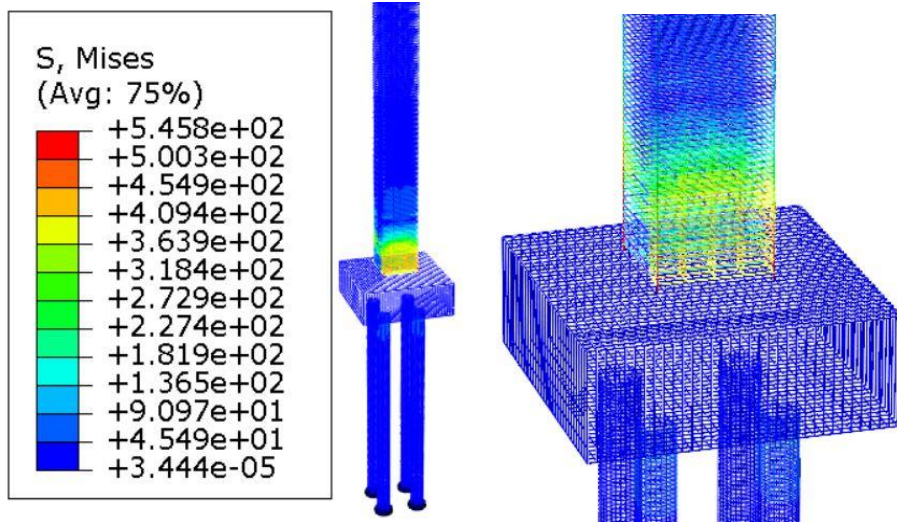
Elemen struktur mengalami kondisi tekan dan tarik ketika diberikan beban, pada Gambar 5.15 dapat dilihat detail dari kerusakan elemen struktur akibat tekan dan tarik. Pada kondisi ter tekan elemen kolom di bagian bawah mengalami kerusakan di setiap sisinya, namun pada saat kondisi tarik elemen kolom di bagian bawah hanya mengalami leleh di 2 sisi saja. Kerusakan yang terjadi pada elemen struktur akibat tekan berpengaruh lebih besar dibandingkan akibat tarik. Elemen struktur akibat tekan mengalami kerusakan sepanjang 6.91 mm sedangkan pada

kerusakan akibat tarik mengalami kerusakan sepanjang 2.170 mm. Untuk melihat leleh pertama yang terjadi pada sendi plastis disajikan pada Gambar 5.17.

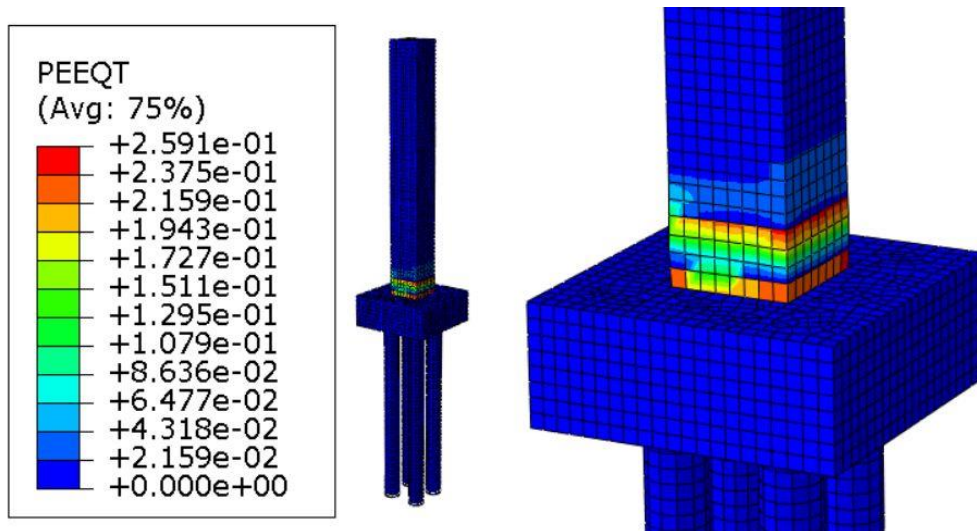


Gambar 5. 16 Kerusakan Struktur (a) Akibat Tarik; (b) Akibat Tekan

Untuk distribusi regangan pada baja tulangan untuk model struktur yang didapatkan dari hasil analisis FEM baik regangan tekan maupun tarik dapat dilihat pada Gambar 5.16 dimana tulangan pada bagian bawah kolom mengalami leleh mencapai leleh ultimate sebesar 545.833 MPa.

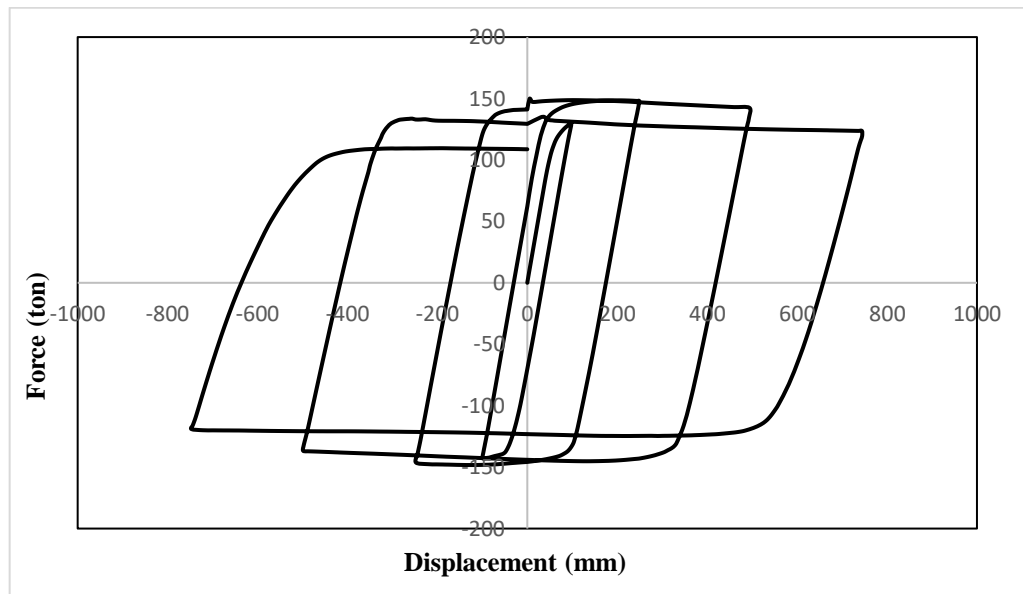


Gambar 5. 17 Regangan Tarik dan Tekan Pada Tulangan



Gambar 5. 18 Leleh yang Terjadi Pada Sendi Plastis

Gambar 5.18 menunjukkan kurva histeresis yang dihasilkan pada pemodelan. Pada pemodelan yang dilakukan gaya geser maksimum yang dicapai oleh struktur sebesar 149.762 ton. Dilihat dalam bentuk kurva nya, kurva tersebut sudah termasuk dalam kategori ideal.



Gambar 5. 19 Kurva Histeresis Struktur (ABAQUS)

5.4 Verifikasi Hasil Metode Elemen Hingga dengan Hasil SAP2000

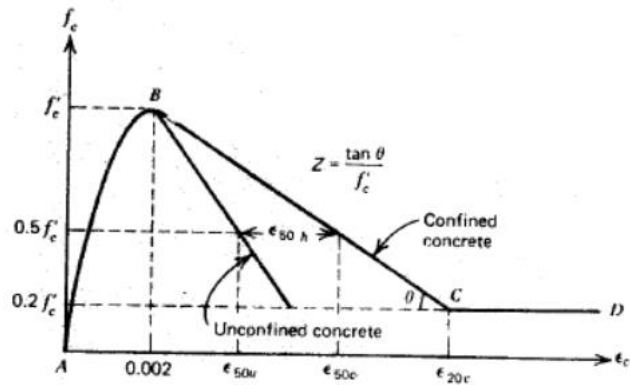
Verifikasi dilakukan untuk membandingkan hasil antara pemodelan ABAQUS dan SAP2000. Pemodelan elemen hingga yang dilakukan tidak memodelkan LRB dan FPB sehingga verifikasi hasil yang dilakukan antara ABAQUS dan SAP2000 hanya sebatas melihat keruntuhan struktur yang terjadi yaitu letak terjadinya sendi plastis dan besarnya deformasi yang dihasilkan antara kedua program tersebut. Untuk mekanisme keruntuhan pada LRB dibandingkan dengan hasil pada ABAQUS memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Dengan menggunakan LRB gaya geser pada *displacement* yang dihasilkan dapat direduksi sekitar 49-59% sedangkan untuk struktur dengan menggunakan FPB dapat di reduksi sekitar 40-51%. Dalam hal ini LRB tidak dikatakan mereduksi gaya geser lebih besar daripada FPB karena nilai reduksi yang dihitung berdasarkan keruntuhan masing masing isolator dimana pada bab sebelumnya telah dibahas mekanisme keruntuhan yang dialami FPB lebih baik dibandingkan dengan LRB. Secara umum kedua isolator mereduksi gaya geser dengan baik, namun jika dibandingkan diantara keduanya FPB memiliki kemampuan mereduksi gaya geser lebih besar dibandingkan dengan LRB.

Tabel 5. 5 Gaya Geser dan *Displacement* SAP2000 dan ABAQUS

LRB				FPB			
B-IO							
Drift (meter)	Gaya Geser (ton)		Reduksi	Drift (meter)	Gaya Geser (ton)		Reduksi
	SAP2000	ABAQUS			SAP2000	ABAQUS	
0.137	87.256	197.005	56%	0.0758	82.449	138.995	40.7%
0.137	87.525	197.005	56%	0.0760	82.665	138.995	40.5%
0.137	87.256	197.005	56%	0.0761	82.622	138.995	40.6%
IO-LS							
0.230	91.386	224.681	59%	0.186	89.146	215.623	59%
0.237	91.984	224.681	59%	0.186	89.361	215.623	59%
0.230	91.386	224.681	59%	0.186	89.319	215.623	59%
LS-CP							
0.519	104.049	209.716	50%	0.462	105.327	213.493	51%
0.487	103.089	209.716	51%	0.462	105.542	213.493	51%
0.519	104.048	209.716	50%	0.462	105.500	213.493	51%
C-D							
0.534	104.708	204.389	49%	0.501	107.493	209.330	49%
0.487	103.089	211.829	51%	0.501	107.708	209.330	49%
0.519	104.048	207.518	50%	0.501	107.666	209.330	49%

5.5 Analisa Confinement Effect

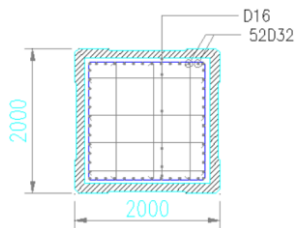
Efek dari pengekangan adalah untuk meningkatkan kekuatan dan tegangan ultimit pada beton. Dengan adanya kolom dengan pengekangan yang diakibatkan karena tulangan sengkang sangat berpengaruh sekali terhadap ketahanan struktur yang direncanakan, sehingga kolom tersebut memiliki kekuatan yang lebih besar dan pada penampang kolom lebih dapat menerima gaya aksial yang lebih besar. Pada umumnya, pengekangan dapat menggunakan sengkang biasa ataupun tulangan berbentuk spiral. Pada studi ini digunakan pengekangan kolom dengan sengkang. Namun, dalam pemodelan menggunakan ABAQUS tidak dapat menghitung *confinement effect* pada struktur sehingga perlu dihitung analisa *confinement* sehingga didapatkan grafik tegangan- regangan akibat pengekangan tulangan yang kemudian secara manual di input pada ABAQUS. Hubungan tekanan tegangan-regangan dari beton terkekang berdasarkan modifikasi Kent dan Park (Scott, Park dan Priestley, 1982), ditunjukkan pada Gambar 5.19



Gambar 5. 20 Kurva Tegangan Regangan Beton Berdasarkan Modifikasi Kent dan Park

Berikut ini merupakan cara perhitungan kekangan beton untuk sengkang biasa (*rectangular hoops*) yang nantinya akan di input pada program. Pada pemodelan struktur digunakan tulangan sengkang dengan jarak 100 dan 150 mm.

Diketahui:



$f'_c =$	33.2	Mpa
$f_y =$	400	Mpa
$b =$	2000	Mm
$h =$	2000	Mm
$d' =$	77	Mm
\varnothing Sengkang =	16	Mm
$A_{S\text{sengkang}} =$	201.06	mm ²
$A = b - 2(2 d' - 2 \varnothing\text{sengkang}) =$	1756	Mm
$B = h - 2(2 d' - 2 \varnothing\text{sengkang}) =$	1756	Mm
$C = b - 2(d'_a) =$	1846	Mm
$D = h - 2(d'_a) =$	1846	Mm
Jarak <i>Confinement Steel</i> , $s_h =$	100	Mm
	150	Mm

Region AB : $e_c \leq 0.002$

$$f_c = f'_c [2 \times e_c / 0.002 - (e_c / 0.002)^2]$$

Region BC : $0.002 \leq e_c \leq e_{20c}$

$$f_c = f'_c [1 - Z (e_c - 0.002)]$$

Dimana:

$$Z = 0.5 / (e_{50u} + e_{50h} - 0.002)$$

Untuk mutu beton dalam satuan Mpa maka:

$$e_{50u} = (3 + 0.29 \times f'_c) / (145 \times f'_c - 1000)$$

$$e_{50h} = 3/4 \times r_s (b''/s_h)^{0.5}$$

$$r_s = [A_s \times 2 (A+B)] / [C \times D \times s]$$

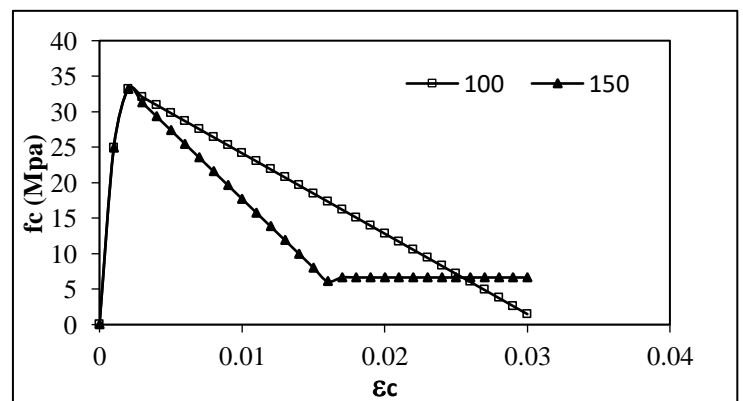
Region CD : $e_c \geq e_{20c}$

$$f_c = 0.2 * f'_c$$

Menghitung Parameter-Parameter Pada **Region BC**

$$\begin{aligned}
 b'' &= b - 2*d'_s = & 1846 & \text{ mm} \\
 s_{h(100)} &= & 100 & \text{ mm} \\
 s_{h(150)} &= & 150 & \text{ mm} \\
 r_{s(100)} &= & 0.004144 & \\
 r_{s(150)} &= & 0.002763 & \\
 e_{50h} = 3/4 * r_s (b''/s_h)^{0.5} &= & 0.013355 & \text{ untuk } s = 100 \text{ mm} \\
 & & 0.007269 & \text{ untuk } s = 150 \text{ mm} \\
 e_{50u} = (3 + 0.29 f'_c) / (145 f'_c - 1000) &= & 0.003301 & \\
 \\
 Z = 0.5 / (e_{50u} + e_{50h} - 0.002) &= & 34.118 & \text{ untuk } s = 100 \text{ mm} \\
 & & 58.344 & \text{ untuk } s = 150 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas didapatkan kurva tegangan regangan untuk sengkang biasa (*rectangular hoops*) pada Gambar 5.20 dimana jarak sengkang yang digunakan yaitu 100 dan 150 mm. Untuk sengkang dengan jarak 100 mm berpengaruh sebesar 0.414% terhadap kekangan beton, sedangkan untuk jarak sengkang 150 mm berpengaruh sebesar 0.276%. Dari prosentase yang dihasilkan dapat diketahui bahwa semakin dekat jarak sengkang maka semakin besar kemampuan kolom dalam menerima beban aksial. Untuk data lengkap dapat dilihat pada Tabel 5.6



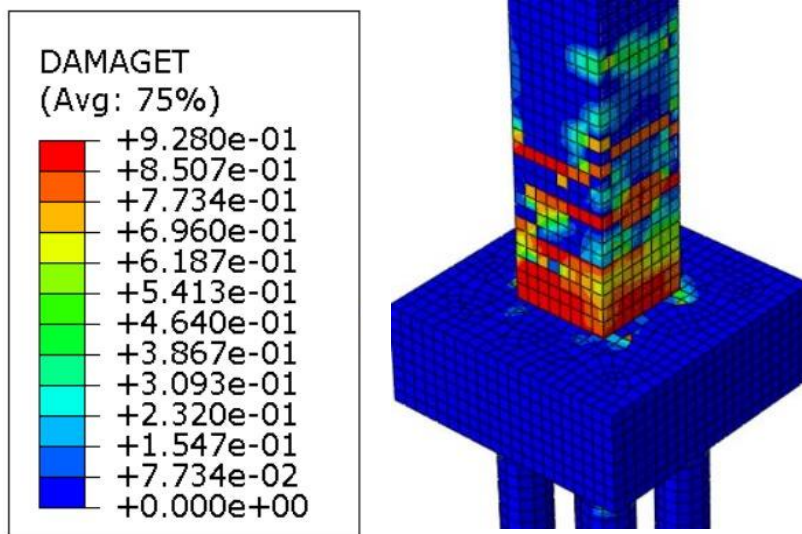
Gambar 5. 21 Strees-Strain Concrete Confined By Rectangular Hoops

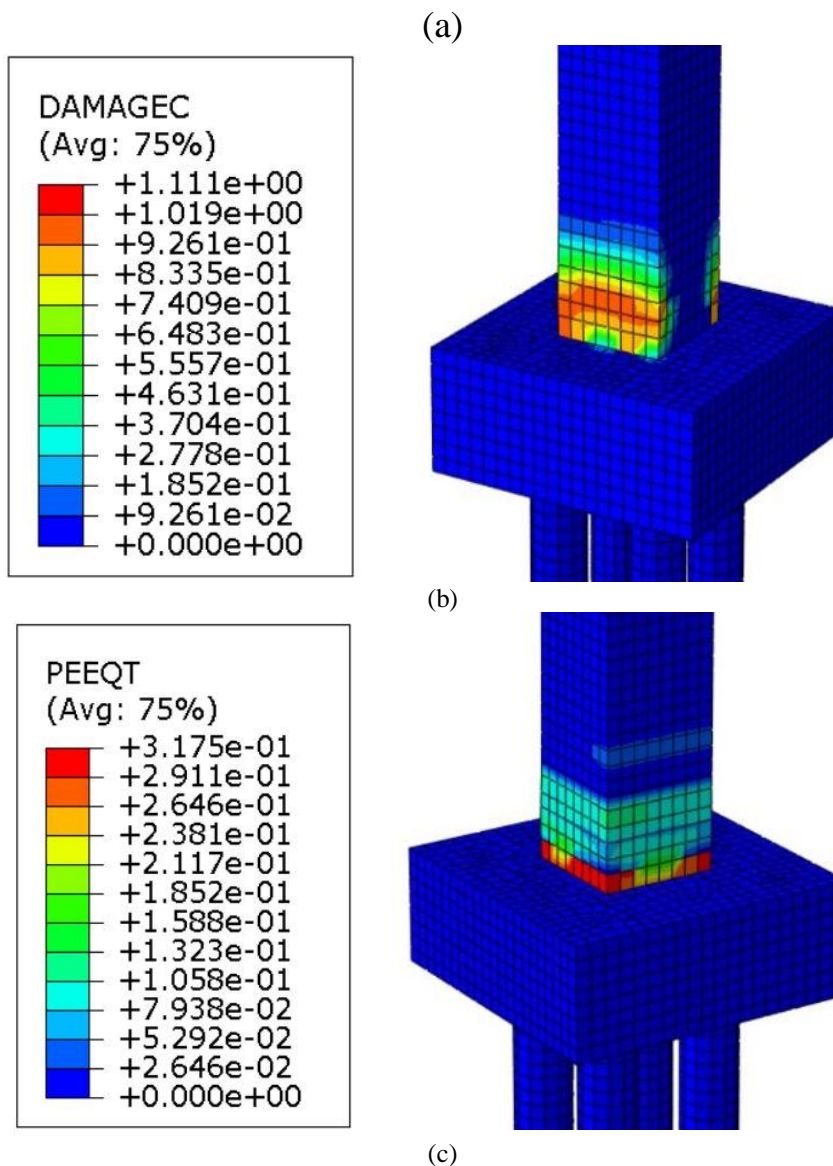
Tabel 5.5 menunjukkan tegangan tekan, regangan *inelastic* dan *compression damage* yang akan di input pada ABAQUS.

Tabel 5. 6 *Tension Stress, Inelastic Strain dan Tension Damage* Pada Beton Terkekang

Compression Stress (Mpa)	Inelastic Strain	Compression Damage (dc)
24.900	0.000	0.000
33.200	0.001	0.000
32.067	0.002	0.034
30.935	0.003	0.068
29.802	0.004	0.102
28.669	0.005	0.136
27.536	0.006	0.171
26.404	0.007	0.205
25.271	0.008	0.239
24.138	0.009	0.273
23.006	0.010	0.307
21.873	0.011	0.341
20.740	0.012	0.375
19.607	0.013	0.409
18.475	0.014	0.444
17.342	0.015	0.478
16.209	0.016	0.512
15.077	0.017	0.546
13.944	0.018	0.580
12.811	0.019	0.614
11.679	0.020	0.648
10.546	0.021	0.682
9.413	0.022	0.716
8.280	0.023	0.751
7.148	0.024	0.785
6.015	0.025	0.819
4.882	0.026	0.853
3.750	0.027	0.887
2.617	0.028	0.921
1.484	0.029	0.955

Pada kondisi tertekan elemen kolom di bagian bawah mengalami kerusakan di setiap sisinya, namun pada saat kondisi tarik elemen kolom di bagian bawah hanya mengalami leleh di 2 sisi saja. Kerusakan yang terjadi pada elemen struktur akibat tekan berpengaruh lebih besar dibandingkan akibat tarik. Elemen struktur akibat tekan mengalami kerusakan sepanjang 5.68 m sedangkan pada kerusakan akibat tarik mengalami kerusakan sepanjang 1.67 m.

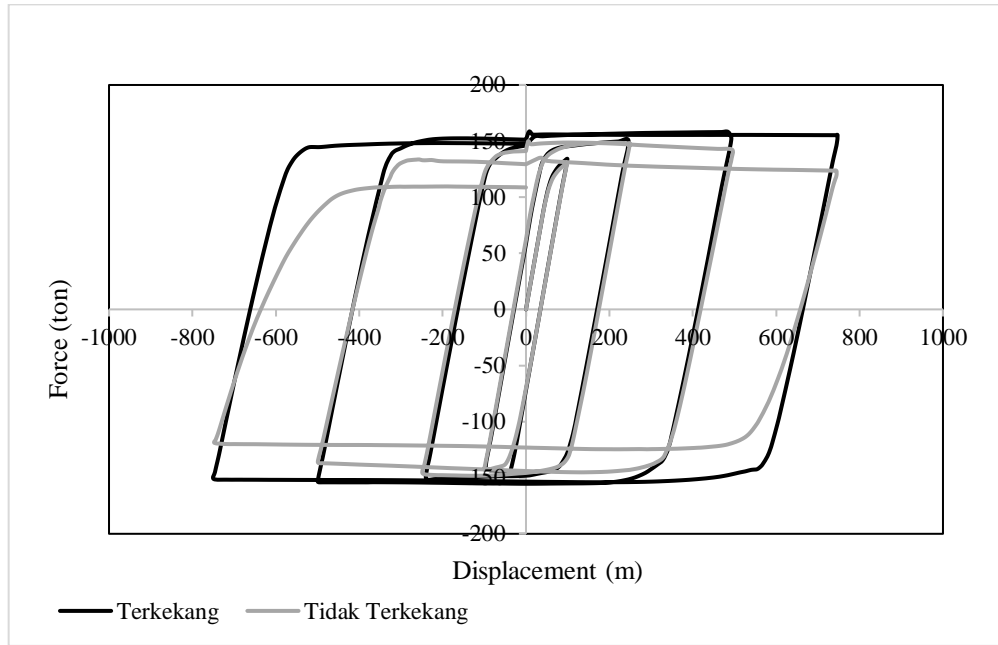




Gambar 5. 22 Kerusakan Struktur (a) Akibat Tarik; (b) Akibat Tekan; (c) Leleh Pertama Sendi Plastis

Struktur dengan menggunakan analisa kekangan beton dibandingkan dengan struktur tanpa analisa kekangan mengalami kerusakan yang lebih ringan. Perbedaan yang terjadi ditinjau dari Panjang sendi plastis yang terjadi sebesar 18% untuk kerusakan akibat tarik dan 23% kerusakan akibat tekan. Selain itu dilihat dari kontur sendi plastis awal yang terjadi pada struktur dengan kekangan mengalami kerusakan sendi plastis lebih ringan dibandingkan dengan struktur tanpa kekangan. Selain itu dilihat dari kurva histeresis yang dihasilkan pada Gambar 5.22, struktur dengan kekangan memiliki luasan atau disipasi yang lebih besar. Untuk lebih detail

nilai disipasi yang dihasilkan pada struktur dapat dilihat pada gambar 5.24 yang menunjukkan perbedaan luasan disipasi struktur yang terjadi sebesar 10%.



Gambar 5. 23 Perbandingan Kurva Histeresis Antara Struktur Dengan dan Tanpa Kekangan

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Setelah menganalisis dan mengevaluasi struktur dengan isolasi seismik LRB dan FPB, dapat disimpulkan:

1. Struktur dengan isolasi gempa menggunakan FPB mengalami respon struktur yang baik dari parameter *displacement*, gaya geser dasar dan simpangan dibandingkan dengan LRB.
2. Berdasarkan parameter kerusakan sendi plastis struktur dengan isolasi gempa menggunakan FPB mengalami kerusakan lebih ringan dibandingkan LRB dilihat dari *displacement* dan gaya geser struktur. Untuk posisi tingkat kerusakan yang terjadi pada kedua sistem isolasi seismik baik LRB maupun FPB masih pada *range* sesuai dengan kinerja struktur berdasarkan ATC-40.
3. Level kinerja struktur dengan menggunakan isolasi seismik memiliki simpangan 25% lebih kecil dibandingkan dengan LRB sedangkan gaya geser yang dihasilkan perbedaannya sekitar 2-3 %.
4. Struktur dengan menggunakan sistem isolasi gempa FPB akan lebih efisien dibandingkan dengan LRB jika ditinjau dari dissipasi energi dan daktilitas yang dihasilkan. Struktur dengan menggunakan isolasi gempa FPB lebih daktil dibandingkan LRB, perbedaan antara keduanya sebesar 40%. Struktur dengan menggunakan sistem isolasi gempa FPB memiliki energi dissipasi lebih besar 2-3% dibandingkan dengan LRB.
5. Ukuran isolator gempa baik LRB maupun FPB berpengaruh pada kemampuan penyerapan gempa pada struktur, semakin besar dimensinya maka isolasi gempa dapat menyerap gaya gempa lebih besar.
6. Pada analisa *confinement effect* yang dimodelkan dengan program elemen hingga mempengaruhi terhadap keruntuhan akibat tekan dan tarik yang terjadi. Pada struktur dengan kekangan mengalami kerusakan lebih ringan dibandingkan tanpa kekangan. Selain itu kekangan pada beton juga dipengaruhi oleh jarak sengkang yang digunakan, semakin dekat jarak

senggang maka semakin besar kemampuan elemen struktur menerima beban aksial.

6.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan yaitu

1. Perlu adanya studi terhadap isolator gempa dengan memodelkan isolator pada ABAQUS sehingga dapat dilihat perilaku dan kerusakan lebih detail pada struktur.
2. Untuk model (ABAQUS) selanjutnya diharapkan user dapat mengembangkan model konstitutif beton dalam *material properties* dimana respon tegangan regangan beton sudah memperhitungkan *size effect* dari *mesh* sehingga perubahan ukuran mesh tidak akan mempengaruhi hasil pada model.
3. Perlu diperhatikan dalam pemodelan di SAP2000 pada momen kurvatur yang dihasilkan karena pada SAP2000 momen kurvatur yang terjadi tidak mengalami penurunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aviram, A et al (2012) *Seismic Design and Performance of Two Isolation Systems Used for Reinforced Concrete Bridge Construction*. 15 WCEE LISBOA 2012.
- Becker, Tracy Celeste (2001). *Advanced Modeling of the Performance of Structures Supported on Triple Friction Pendulum Bearings*. UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations.
- Budiono. B dan Adelia.C (2015) *Penggunaan Isolasi Dasar Single Friction Pendulum dan Triple Friction Pendulum pada Bangunan Beton Bertulang*, Jurnal Teknik Sipil, Vol. 22 No.2
- Budiono. B dan Setiawan. A (2014) *Studi Komparasi Isolasi Dasar High-Damping Rubber Bearing dan Friction Pendulum System pada Bangunan Beton Bertulang*, Jurnal Teknik Sipil, Vol 21 No.3
- Dewobroto, Wiryanto (2005) *Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover*. Civil Engineering National Conference : Sustainability Construction & Structural Engineering Based on Professionalism – Unika Soegijapranata, Semarang 17-18 Juni 2005
- Dezfuli, F. Hidayati & ALam, M. Shaharia (2014) *Performance-based assessment and design of FRP-based high damping rubber bearing incorporated with shape memory alloy wires*, Engineering Structures (2014) 166-183.
- El-Bayoumi. K (2015) *Modelling of Triple Friction Pendulum Bearing in SAP2000*, International Journal of Advances in Engineering & Technology (IJEAT)
- Eroz, Murat & DesRoches, Reginald (2013) *The influence of design parameters on the response of bridges seismically isolated with the Friction Pendulum System (FPB)*, Engineering Structures (2013) 585-599.
- FEMA-356. (2000). *Pre-standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Report No. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

- Feng, Maria Q & Chu, Don (1996) *Comparative Assessment of Seismic Isolation Devices Using Matsunohama Viaduct*. Engineering Structure, Paper No 962.
- Irawan, Djoko (2017) *Model Sambungan Antar Pelat Beton Pracetak Pada Sistem Half Slab Precast Dua Arah*. Doctoral thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kmiecik. P dan Kaminski. M (2011) *Modelling of Reinforced Concrete Structures and Composite Structures with Concrete Strength Defradation Taken into Consideration*, Archieves of Civil and Mechanical Engineering Vol. x! No. 3
- Kravchuk. N, Coloquhoun. R dan Probaha. A(2008) *Development of a Friction Pendulum Bearing Base Isolation System for Earthquake Engineering Education*, Proceedings of the 2008 American Society for Engineering Education Pacific Southwest Annual.
- Muliadi, et al (2016). *Analisis Gaya Geser Pada Bangunan Menggunakan Base Isolator Sebagai Pereduksi Beban Gempa*. Teras Jurnal, Vol. 6 No. 1
- Pavlovic. M, Markovic. Z, Veljkovic. M dan Budevac. D (2013) *Bolted shear connectors vc. headed stud behavior in push-out tests*, Journal of Constructional Steel Research 88 134-149
- RL Mayes, F Naeim (2001). *The seismic design handbook*. California: Springer
- Sarlis. A.A.S dan Constantinou, M.C (2010) *Modelling Triple Friction Pendulum Isolators in Program SAP2000*, Departement of Civil, Structural and Environmental Engineering , University at Buffalo
- Setio, et al (2012) *Pengembangan Sistem Isolasi Seismik pada Struktur Bangunan yang Dikenai Beban Gempa sebagai Solusi untuk Membatasi Respon Struktur*. Jurnal Teknik Sipil, Vol. 19 No. 1
- Standar SNI 1725-2016., “*Standar Pembebanan untuk Jembatan*” Badan Standarisasi Nasional, 2015
- Standar SNI 1726-2012., “*Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung*”, Badan Standarisasi Nasional, 2012
- Standar SNI 1727-2013., “*Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung dan Bangunan Lain*” Badan Standarisasi Nasional, 2015

- Standar SNI 1729-2015., “*Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung*” Badan Standarisasi Nasional, 2015
- Standar SNI 2833-2016., “*Perancangan Jembatan Terhadap Beban Gempa*” Badan Standarisasi Nasional, 2015
- Syah, Citra Bahrin (2015), *Modifikasi Perancangan Jembatan Trisula Menggunakan Busur Rangka Baja Dengan Dilengkapi Damper Pada Zona Gempa 4*, Skripsi pada Institut Teknologi Sepuluh Nopember.: Surabaya
- Tambusay.A, Suprobo. P dan Suryanto. B (2018) *Visulaization of Shear Crack in a Reinforced Concrete Beam using the Digital Image Correlation*
- Teruna, Daniel Rumbi, and Hendrik Singarimbun. 2010. "Analisis Response Bangunan ICT Universitas Syiah Kuala Yang Memakai *Slider* Isolator Akibat Gaya Gempa." *Perkembangan dan Kemajuan Konstruksi Indonesia*. Jakarta: Seminar dan Pameran HAKI.
- Torunbalci, Necdet (2004) *Sismic Isolation and Energy Dissipating Systems in Earthquake Resistant Design*. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 3273.

2. LRB (Pier dan Pondasi)

LRB Tipe 1

Drift (m)	Gaya Geser (ton)	Mekanisme Sendi Plastis								Total
		A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	
-1.88E-17	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10
0.049886	31.7666	10	0	0	0	0	0	0	0	10
0.099881	63.6021	10	0	0	0	0	0	0	0	10
0.137448	87.5245	9	1	0	0	0	0	0	0	10
0.183	89.551	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.187449	89.7542	9	1	0	0	0	0	0	0	10
0.237448	91.9839	9	0	1	0	0	0	0	0	10
0.287448	94.2136	7	2	1	0	0	0	0	0	10
0.337448	96.4326	7	2	1	0	0	0	0	0	10
0.387448	98.6514	7	2	1	0	0	0	0	0	10
0.437448	100.8701	7	2	1	0	0	0	0	0	10
0.487448	103.0888	5	3	1	1	0	0	0	0	10
0.534009	105.0294	5	0	4	0	0	1	0	0	10
0.534019	26.372	5	0	4	0	0	0	1	0	10
0.584019	26.4569	5	0	4	0	0	0	1	0	10
0.626316	26.5287	5	0	4	0	0	0	0	1	10
0.626326	21.2315	5	0	4	0	0	0	0	1	10
0.676326	21.4248	5	0	4	0	0	0	0	1	10
0.726326	21.618	5	0	4	0	0	0	0	1	10
0.776326	21.8112	5	0	4	0	0	0	0	1	10
0.826326	22.0045	5	0	4	0	0	0	0	1	10
0.876326	22.1977	5	0	4	0	0	0	0	1	10
0.926326	22.3909	5	0	4	0	0	0	0	1	10
0.976326	22.5842	5	0	4	0	0	0	0	1	10
0.999882	22.6752	5	0	4	0	0	0	0	1	10

LRB Tipe 2

Step	Drift (m)	Gaya Geser (ton)	Mekanisme Sendi Plastis								Total
			A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	
0	1.59E-17	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10
1	0.049857	31.7478	10	0	0	0	0	0	0	0	10
2	0.096659	61.5504	10	0	0	0	0	0	0	0	10
3	0.134022	85.3429	10	0	0	0	0	0	0	0	10
4	0.137027	87.2561	9	1	0	0	0	0	0	0	10
X	0.18	89.189	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.184429	89.3642	9	1	0	0	0	0	0	0	10
6	0.229891	91.3858	9	0	1	0	0	0	0	0	10
7	0.275451	93.4117	7	2	1	0	0	0	0	0	10
8	0.325425	95.6232	7	2	1	0	0	0	0	0	10
9	0.374423	97.7914	7	2	1	0	0	0	0	0	10
10	0.423626	99.9686	7	2	1	0	0	0	0	0	10
11	0.468667	101.9615	5	4	1	0	0	0	0	0	10
12	0.518809	104.0485	5	0	4	1	0	0	0	0	10
13	0.533822	104.7077	5	0	4	0	0	1	0	0	10
14	0.528571	26.2817	5	0	4	0	0	0	1	0	10
15	0.578571	26.3663	5	0	4	0	0	0	1	0	10
16	0.626555	26.4475	5	0	4	0	0	0	0	1	10
17	0.626565	21.1665	5	0	4	0	0	0	0	1	10
18	0.676565	21.3595	5	0	4	0	0	0	0	1	10
19	0.726565	21.5525	5	0	4	0	0	0	0	1	10
20	0.776565	21.7456	5	0	4	0	0	0	0	1	10
21	0.826565	21.9386	5	0	4	0	0	0	0	1	10
22	0.876565	22.1316	5	0	4	0	0	0	0	1	10
23	0.926565	22.3246	5	0	4	0	0	0	0	1	10
24	0.969333	22.4897	5	0	4	0	0	0	0	1	10

LRB Tipe 3

Step	Drift (m)	Gaya Geser (ton)	Mekanisme Sendi Plastis								Total
			A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	
0	1.77E-17	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10
1	0.049811	31.7186	10	0	0	0	0	0	0	0	10
2	0.096614	61.5221	10	0	0	0	0	0	0	0	10
3	0.134019	85.3405	10	0	0	0	0	0	0	0	10
4	0.136235	86.94738	9	1	0	0	0	0	0	0	10
X	0.178	89.086	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.184431	89.364	9	1	0	0	0	0	0	0	10
6	0.229892	91.3855	9	0	1	0	0	0	0	0	10
7	0.275453	93.4115	7	2	1	0	0	0	0	0	10
8	0.325427	95.623	7	2	1	0	0	0	0	0	10
9	0.374425	97.7912	7	2	1	0	0	0	0	0	10
10	0.423628	99.9683	7	2	1	0	0	0	0	0	10
11	0.468669	101.9612	5	4	1	0	0	0	0	0	10
12	0.51881	104.0482	5	0	4	1	0	0	0	0	10
13	0.533821	104.7073	5	0	4	0	0	1	0	0	10
14	0.528571	26.2816	5	0	4	0	0	0	1	0	10
15	0.578571	26.3662	5	0	4	0	0	0	1	0	10
16	0.626555	26.4474	5	0	4	0	0	0	0	1	10
17	0.626565	21.1664	5	0	4	0	0	0	0	1	10
18	0.676565	21.3594	5	0	4	0	0	0	0	1	10
19	0.726565	21.5525	5	0	4	0	0	0	0	1	10
20	0.776565	21.7455	5	0	4	0	0	0	0	1	10
21	0.826565	21.9385	5	0	4	0	0	0	0	1	10
22	0.876565	22.1315	5	0	4	0	0	0	0	1	10
23	0.926565	22.3245	5	0	4	0	0	0	0	1	10
24	0.969286	22.4895	5	0	4	0	0	0	0	1	10

ISOLATOR BEARING CALCULATION - LEAD RUBBER BEARING

• General Structural Information:

$W_{SS} = 4154.01$ kN (Weight of superstructure including permanent loads) $g = 9810$ mm/s²
 $W_{PP} = 768.00$ kN (Participating weight of piers) $S_{D1} = 0.75$ g
 $W_{eff} = 4922.01$ kN (Effective weight for calculation of period) $n = 8$ Pcs

1. CALCULATION FOR LONGITUDINAL EARTHQUAKE

• First Assumption :

B1.1 $d = 267.42$ mm (Assumed displacement for starting the calculation)
 $Q_d = 640.00$ kN (Characteristic Strength of the whole structure)
 $K_d = 3.44$ kN/mm (Post-yield stiffness of the whole structure)

• Step by Step Calculation :

Step	A1	B1.2	B1.2	A1	B1.3	B1.3	B1.5	B1.6	B1.7	B1.8	B1.10	B1.10
Position	W_j	$Q_{d,j}$	$K_{d,j}$	$K_{sub,j}$	α_j	$K_{eff,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$d_{sub,j}$	$F_{sub,j}$	$Q_{d,j} d_{iso,j}$	$\frac{K_{eff,j}}{(d_{iso,j} + d_{sub,j})^2}$
Abut 1	4154.01	640.00	3.44	8.26	0.9935	4.12	134.14	8.21	133.28	1101.46	85852.16	294551.30
Pier 1	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	267.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pier 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	267.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abut 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	267.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4154.01	640.00	3.44		$\sum K_{eff,j}$	4.12				1101.46	85852.16	294551.30
B1.10	$T_{eff} = 2.193$ sec		(Effective period)									
	$\xi = 0.186$		(Equivalent viscous damping ratio)									
B1.11	$B_L = 1.482$		(Damping factor)									
	$d = 275.77$ mm		(Displacement)								Iteration Target = 1.031	

• Isolator Summary at Seismic Displacement - Single Seismic Load Case :

Position	$Q_{d,j}$	$K_{d,j}$	$d_{sub,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$F_{EQ,Long}$	ξ_{EQ}
Abut 1	80.00	0.43	133.28	134.14	1.03	137.68	0.370
Pier 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Pier 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Abut 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000

2. CALCULATION FOR TRANSVERSAL EARTHQUAKE

• First Assumption :

B1.1 $d = 267.32$ mm (Assumed displacement for starting the calculation)
 $Q_d = 640.00$ kN (Characteristic Strength of the whole structure)
 $K_d = 3.44$ kN/mm (Post-yield stiffness of the whole structure)

• Step by Step Calculation :

Step	A1	B1.2	B1.2	A1	B1.3	B1.3	B1.5	B1.6	B1.7	B1.8	B1.10	B1.10
Position	W_j	$Q_{d,j}$	$K_{d,j}$	$K_{sub,j}$	α_j	$K_{eff,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$d_{sub,j}$	$F_{sub,j}$	$Q_{d,j} d_{iso,j}$	$\frac{K_{eff,j}}{(d_{iso,j} + d_{sub,j})^2}$
Abut 1	4154.01	640.00	3.44	8.26	0.9938	4.12	134.07	8.21	133.25	1101.21	85806.97	294376.22
Pier 1	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	267.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pier 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	267.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abut 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	267.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4154.01	640.00	3.44		$\sum K_{eff,j}$	4.12				1101.21	85806.97	294376.22
B1.10	$T_{eff} = 2.193$ sec		(Effective period)									
	$\xi = 0.186$		(Equivalent viscous damping ratio)									
B1.11	$B_L = 1.482$		(Damping factor)									
	$d = 275.75$ mm		(Displacement)								Iteration Target = 1.032	

• Isolator Summary at Seismic Displacement - Single Seismic Load Case :

Position	$Q_{d,j}$	$K_{d,j}$	$d_{sub,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$F_{EQ,Long}$	ξ_{EQ}
Abut 1	80.00	0.43	133.25	134.07	1.03	137.65	0.370
Pier 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Pier 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Abut 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000

3. ISOLATOR DESIGN DISPLACEMENT - ORTHOGONAL COMBINATION RULE

$$\begin{aligned}
 u_L &= (\text{Longitudinal displacement due to Longitudinal EQ}) & u_1 &= (u_L + 0.3u_T) \\
 v_L &= (\text{Transversal displacement due to Longitudinal EQ}) & v_1 &= (v_L + 0.3v_T) \\
 u_T &= (\text{Longitudinal displacement due to Transversal EQ}) & u_2 &= (0.3u_L + u_T) \\
 v_T &= (\text{Transversal displacement due to Transversal EQ}) & v_2 &= (0.3v_L + v_T) \\
 R_1 &= (u_1^2 + v_1^2)^{0.5} & R_2 &= (u_2^2 + v_2^2)^{0.5} \\
 d_i &= (\text{Total Design Displacement} = \max [R1,R2])
 \end{aligned}$$

ISOLATOR BEARING CALCULATION - LEAD RUBBER BEARING

● General Structural Information:

$W_{SS} = 4154.01$ kN (Weight of superstructure including permanent loads) $g = 9810$ mm/s²
 $W_{PP} = 768.00$ kN (Participating weight of piers) $S_{D1} = 0.75$ g
 $W_{eff} = 4922.01$ kN (Effective weight for calculation of period) $n = 8$ Pcs

1. CALCULATION FOR LONGITUDINAL EARTHQUAKE

● First Assumption :

B1.1 $d = 315.00$ mm (Assumed displacement for starting the calculation)
 $Q_d = 640.00$ kN (Characteristic Strength of the whole structure)
 $K_d = 0.44$ kN/mm (Post-yield stiffness of the whole structure)

● Step by Step Calculation :

Step	A1	B1.2	B1.2	A1	B1.3	B1.3	B1.5	B1.6	B1.7	B1.8	B1.10	B1.10
Position	W_j	Q_{dj}	K_{dj}	$K_{sub,j}$	α_j	$K_{eff,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$d_{sub,j}$	$F_{sub,j}$	$Q_{dj} d_{iso,j}$	$\frac{K_{eff,j}}{(d_{iso,j} + d_{sub,j})^2}$
Abut 1	4154.01	640.00	0.44	8.26	0.3970	2.35	225.49	3.28	89.51	739.76	144313.25	233023.31
Pier 1	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	315.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pier 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	315.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abut 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	315.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4154.01	640.00	0.44		$\sum K_{eff,j}$	2.35				739.76	144313.25	233023.31
B1.10	$T_{eff} = 2.904$ sec		(Effective period)									
	$\xi = 0.394$		(Equivalent viscous damping ratio)									
B1.11	$B_L = 1.700$		(Damping factor)									
	$d = 318.38$ mm		(Displacement)									Iteration Target = 1.011

● Isolator Summary at Seismic Displacement - Single Seismic Load Case :

Position	Q_{dj}	K_{dj}	$d_{sub,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$F_{EQ,Long}$	ξ_{EQ}
Abut 1	80.00	0.06	89.51	225.49	0.41	92.47	0.551
Pier 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Pier 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Abut 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000

2. CALCULATION FOR TRANSVERSAL EARTHQUAKE

● First Assumption :

B1.1 $d = 315.00$ mm (Assumed displacement for starting the calculation)
 $Q_d = 640.00$ kN (Characteristic Strength of the whole structure)
 $K_d = 0.44$ kN/mm (Post-yield stiffness of the whole structure)

● Step by Step Calculation :

Step	A1	B1.2	B1.2	A1	B1.3	B1.3	B1.5	B1.6	B1.7	B1.8	B1.10	B1.10
Position	W_j	Q_{dj}	K_{dj}	$K_{sub,j}$	α_j	$K_{eff,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$d_{sub,j}$	$F_{sub,j}$	$Q_{dj} d_{iso,j}$	$\frac{K_{eff,j}}{(d_{iso,j} + d_{sub,j})^2}$
Abut 1	4154.01	640.00	0.44	8.26	0.3970	2.35	225.49	3.28	89.51	739.76	144313.25	233023.31
Pier 1	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	315.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pier 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	315.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abut 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	315.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4154.01	640.00	0.44		$\sum K_{eff,j}$	2.35				739.76	144313.25	233023.31
B1.10	$T_{eff} = 2.904$ sec		(Effective period)									
	$\xi = 0.394$		(Equivalent viscous damping ratio)									
B1.11	$B_L = 1.700$		(Damping factor)									
	$d = 318.38$ mm		(Displacement)									Iteration Target = 1.011

● Isolator Summary at Seismic Displacement - Single Seismic Load Case :

Position	Q_{dj}	K_{dj}	$d_{sub,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$F_{EQ,Long}$	ξ_{EQ}
Abut 1	80.00	0.06	89.51	225.49	0.41	92.47	0.551
Pier 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Pier 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Abut 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000

3. ISOLATOR DESIGN DISPLACEMENT - ORTHOGONAL COMBINATION RULE

$u_L =$ (Longitudinal displacement due to Longitudinal EQ) $u_1 = (u_L + 0.3u_T)$
 $v_L =$ (Transversal displacement due to Longitudinal EQ) $v_1 = (v_L + 0.3v_T)$
 $u_T =$ (Longitudinal displacement due to Transversal EQ) $u_2 = (0.3u_L + u_T)$
 $v_T =$ (Transversal displacement due to Transversal EQ) $v_2 = (0.3v_L + v_T)$
 $R_1 = (u_1^2 + v_1^2)^{0.5}$ $R_2 = (u_2^2 + v_2^2)^{0.5}$
 $d_t =$ (Total Design Displacement = max [R1,R2])

ISOLATOR BEARING CALCULATION - LEAD RUBBER BEARING

● General Structural Information:

$W_{SS} = 4154.01$ kN (Weight of superstructure including permanent loads)	$g = 9810$ mm/s ²
$W_{PP} = 768.00$ kN (Participating weight of piers)	$S_{D1} = 0.75$ g
$W_{eff} = 4922.01$ kN (Effective weight for calculation of period)	$n = 8$ Pcs

1. CALCULATION FOR LONGITUDINAL EARTHQUAKE

● First Assumption :

B1.1	$d = 275.00$ mm (Assumed displacement for starting the calculation)
	$Q_d = 640.00$ kN (Characteristic Strength of the whole structure)
	$K_d = 2.52$ kN/mm (Post-yield stiffness of the whole structure)

● Step by Step Calculation :

Step	A1	B1.2	B1.2	A1	B1.3	B1.3	B1.5	B1.6	B1.7	B1.8	B1.10	B1.10
Position	W_j	$Q_{d,j}$	$K_{d,j}$	$K_{sub,j}$	α_j	$K_{eff,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$d_{sub,j}$	$F_{sub,j}$	$Q_{d,j} d_{iso,j}$	$K_{eff,j} (d_{iso,j} + d_{sub,j})^2$
Abut 1	4154.01	640.00	2.52	8.26	0.8164	3.71	151.40	6.75	123.60	1021.52	96893.60	280917.60
Pier 1	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	275.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pier 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	275.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abut 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	275.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4154.01	640.00	2.52		$\sum K_{eff,j}$	3.71				1021.52	96893.60	280917.60
B1.10	$T_{eff} = 2.309$ sec (Effective period)											
	$\xi = 0.220$ (Equivalent viscous damping ratio)											
B1.11	$B_L = 1.559$ (Damping factor)											
	$d = 276.08$ mm (Displacement)											
Iteration Target = 1.004												

● Isolator Summary at Seismic Displacement - Single Seismic Load Case :

Position	$Q_{d,j}$	$K_{d,j}$	$d_{sub,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$F_{EQ,Long}$	ξ_{EQ}
Abut 1	80.00	0.32	123.60	151.40	0.84	127.69	0.399
Pier 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Pier 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Abut 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000

2. CALCULATION FOR TRANSVERSAL EARTHQUAKE

● First Assumption :

B1.1	$d = 273.00$ mm (Assumed displacement for starting the calculation)
	$Q_d = 640.00$ kN (Characteristic Strength of the whole structure)
	$K_d = 2.52$ kN/mm (Post-yield stiffness of the whole structure)

● Step by Step Calculation :

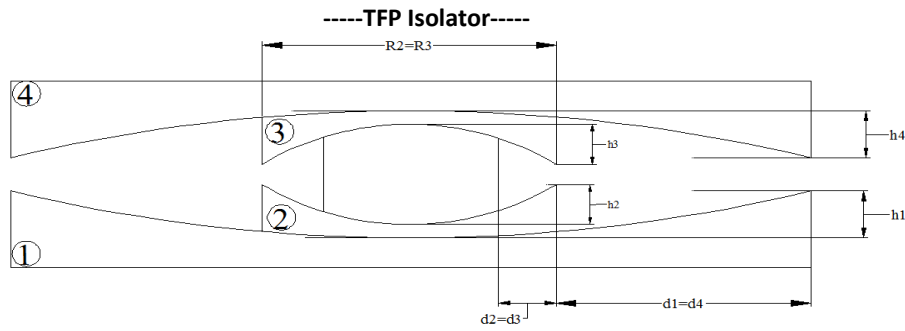
Step	A1	B1.2	B1.2	A1	B1.3	B1.3	B1.5	B1.6	B1.7	B1.8	B1.10	B1.10
Position	W_j	$Q_{d,j}$	$K_{d,j}$	$K_{sub,j}$	α_j	$K_{eff,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$d_{sub,j}$	$F_{sub,j}$	$Q_{d,j} d_{iso,j}$	$K_{eff,j} (d_{iso,j} + d_{sub,j})^2$
Abut 1	4154.01	640.00	2.52	8.26	0.8217	3.73	149.86	6.79	123.14	1017.66	95912.70	277820.16
Pier 1	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	273.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pier 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	273.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Abut 2	0.00	0.00	0.00	10000.00	0.0000	0.00	273.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	4154.01	640.00	2.52		$\sum K_{eff,j}$	3.73				1017.66	95912.70	277820.16
B1.10	$T_{eff} = 2.305$ sec (Effective period)											
	$\xi = 0.220$ (Equivalent viscous damping ratio)											
B1.11	$B_L = 1.559$ (Damping factor)											
	$d = 275.53$ mm (Displacement)											
Iteration Target = 1.009												

● Isolator Summary at Seismic Displacement - Single Seismic Load Case :

Position	$Q_{d,j}$	$K_{d,j}$	$d_{sub,j}$	$d_{iso,j}$	$K_{iso,j}$	$F_{EQ,Long}$	ξ_{EQ}
Abut 1	80.00	0.32	123.14	149.86	0.85	127.21	0.400
Pier 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Pier 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
Abut 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000

3. ISOLATOR DESIGN DISPLACEMENT - ORTHOGONAL COMBINATION RULE

$u_L =$ (Longitudinal displacement due to Longitudinal EQ)	$u_1 = (u_L + 0.3u_T)$
$v_L =$ (Transversal displacement due to Longitudinal EQ)	$v_1 = (v_L + 0.3v_T)$
$u_T =$ (Longitudinal displacement due to Transversal EQ)	$u_2 = (0.3u_L + u_T)$
$v_T =$ (Transversal displacement due to Transversal EQ)	$v_2 = (0.3v_L + v_T)$
$R_1 = (u_1^2 + v_1^2)^{0.5}$	$R_2 = (u_2^2 + v_2^2)^{0.5}$
$d_t =$ (Total Design Displacement = max [R1,R2])	



Gaya vertikal yg diasumsikan = **450** ton

1 Ukuran FPS

R1=R4	=	2235 mm	h1=h4	=	102 mm
R2=R3	=	406 mm	h2=h3	=	76 mm
d1=d4	=	356.05 mm	d2=d3	=	51.06 mm
R1 eff= R4 eff	=	2133 mm			
R2 eff=R3 eff	=	330 mm			
d1* = d4*	=	339.8 mm	Actual disp capacity		
d2* = d3*	=	41.5 mm	Actual disp capacity		

2 Menghitung kemampuan geser bearing

Tekanan Bearing pada permukaan 1 dan 4

P	=	0.003441932 t/mm ²	=	4.8957 ksi
3 cycle friction μ	=	0.122	-	0.01 P = 0.073 [1] Constantinou, M.C., Whittak
Penyesuaian untuk kecepatan yang tinggi -				0.015 = 0.058 (lower bound friction)
1st cycle friction μ	=	0.070		
Lower bound $\mu_1=\mu_4$	=	0.058		
Upper bound $\mu_1=\mu_4$	=	0.070		1422.36

Tekanan Bearing pada permukaan 2 dan 3

P	=	0.0062 t/mm ²	=	8.818 ksi
3 cycle friction μ	=	0.122	-	0.01 P = 0.034
Penyesuaian untuk kecepatan yang tinggi -				0.005 = 0.029 (lower bound friction)
1st cycle friction μ	=	0.035		
Lower bound $\mu_2=\mu_3$	=	0.029		
Upper bound $\mu_2=\mu_3$	=	0.035		

μ = gaya pada perpindahan 0 dibagi dengan beban normal

$\mu = \mu_1 - ((\mu_1 - \mu_2) * R2_{eff} / R1_{eff})$

Lower bound μ	=	0.05352
Upper bound μ	=	0.06423

Geometric Properties			Frictional Properties	
R1 eff= R4 eff	mm	2133	Lower bound $\mu_1=\mu_4$	0.058
R2 eff=R3 eff	mm	330	Lower bound $\mu_2=\mu_3$	0.029
d1* = d4*	mm	339.8	Lower bound μ	0.05352
d2* = d3*	mm	41.5	Upper bound $\mu_1=\mu_4$	0.070
			Upper bound $\mu_2=\mu_3$	0.035
			Upper bound μ	0.06423

3 Menghitung D_D (Upper bound analysis)

Sd	μ	μ_1	D_y	Fd1	W	#bearing
0.228	0.064	0.070	0.011574	0.069794254	450	8
			Σ	251.2593137	3600	

- 1 $D_D = 0.315$ m
- 2 Effective stiffness : $Q_d = \mu \cdot \Sigma W = 231.21$
 $K_d = \Sigma F_D / D_D = 797.65$
 $K_{eff} = K_D + Q_d / D_D = 1531.660154$
- 3 Effective period : (Eq 17.5-2, ASCE 7-10)

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma W}{(K_{eff})(g)}} = 3.07707$$

- 4 Effective damping : (Eq 17.8-7, ASCE 7-10)

$$\beta_D = \frac{E}{2\pi K_{eff} D_D^2} = \frac{4\mu \Sigma W (D_D - D_y)}{2\pi K_{eff} D_D^2} = 0.29388$$

- 5 Damping reduction factor :

$$\beta = \left(\frac{\beta_{eff}}{0.05}\right)^{0.3} = 1.701210303$$

$$D'_D = \frac{S_{D1} \cdot T_{eff}^2}{4\pi^2 \cdot \beta} g = 0.3150$$

-----Menghitung link/ support property data (upper bound) dengan SAP2000-----

A Main Properties

- 1 Determination of bearing (rotational inertia 1):

diameter isolator	=	0.305	m	E	=	10000000
tinggi	=	0.32	m	(Tinggi total bearing)		
Luas	=	0.0731	m ²			

$$K_{eff} = \frac{W}{R_{1eff}} + \frac{\mu W}{D_D} = 302.7 \text{ ton/m}$$

$$I = \frac{K_{eff} \cdot h^3}{12E} = 8.26633E-08 \text{ m}^4$$

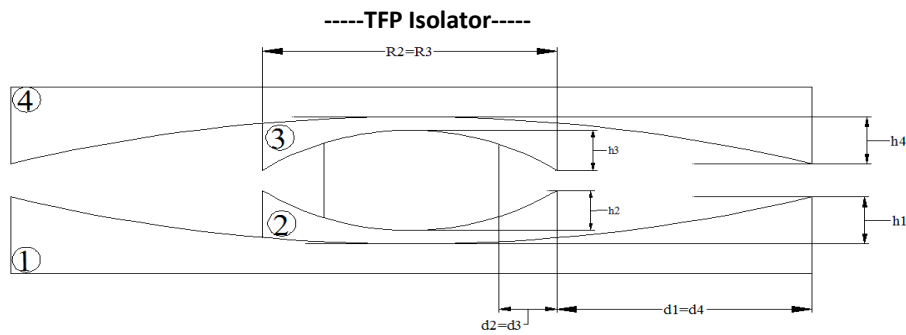
- 2 Determination Bearing Mass

Determination of Bearing Diameter

D_{m-max}	=	0.315	m
$D_{TM} = 1.15 \cdot D_{m-max}$	=	0.36225	m (17.5.3.5, ASCE 7-10)
$D = 2 \cdot D_{TM}$	=	0.7245	m

Standard Bearing Diameters and Weights (Kravchuk et al. 2008)

D	=	0.9144	m	W	=	1	ton
D	=	3.9624	m	W	=	20	ton



Gaya vertikal yg diasumsikan = **450** ton

1 Ukuran FPS

R1=R4	=	3556 mm	h1=h4	=	161 mm
R2=R3	=	647 mm	h2=h3	=	121 mm
d1=d4	=	566.03 mm	d2=d3	=	81.06 mm
R1 eff= R4 eff	=	3395 mm			
R2 eff=R3 eff	=	526 mm			
d1* = d4*	=	540.4 mm	Actual disp capacity		
d2* = d3*	=	65.9 mm	Actual disp capacity		

2 Menghitung kemampuan geser bearing

Tekanan Bearing pada permukaan 1 dan 4

P	=	0.0013815 t/mm ²	=	1.965 ksi
3 cycle friction μ	=	0.122	-	0.01 P = 0.102
Penyesuaian untuk kecepatan yang tinggi -				0.015 = 0.087 (lower bound friction)
1st cycle friction μ	=	0.105		
Lower bound $\mu_1=\mu_4$	=	0.087		
Upper bound $\mu_1=\mu_4$	=	0.105		1422.36

Tekanan Bearing pada permukaan 2 dan 3

P	=	0.0024 t/mm ²	=	3.479 ksi
3 cycle friction μ	=	0.122	-	0.01 P = 0.087 [1] Constantinou, M.C., Whittak
Penyesuaian untuk kecepatan yang tinggi -				0.005 = 0.082 (lower bound friction)
1st cycle friction μ	=	0.099		
Lower bound $\mu_2=\mu_3$	=	0.082		
Upper bound $\mu_2=\mu_3$	=	0.099		

μ = gaya pada perpindahan 0 dibagi dengan beban normal

$\mu = \mu_1 - ((\mu_1 - \mu_2) * R2_{eff} / R1_{eff})$

Lower bound μ	=	0.08655
Upper bound μ	=	0.10386

Geometric Properties		Frictional Properties		
R1 eff= R4 eff	mm	3395	Lower bound $\mu_1=\mu_4$	0.087
R2 eff=R3 eff	mm	526	Lower bound $\mu_2=\mu_3$	0.082
d1* = d4*	mm	540.4	Lower bound μ	0.08655
d2* = d3*	mm	65.9	Upper bound $\mu_1=\mu_4$	0.105
			Upper bound $\mu_2=\mu_3$	0.099
			Upper bound μ	0.10386

3 Menghitung D_D (Upper bound analysis)

Sd	μ	μ_1	Dy	Fd1	W	#bearing
0.363	0.104	0.105	0.003244	0.104911944	450	8
			Σ	377.6829966	3600	

1 $D_D = 0.315$ m

2 Effective stiffness : $Q_d = \mu \cdot \Sigma W = 373.91$
 $K_d = \Sigma F_D / D_D = 1198.99$
 $K_{eff} = K_D + Q_d / D_D = 2386.018324$

3 Effective period : (Eq 17.5-2, ASCE 7-10)
 $T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma W}{(K_{eff})(g)}} = 2.46536$

4 Effective damping : (Eq 17.8-7, ASCE 7-10)
 $\beta_D = \frac{E}{2\pi K_{eff} D_D^2} = \frac{4\mu \Sigma W (D_D - D_y)}{2\pi K_{eff} D_D^2} = 0.31345$

5 Damping reduction factor :
 $\beta = \left(\frac{\beta_{eff}}{0.05}\right)^{0.3} = 1.734443685$
 1.007406

6 $D'_D = \frac{S_{D1} \cdot T_{eff}^2}{4\pi^2 \cdot \beta} g = 0.3158$

-----Menghitung link/ support property data (upper bound) dengan SAP2000-----

A Main Properties

1 Determination of bearing (rotational inertia 1):

diameter isolator = 0.681 m E = 10000000
 tinggi = 0.377 m (Tinggi total bearing)
 Luas = 0.3642 m²

$$K_{eff} = \frac{W}{R_{1eff}} + \frac{\mu W}{D_D} = 280.9 \text{ ton/m}$$

$$I = \frac{K_{eff} \cdot h^3}{12E} = 1.2544E-07 \text{ m}^4$$

2 Determination Bearing Mass

Determination of Bearing Diameter

D_{m-max} = 0.315 m
 $D_{TM} = 1.15 \cdot D_{m-max} = 0.36225 \text{ m}$ (17.5.3.5, ASCE 7-10)
 $D = 2 \cdot D_{TM} = 0.7245 \text{ m}$

Standard Bearing Diameters and Weights (Kravchuk et al. 2008)

D = 0.9144 m W = 1 ton
 D = 3.9624 m W = 20 ton

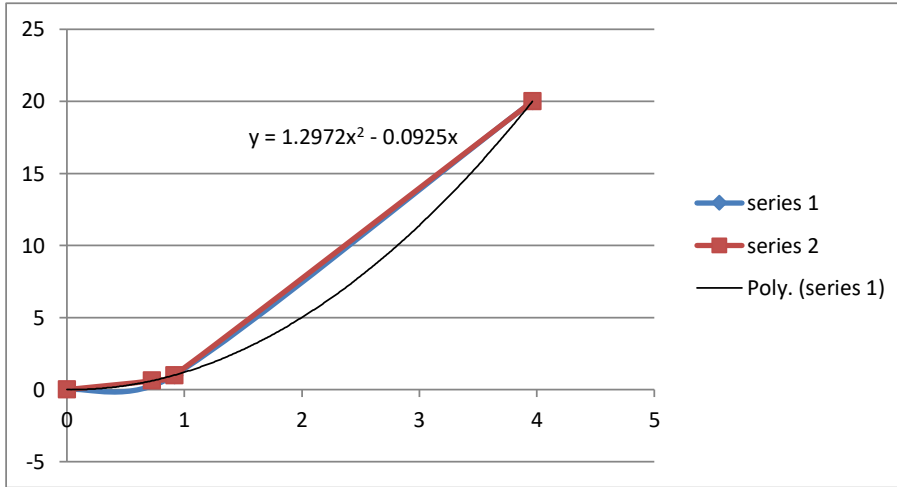
Determination of Bearing Weight/ Mass (by best-fit polynomial curve) -- Nicholas Mars,2013

D = 0.7245 m W = 0.613884 ton
 g = 9.81 m/s² M = 0.062577 ton sec²/m

D	W
0	0
0.9144	1
3.9624	20

D	W
0	0
0.7245	0.61388
0.9144	1
3.9624	20

$$W = 1.2972D^2 - 0.0925D$$



B Directional Properties (U1)

diameter isolator = 0.681 m
 tinggi = 0.377 m
 Luas = 0.3642 m²
 Effective Stiffness = 9661459.885 ton/m
 Effective Damping = 31.34517384 %

C Directional Properties (U2,3)

- Dertermination of linear properties:

Effective stiffness = 373.91
 Effective damping = 31.34517384 %
 h1=h4 = 0.161 m
 h2=h3 = 0.121 m

- Dertermination of nonlinear properties :

Stiffness = $\mu \cdot W / Dy$

$$Dy = (\mu_1 - \mu_2) R_{2eff} = 0.003243772 \text{ m}$$

Stiffnes of outer surface = 14541.4

Stiffnes of inner surface = 13685.9

Friction co. Slaw = μ_1 for outer surface = 0.105

μ_2 for outer surface = 0.099

Friction co. Fast = $2\mu_1$ for outer surface = 0.210

$2\mu_2$ for outer surface = 0.197

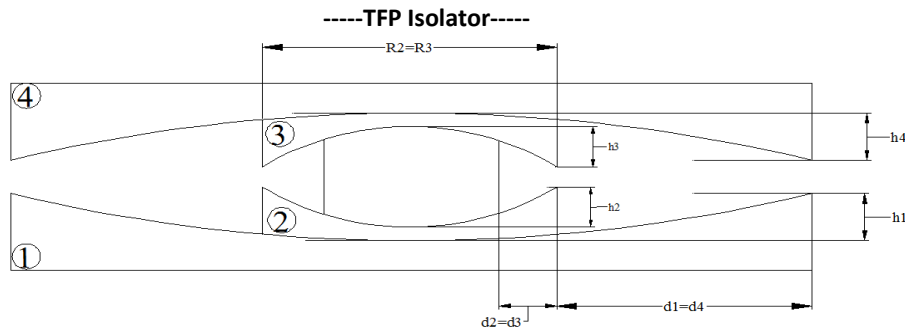
Rate parameter = Friction co. Slaw/ friction co. Fast = 0.5

Radius of sliding surface : For outer = R1 eff = 3.395 m

For inner = R2 eff = 0.526 m

Stop distance : For outer surface $u^{**} = 2Dy + 2d_1^*$ = 1.087288 m

For inner surface = $2Dy$ = 0.006488 m



Gaya vertikal yg diasumsikan = **450** ton

1 Ukuran FPS

R1=R4	=	7264 mm	h1=h4	=	330 mm
R2=R3	=	1321 mm	h2=h3	=	247 mm
d1=d4	=	1156.00 mm	d2=d3	=	37.94 mm
R1 eff= R4 eff	=	6934 mm			
R2 eff=R3 eff	=	1074 mm			
d1* = d4*	=	1103.48 mm	Actual disp capacity		
d2* = d3*	=	30.85 mm	Actual disp capacity		

2 Menghitung kemampuan geser bearing

Tekanan Bearing pada permukaan 1 dan 4

P	=	0.000328833 t/mm ²	=	0.4677 ksi
3 cycle friction μ	=	0.122	-	0.01 P = 0.117
Penyesuaian untuk kecepatan yang tinggi -				0.015 = 0.102 (lower bound friction)
1st cycle friction μ	=	0.123		
Lower bound $\mu_1=\mu_4$	=	0.102		
Upper bound $\mu_1=\mu_4$	=	0.123		1422.36

Tekanan Bearing pada permukaan 2 dan 3

P	=	0.0006 t/mm ²	=	0.835 ksi
3 cycle friction μ	=	0.122	-	0.01 P = 0.114 [1] Constantinou, M.C., Whittak
Penyesuaian untuk kecepatan yang tinggi -				0.005 = 0.109 (lower bound friction)
1st cycle friction μ	=	0.130		
Lower bound $\mu_2=\mu_3$	=	0.109		
Upper bound $\mu_2=\mu_3$	=	0.130		

μ = gaya pada perpindahan 0 dibagi dengan beban normal

$\mu = \mu_1 - ((\mu_1 - \mu_2) * R2_{eff} / R1_{eff})$

Lower bound μ	=	0.10330
Upper bound μ	=	0.12396

Geometric Properties		Frictional Properties		
R1 eff= R4 eff	mm	6934	Lower bound $\mu_1=\mu_4$	0.102
R2 eff=R3 eff	mm	1074	Lower bound $\mu_2=\mu_3$	0.109
d1* = d4*	mm	1103.48	Lower bound μ	0.10330
d2* = d3*	mm	30.85	Upper bound $\mu_1=\mu_4$	0.123
			Upper bound $\mu_2=\mu_3$	0.130
			Upper bound μ	0.12396

3 Menghitung D_D (Upper bound analysis)

Sd	μ	μ_1	Dy	Fd1	W	#bearing
0.435	0.124	0.123	-0.008156	0.122833986	450	8
			Σ	442.2023488	3600	

- 1 $D_D = 0.315$ m
- 2 Effective stiffness : $Q_d = \mu \cdot \Sigma W = 446.27$
 $K_d = \Sigma F_D / D_D = 1403.82$
 $K_{eff} = K_D + Q_d / D_D = 2820.544268$
- 3 Effective period : (Eq 17.5-2, ASCE 7-10)

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma W}{(K_{eff})(g)}} = 2.26752$$

- 4 Effective damping : (Eq 17.8-7, ASCE 7-10)

$$\beta_D = \frac{E}{2\pi K_{eff} D_D^2} = \frac{4\mu \Sigma W (D_D - D_y)}{2\pi K_{eff} D_D^2} = 0.32805$$

- 5 Damping reduction factor :

$$\beta = \left(\frac{\beta_{eff}}{0.05}\right)^{0.3} = 1.758286346$$

$$D'_D = \frac{S_{D1} \cdot T_{eff}^2}{4\pi^2 \cdot \beta} g = 0.3158$$

-----Menghitung link/ support property data (upper bound) dengan SAP2000-----

A Main Properties

- 1 Determination of bearing (rotational inertia 1):

diameter isolator	=	0.485	m	E	=	10000000
tinggi	=	0.45	m	(Tinggi total bearing)		
Luas	=	0.1847	m ²			

$$K_{eff} = \frac{W}{R_{1eff}} + \frac{\mu W}{D_D} = 242.0 \text{ ton/m}$$

0.8
0.502655 2.435065 1.224

$$I = \frac{K_{eff} \cdot h^3}{12E} = 1.8376E-07 \text{ m}^4$$

0.5
0.511311

- 2 Determination Bearing Mass

Determination of Bearing Diameter

D_{m-max}	=	0.315	m
$D_{TM} = 1.15 \cdot D_{m-max}$	=	0.36225	m (17.5.3.5, ASCE 7-10)
$D = 2 \cdot D_{TM}$	=	0.7245	m

Standard Bearing Diameters and Weights (Kravchuk et al. 2008)

D	=	0.9144	m	W	=	1	ton
D	=	3.9624	m	W	=	20	ton

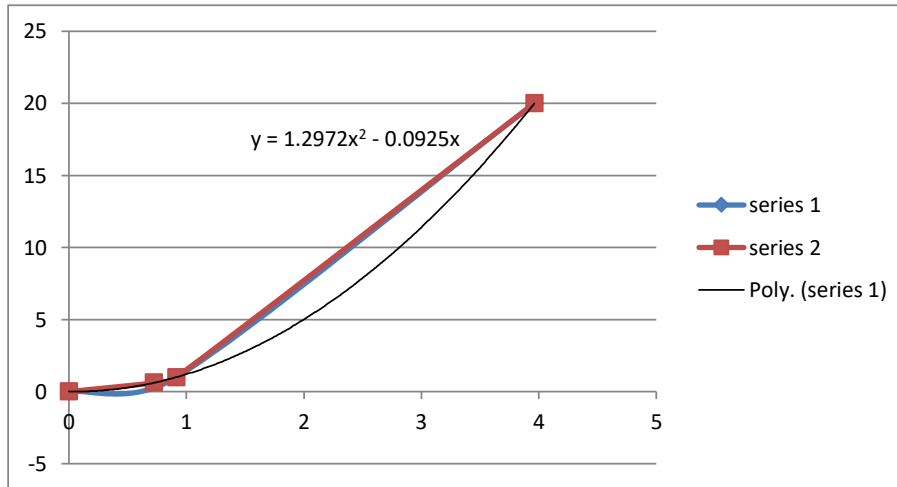
Determination of Bearing Weight/ Mass (by best-fit polynomial curve) -- Nicholas Mars,2013

D = 0.7245 m W = 0.613884 ton
 g = 9.81 m/s² M = **0.062577** ton sec²/m

D	W
0	0
0.9144	1
3.9624	20

D	W
0	0
0.7245	0.61388
0.9144	1
3.9624	20

$$W = 1.2972D^2 - 0.0925D$$



B Directional Properties (U1)

diameter isolator = 0.485 m
 tinggi = 0.45 m
 Luas = 0.184745283 m²
 Effective Stiffness = **4105450.733** ton/m
 Effective Damping = **32.80464558** %

C Directional Properties (U2,3)

- Dertermination of linear properties:

Effective stiffness = **446.27**
 Effective damping = 32.80464558 %
 h₁=h₄ = **0.33** m
 h₂=h₃ = **0.247** m

- Dertermination of nonlinear properties :

Stiffness = $\mu \cdot W / D_y$

$$D_y = (\mu_1 - \mu_2) R_{2eff} = -0.00815616 \text{ m}$$

Stiffnes of outer surface = **6774.55** ton/m

Stiffnes of inner surface = **7193.54** ton/m

Friction co. Slaw = μ_1 for outer surface = 0.123

μ_2 for outer surface = 0.130

Friction co. Fast = $2\mu_1$ for outer surface = 0.246

$2\mu_2$ for outer surface = 0.261

Rate parameter = Friction co. Slaw/ friction co. Fast = 0.5

Radius of sliding surface : For outer = R1 eff = 6.934 m

For inner = R2 eff = 1.074 m

Stop distance : For outer surface u** = $2D_y + 2d_1^*$ = 2.190648 m

For inner surface = $2D_y$ = -0.016312 m

XTRACT Analysis Report -

For use only in an academic or research setting.

Section Name: Section1
Loading Name: MC1
Analysis Type: Moment Curvature

santi
ITS
7/19/2018
Kolom
Thesis
Page __ of __

Section Details:

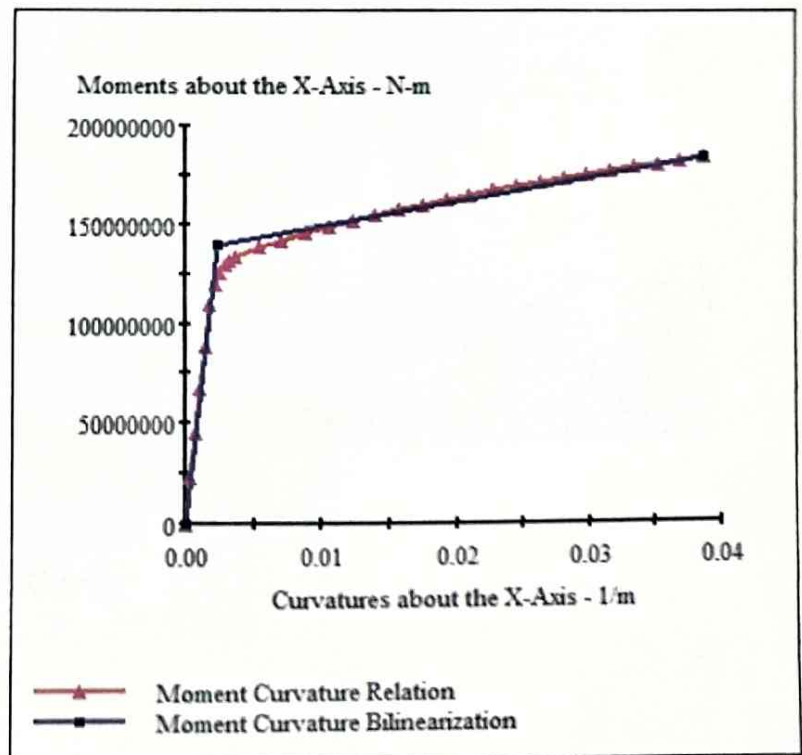
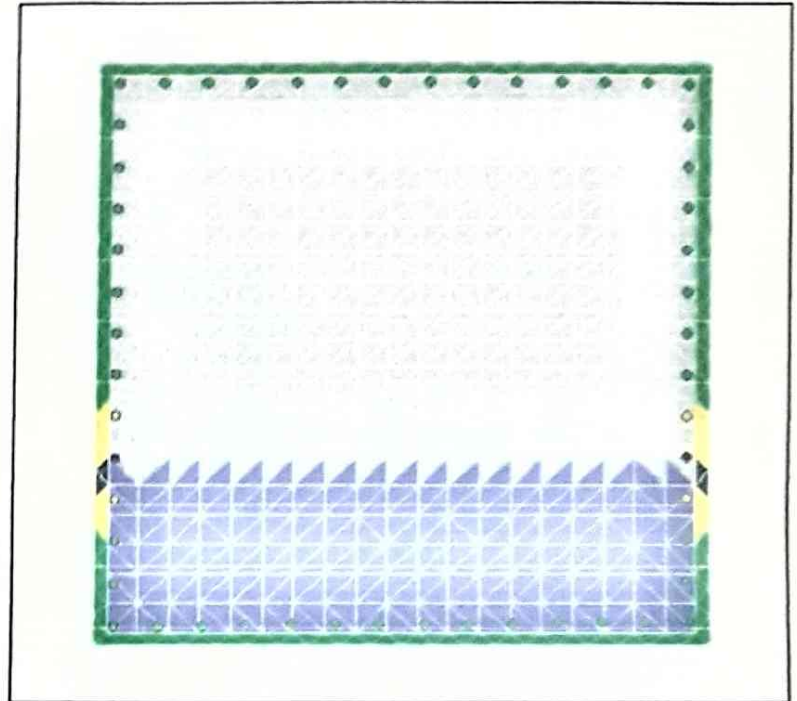
X Centroid: -.1051 mm
Y Centroid: 88.61E-3 mm
Section Area: 4.000E+6 mm²

Loading Details:

Constant Load - P: 7.781E+6 N
Incrementing Loads: Mxx Only
Number of Points: 30
Analysis Strategy: Displacement Control

Analysis Results:

Failing Material: Confined1
Failure Strain: 20.00E-3 Compression
Curvature at Initial Load: .2149E-10 1/m
Curvature at First Yield: 1.851E-3 1/m
Ultimate Curvature: 38.67E-3 1/m
Moment at First Yield: 1.10E+8 N-m
Ultimate Moment: 1.84E+8 N-m
Centroid Strain at Yield: .2469E-3 Ten
Centroid Strain at Ultimate: 15.64E-3 Ten
N.A. at First Yield: 133.4 mm
N.A. at Ultimate: 404.4 mm
Energy per Length: 6.047E+6 N
Effective Yield Curvature: 2.347E-3 1/m
Effective Yield Moment: 1.39E+8 N-m
Over Strength Factor: 1.322
Plastic Rotation Capacity: 36.32E-3 rad
EI Effective: 5.94E+10 N-m²
Yield EI Effective: 1.24E+9 N-m²
Bilinear Harding Slope: 2.081 %
Curvature Ductility: 16.47



BIODATA PENULIS



Santi Nuraini, penulis dilahirkan di Bandung pada tanggal 11 Desember 1992, merupakan anak keempat dari 5 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Radhatul Jannah, SDN Cincin III, SMPN 1 Margahayu, dan SMAN 1 Marghayu. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan program Diploma di Politeknik Negeri Bandung jurusan Teknik Sipil pada tahun 2010. Gelar Ahli Madya (AMd) diperoleh penulis pada tahun 2013 dengan judul “Perbandingan Desain Struktur Atas Pada Beban Gempa di Pusat Massa dan *Joint*” . Pada Tahun 2013 penulis melanjutkan

Sarjana (S1) di Jurusan Teknik Sipil ITS. Gelar Sarjana Teknik (S.T) diperoleh penulis pada tahun 2016 dengan judul Tugas Akhir “Modifikasi Perencanaan Hotel Fave Ketintang Surabaya Dengan Menggunakan Sistem Struktur *Concintrecally Braced Frame* dan *Steel Slit Damper*”. Pada tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang pascasarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan mengambil program studi teknik sipil khususnya bidang keahlian struktur dan mendapatkan beasiswa *fresh graduate*.

Email : santinuraini1992@gmail.com