



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PERILAKU STRUKTUR GEDUNG AKIBAT
PENGARUH GEMPA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN
EFEK *SOIL-STRUCTURE INTERACTION***

SKRIPSI

RYAN RAKHMAT SETIADI

0806329590

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PERILAKU STRUKTUR GEDUNG AKIBAT
PENGARUH GEMPA DENGAN MEMPERTIMBANGKAN
EFEK *SOIL-STRUCTURE INTERACTION***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

RYAN RAKHMAT SETIADI

0806329590

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

KEKHUSUSAN STRUKTUR

DEPOK

JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Ryan Rakhmat Setiadi

NPM : 0806329590

Tanda Tangan : 

Tanggal : 27 Juni 2012

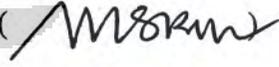
HALAMANAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Ryan Rakhmat Setiadi
NPM : 0806329590
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Studi Perilaku Struktur Gedung Akibat Pengaruh Gempa Dengan Mempertimbangkan Efek Soil-Struktur Interaction

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Sjahril A. Rahim, M.Eng ()
Pembimbing : Ir. Widjojo A. Prakoso, PhD ()
Penguji : Dr. Ir. Yuskar Lase, DEA (K) ()
Penguji : Dr.-Ing. Josia I. Rastandi, ST. MT ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 27 Juni 2012

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMAKASIH

Puji syukur atas limpahan rahmat dari Allah SWT sehingga saya dapat menyelesaikan karya tulis ini tepat waktu. Tidak lupa kita berikan sholawat serta salam kepada nabi besar Muhammad SAW yang telah membimbing kita menuju zaman yang lebih baik ini.

Penulis menyadari bahwa karya tulis ini masih jauh dari sempurna dan masih perlu banyak perbaikan. Teori yang digunakan penulis masih kurang untuk memahami lebih dalam mengenai fenomena SSI. Untungnya banyak pihak yang membantu menulis karya tulis ini. Oleh karenanya saya ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

- 1) Ir. Syahril A. Rahim, M.Eng selaku pembimbing I saya yang telah banyak membantu penyelesaian karya tulis ini. Penulis sangat bersyukur atas ilmu yang diberikan oleh Pak Syahril sehingga dapat membuka ketertarikan saya akan ilmu struktur.
- 2) Ir. Widjojo A. Prakoso, PhD selaku pembimbing II saya yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikirannya untuk membantu saya dalam skripsi ini terutama mengenai aspek geoteknik.
- 3) Dr. Ir. Yuskar Lase, DEA selaku ketua penguji yang telah banyak memberikan masukan yang berharga mengenai karya tulis ini.
- 4) Dr-Ing. Josia I. Rastandi, ST. MT selaku penguji yang memberikan banyak masukan ke dalam karya tulis ini. Penulis menyadari karya tulis ini banyak kekurangan, komentar mengenai teori yang mendalam yang diberikan Pak Josia sangat memberikan pencerahan bagi penulis.
- 5) Kepada Pak Damrizal dan Pak Tommy yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuannya ke penulis.
- 6) Kepada kedua orang tua saya Najamuddin Setia Guna dan Kemala Sari. Semoga ilmu yang saya peroleh ini dapat bermamfaat bagi keluarga, dan semoga ibun cepat sembuh.
- 7) Kepada kakak dan adik saya, yang telah memberikan dukungan moral dan finansial. Aricha Dian Perdana, Puspa Widya Kencana, Bintang Syah Budi,

- A. Raden Puteh, Nabila Sunduk, dan Ali Fitra. Semoga kita semua dapat sukses dan membanggakan orang tua kedepannya.
- 8) Sahabat sipil lingkungan 2008 yaitu Danank, Ajis, Riki, Fatcur, Dimas, Niko, Eka, Manda, Pisa, Ridha, Meizar, Irvan, Yusak, Rizal, Indra, Giwang, Andre, Wisnu, Melky, Akbar, Asrovi, Rifki, Indah, Aini, Maisya, Tina, Dini, Gaby, Shella, Sevi, Almas, dan kawan – kawan lainnya yang tidak bisa saya sebutkan satu - persatu. Saya sangat bersyukur dapat mengenal kalian semua.
- 9) Buat tim Yasa Mandala Desain yaitu saya, Alex, dan Akang. Semoga bisnis ini bisa besar kedepannya.

Demikian ucapan terima kasih yang hanturkan. Akhir kata, semoga penelitian ini dapat berguna untuk kemajuan Ilmu Pengatahuan.

Depok, 27 Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ryan Rakhmat Setiadi
NPM : 0806329590
Program studi : Teknik Sipil
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Studi Perilaku Struktur Gedung Akibat Pengaruh Gempa Dengan Mempertimbangkan Efek *Soil-Struktur Interacton*.

Bersama dengan perangkat lainnya. Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmediakan/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 27 Juni 2012

Yang Menyatakan



(Ryan Rakhmat Setiadi)

ABSTRAK

Nama : Ryan Rakhmat Setiadi
Program Studi : Teknik Sipil
Title : Studi Perilaku Struktur Gedung Akibat Pengaruh Gempa
Dengan Mempertimbangkan Efek *Soil-Struktur Interacton*.

Pada penelitian ini, struktur akan dimodelkan beserta tanah disekelilingnya dengan program SAP2000 dimana tanah dimodelkan sebagai *linear solid 3D element*. Analisis gempa yang digunakan berupa analisa *linear time history*. Variasi yang model mencakup ketinggian struktur dan juga variasi perletakan, yaitu berupa perletakan jepit dan perletakan tanah dengan nilai modulus elastisitas yang dibeda – bedakan pada lapisan tanah dimana pondasi berada. Hasil dari penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa efek pengaruh dari SSI tidak terlalu banyak berbeda dengan struktur perletakan jepit baik untuk periode getar struktur maupun respon linear struktur.

Kata Kunci : *Soil-Structure Interaction*, Respon Dinamik Struktur, *Linear Time History*, *Seismic Force*.

ABSTRACT

Name : Ryan Rakhmat Setiadi
Study Program : Civil Engineering
Title : Study Behavior of Building Structure Due to Earthquake
Loading With Considering Effect of *Soil-Structure
Interaction*.

In this study, structure will be modeled along with the surrounding soil with finite element program SAP2000, where the soil will be modeled as a linear 3D solid element. Earthquake analysis used in this study are *Linear Time History analysis*. Model variations are variations in the height of the structure and variations of boundary condition in the foundation. First variation in boundary are fixed foundation where the building assuming laying in the rock, and the second variation are the soil around the building will be modeled with variations of modulus elasticity. The result of this study concluded that the effect of *soil-structure interaction* are not too much different from the structure where the fixed foundation assuming, the period of structure and linear response of structure are almost same.

Keywords : Soil-Structure Interaction, Dynamics Respon of Structures, Linear Time History, Seismic Force.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
2. STUDI LITERATUR	5
2.1 Respon Dinamik Struktur	5
2.1.1 Massa	7
2.1.2 Kekakuan	8
2.1.3 Redaman	9
2.1.4 Respon Struktur Single Degree of Freedom (SDOF)	10
2.1.5 Respon Struktur Multi Degree of Freedom (MDOF)	12
2.2 Konsep Bangunan Tahan Gempa	15
2.3 Pembebanan Akibat Gempa	20
2.3.1 Analisa Respon Spektrum	21
2.3.2 Analisa Time History	22
2.4 Teori Statik dan Dinamik SSI	24
2.4.1 Winkler Springs	24
2.4.2 Finite Element Model	26
2.4.3 Kinematic Interaction and Inertia Interaction	29
2.4.4 Kapan Dibutuhkan Analisa SSI ?	30
3. METODELOGI PENELITIAN	33
3.1 Metode Analisa Kekuatan Struktur	34
3.2 Informasi Perencanaan	34
3.3 Data Input Material Tanah	38

3.4	Pembebanan Pada Struktur	41
3.5	Parameter yang Akan Dievaluasi	42
4.	ANALISA DATA	43
4.1	Pendahuluan	43
4.2	Analisa Struktur.....	43
4.2.1	<i>Struktur 9 Lantai</i>	43
4.2.1.1	Waktu Getar Alami.....	43
4.2.1.2	Seismic Force	44
4.2.1.3	Story Shear	46
4.2.1.4	Momen Guling	47
4.2.1.5	Simpangan Struktur	49
4.2.1.6	Story Drift	50
4.2.2	<i>Struktur 18 Lantai</i>	52
4.2.2.1	Waktu Getar Alami.....	52
4.2.2.2	Seismic Force	52
4.2.2.3	Story Shear	54
4.2.2.4	Momen Guling	57
4.2.2.5	Simpangan Struktur	59
4.2.2.6	Story Drift	61
4.2.3	<i>Struktur 27 Lantai</i>	63
4.2.3.1	Waktu Getar Alami.....	63
4.2.3.2	Seismic Force	63
4.2.3.3	Story Shear	65
4.2.3.4	Momen Guling	68
4.2.3.5	Simpangan Struktur	70
4.2.3.6	Story Drift	72
5.	KESIMPULAN	74
5.1	Kesimpulan	74
5.1.1	Untuk Struktur 9 Lantai.....	74
5.1.2	Untuk Struktur 18 Lantai.....	75
5.1.3	Untuk Struktur 27 Lantai.....	76
5.2	Saran	78
	DAFTAR REFERENSI	79
	LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2. 1. PENGARUH GAYA LUAR TERHADAP PORTAL SDOF (A) GERAKAN PADA SISTEM (B) GAYA EQUILIBRIUM (RAY W. CLOUGH).....	6
GAMBAR 2. 2. DOF PADA ELEMEN FRAME 3 DIMENSI DAN MATRIKS KEKAKUANNYA.....	9
GAMBAR 2. 3 (A) BANGUNAN <i>WATER TANK</i> DIIDEALISASI SERTA (B) PRINSIP STRUKTUR SDOF.....	11
GAMBAR 2. 4 CONTOH BANGUNAN MDOF DAN PERSAMAAN GERAKAN BEBASNYA ...	13
GAMBAR 2. 5 MAKANISME BANGUNAN BERDASARKAN DAKTALITAS DAN KUAT LEBIH (SNI GEMPA).....	16
GAMBAR 2. 6 MEKANISME KERUNTUHAN IDEAL SUATU STRUKTUR GEDUNG DENGAN SENDI PLASTIS TERBENTUK PADA UJUNG-UJUNG BALOK, KAKI KOLOM (SNI GEMPA)	18
GAMBAR 2. 7 PERBANDINGAN DESIGN RESPONSE SPECTRUM WILAYAH JAKARTA SNI 03-1726-2002 DENGAN RSNI 03-1726-201X UNTUK TANAH KERAS, SEDANG, DAN LUNAK.....	22
GAMBAR 2. 8 REKAM GEMPA EL-CENTRO DENGAN PGA 0.3487G.....	23
GAMBAR 2. 9 PONDASI BERADA DIATAS TANAH	24
GAMBAR 2. 10 EKVIVALENSI PEGAS WINGKLER.....	25
GAMBAR 2. 11 MODEL FINITE ELEMENT DARI PONDASI RAFT YANG TERTUMPU PADA TANAH.....	27
GAMBAR 2. 12 FENOMENA <i>KINEMATIC INTERACTION</i> PADA PONDASI	29
GAMBAR 2. 13 <i>INERTIA INTERACTIAN</i> DAN <i>KINEMATIC INTERACTION</i> PADA PONDASI.....	30
GAMBAR 2. 14 GRAFIK NILAI <i>SHEAR WAVE</i> YANG DIBUTUHKAN PADA TANAH AGAR <i>CHIMNEYS</i> DAPAT DIMODELKAN SEBAGAI JEPIT.	32
GAMBAR 3. 1 ALUR KERJA.....	33
GAMBAR 3. 2 MODELISASI VARIABEL STRUKTUR.....	37
GAMBAR 3. 3 PROPERTI TANAH	38
GAMBAR 3. 4 INPUT MODULUS ELASTISITAS TANAH	39
GAMBAR 3. 5 HASIL DARI <i>SCALE UP</i> DAN <i>SPECTRAL MATCHING</i> DARI REKAMAN GEMPA.....	42
GAMBAR 4. 1 RESPON SPEKTRUM RSNI GEMPA 201X UNTUK TANAH DI JAKARTA DAN GRAFIK RESPON SPECTRUM DARI BEBERAPA REKAMAN GEMPA SETELAH PROSES PENYESUAIAN.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
GAMBAR 4. 2 <i>STORY SHEAR</i> STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.....	46
GAMBAR 4. 3 <i>STORY SHEAR</i> STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI NS SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.....	47

GAMBAR 4. 4 MOMEN GULING STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.	48
GAMBAR 4. 5 MOMEN GULING STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI NS SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.	48
GAMBAR 4. 6 SIMPANGAN STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW SAAT DETIK DIMANA TERJADI DISPLACEMENT MAKSIMUM PADA ATAP.	49
GAMBAR 4. 7 SIMPANGAN STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW SAAT DETIK DIMANA TERJADI DISPLACEMENT MAKSIMUM PADA ATAP. NILAI SIMPANGAN	50
GAMBAR 4. 8 <i>STORY DRIFT</i> ARAH MEMANJANG STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW PADA STRUKTUR 9 LANTAI.	51
GAMBAR 4. 9 <i>STORY DRIFT</i> ARAH MELINTANG STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI NS PADA STRUKTUR 9 LANTAI.	51
GAMBAR 4. 10 <i>STORY SHEAR</i> STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.	55
GAMBAR 4. 11 <i>STORY SHEAR</i> STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI NS SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.	56
GAMBAR 4. 12 MOMEN GULING STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.	57
GAMBAR 4. 13 MOMEN GULING STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI NS SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.	58
GAMBAR 4. 14 SIMPANGAN STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW SAAT DETIK DIMANA TERJADI DISPLACEMENT MAKSIMUM PADA ATAP.	59
GAMBAR 4. 15 SIMPANGAN STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI NS SAAT DETIK DIMANA TERJADI DISPLACEMENT MAKSIMUM PADA ATAP. NILAI SIMPANGAN	60
GAMBAR 4. 16 <i>STORY DRIFT</i> ARAH MEMANJANG STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI- CHI EW PADA STRUKTUR 18 LANTAI.	61
GAMBAR 4. 17 <i>STORY DRIFT</i> ARAH MELINTANG STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI- CHI NS PADA STRUKTUR 18 LANTAI.	62
GAMBAR 4. 18 <i>STORY SHEAR</i> STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.	66
GAMBAR 4. 19 <i>STORY SHEAR</i> STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI NS SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.	67
GAMBAR 4. 20 MOMEN GULING STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.	68
GAMBAR 4. 21 MOMEN GULING STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI NS SAAT DETIK DIMANA TERJADI <i>BASE SHEAR</i> MAKSIMUM.	69
GAMBAR 4. 22 SIMPANGAN STRUKTUR AKIBAT GEMPA CHI-CHI EW SAAT DETIK DIMANA TERJADI DISPLACEMENT MAKSIMUM PADA ATAP.	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis Tanah dan Nilai Modulus Subgrade-nya	26
Tabel 2.2 Jenis Tanah dan Nilai SPT atau CPT	28
Tabel 3.1 Data Design Struktur yang Dimodelisasi	35
Tabel 3.2 Hasil Pengolahan Data Tanah Untuk Input Data Material di Model	40
Tabel 4.1 Periode Getar Struktur 9 Lantai	44
Tabel 4.2 Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 9 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi <i>Base Shear</i> Maksimum	45
Tabel 4.3 Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 9 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi <i>Base Shear</i> Maksimum	45
Tabel 4.4 Periode Getar Struktur 18 Lantai	52
Tabel 4.5 Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 18 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi <i>Base Shear</i> Maksimum.....	53
Tabel 4.6 Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 18 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi <i>Base Shear</i> Maksimum.....	54
Tabel 4.7 Periode Getar Struktur 27 Lantai	63
Tabel 4.8 Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 27 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi <i>Base Shear</i> Maksimum.....	63
Tabel 4.9 Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 18 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi <i>Base Shear</i> Maksimum.....	64

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan kota besar dengan pertumbuhan permintaan ruang usaha dan tempat tinggal yang tinggi. Dewasa ini telah banyak bermunculan permintaan akan pembangunan gedung – gedung tinggi yang mencapai 20 hingga 35 lantai. Semakin tinggi sebuah bangunan tentu bangunan tersebut akan rawan terhadap beban dari angin maupun gempa. Utamanya gempa, Indonesia berada jalur gempa yang mana menyebabkan kawasan di Indonesia sangat rawan terjadi gempa.

Semua pihak konstruksi yang terlihat dalam proses pembangunan sebuah gedung tinggi haruslah dapat memahami konsep bangunan tahan gempa. Konsultan perencana diharapkan dapat mendesain struktur gedung agar dapat berperilaku baik terhadap gempa yang terjadi. Dalam proses desain yang dilakukan, umumnya banyak asumsi – asumsi yang dibuat untuk mempermudah proses perhitungan respon gedung terhadap beban dinamik seperti gempa, salah satu asumsi yang sering digunakan insinyur adalah dengan memodelkan peletakan pada bangunan sebagai sendi atau jepit tanpa memerhatikan efek dari tanah tersebut. Proses pemodelan konvensional ini umumnya tidak tepat. Peletakan pada bangunan yang dimodelkan sebagai jepit akan membuat kekakuan struktur utamanya kolom akan semakin tinggi sehingga hasil yang didapatkan akan overestimate.

Pemodelan Interaksi tanah struktur (*soil-structure interaction*) dapat mengatasi permasalahan tersebut. Tingginya perkembangan komputer membantu insinyur dalam memodelkan problem SSI sehingga apa yang sulit dilakukan dahulu sudah dapat diatasi sekarang. Pemodelan struktur beserta tanah sekelilingnya lalu melihat respon struktur tersebut terhadap gempa akan lebih mendekati kenyataan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan guna sebagai pengetahuan tambahan agar insinyur di Indonesia dapat maju dan menjadi tuan rumah di negeri sendiri.

1.2 Rumusan Masalah

Pemodelan bangunan tinggi di Indonesia umumnya dilakukan dengan menganggap tumpuan pada bangunan adalah berupa sendi atau jepit. Setelah dianalisa struktur atas pada bangunan tersebut barulah gaya – gaya pada tumpuan dianalisa terpisah dengan memodelkan tanah dan pondasi pada pemodelan yang berbeda. Tahapan pemodelan yang terpisah antara struktur atas dan struktur bawah ini umumnya menghasilkan nilai yang *overestimate*.

Pemodelan struktur bawah dan struktur atas secara kesatuan dan kemudian dianalisis untuk mencari *behavior* dari struktur atas maupun struktur bawah secara bersamaan jarang dilakukan. Padahal jika dianalisis secara bersamaan, perencanaan bangunan dapat menghasilkan hasil yang lebih optimal dan sesuai dengan karakteristik di lapangan.

Berdasarkan uraian di atas, maka melalui skripsi ini penulis mencoba untuk menganalisis pengaruh dari pemodelan *Soil-Structure Interaction* (SSI) pada bangunan tinggi dengan memodelkan tanah sebagai *perletakan jepit* dan juga *solid element*. Pada pemodelan ini akan digunakan software SAP2000 v15 untuk menganalisis perilaku struktur tersebut terhadap beban dinamik gempa. Dari analisis ini harapannya dapat menjawab pertanyaan: *Apakah pengaruh dari pemodelan SSI pada struktur bangunan akibat beban dinamik gempa ?*. Berangkat dari hal itulah maka penulis membahasnya melalui judul: *Studi perilaku struktur gedung akibat beban dinamik gempa dengan mempertimbangkan efek soil-structure interaction*.

1.3 Tujuan Penelitian

Melihat dari rumusan masalah, maka tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis perilaku struktur bangunan tinggi terhadap pemodelan SSI. Penelitian ini memfokuskan pada perilaku struktur berupa periode getar alami struktur, gaya gempa yang terjadi (*seismic force*), gaya geser tiap tingkat (*story shear*), momen guling, simpangan struktur saat gempa (*displacement*), dan juga *story drift*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian adalah sebagai berikut :

1. Variasi struktur yang digunakan adalah struktur dengan 9 lantai, 18 lantai, dan 27 lantai dengan ketinggian tipikal perlantai yaitu 3,6 meter.
2. Masing – masing struktur memiliki 2 lantai basemen dengan ketinggian tiap lantai basement sebesar 4,6 meter.
3. Tanah diasumsikan masih bersifat linear elastis selama gempa terjadi dan regangan pada tanah masih kecil sehingga nilai modulus geser maksimum yang digunakan dianggap cukup valid.
4. Gelombang gempa yang terjadi pada tanah saat analisis dinamik diasumsikan telah teredam oleh *modal damping* sebelum sampai ke *boundary* tanah.
5. Metode analisis gaya gempa yang digunakan adalah *Linear Time History Analysis*.
6. Gaya gempa yang terjadi diasumsikan hanya terjadi pada struktur, sehingga nilai berat jenis tanah dapat diabaikan.

1.5 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan mempelajari respon dinamik struktur dan SSI dari berbagai literatur. Lalu dilakukan pemodelan awal baik struktur maupun sebagian tanah disekelilingnya dengan bantuan software SAP2000 v15. Struktur yang dimodelkan adalah struktur beton dengan 2 basemen dan dengan variasi 3 ketinggian yaitu 9 lantai, 18 lantai, dan 27 lantai. Sementara itu tanah dimodelkan sebagai elemen solid 3D linier dan dibandingkan dengan perletakan sederhana jepit.

Setelah pemodelan selesai, kinerja seismic bangunan tersebut akan dievaluasi berdasarkan respon strukturnya terhadap gempa *Linier Time History*. Hasil dari analisis mendalam ini kemudian akan dikumpulkan dan dibuat kesimpulannya.

1.6 Sistematika Penulisan

Tulisan ini akan disajikan dalam lima BAB, yang mana masing – masing BAB dijelaskan sebagai berikut :

- BAB I, menjelaskan tentang latar belakang masalah, tujuan, dan pembatasan masalah serta metodologi penelitian.
- BAB II, menjelaskan tentang respon dinamik struktur, konsep bangunan tahan gempa, pembebanan akibat gempa, dan pengaruh *soil-structure interaction* terhadap analisa dinamik struktur.
- BAB III, menjelaskan mengenai metodologi penelitian dan input data yang diberikan untuk program *SAP2000*.
- BAB IV, menganalisis data dari output program *SAP2000*.
- BAB V, memberikan kesimpulan dan saran mengenai evaluasi terhadap pemodelan SSI dan pengaruhnya terhadap gaya dinamik gempa yang terjadi.

BAB II

STUDI LITERATUR

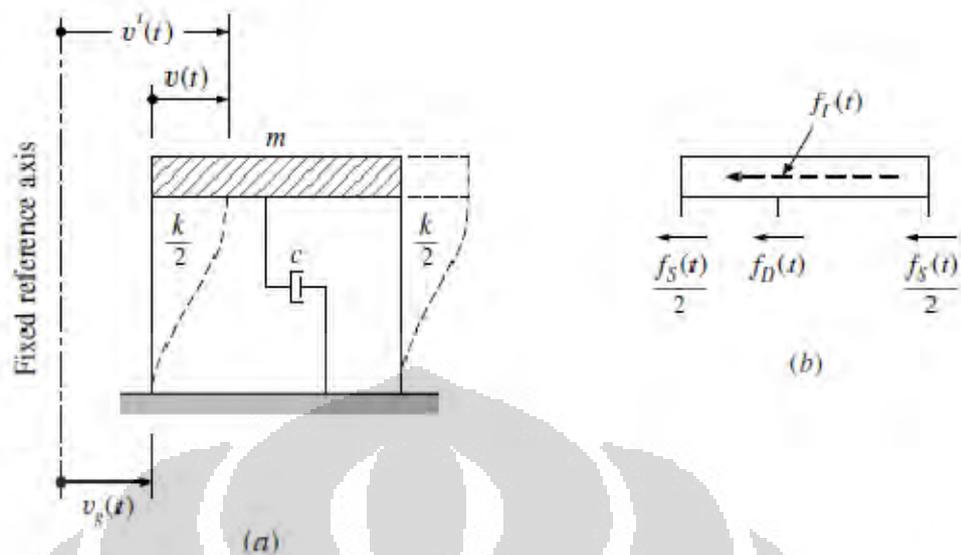
2.1 Respon Dinamik Struktur

Respon dinamik struktur adalah peristiwa dimana sebuah struktur yang mengalami getaran akibat pengaruh gaya luar. Gaya – gaya luar yang terjadi pada struktur yang menyebabkan getaran banyak dijumpai sehari – hari. Misalnya adalah getaran akibat suara, walaupun getaran ini cenderung tidak terlalu berefek besar pada struktur karena energi yang dilepaskan oleh suara dan merambat melalui udara hingga sampai ke struktur cenderung tidak terlalu besar.

Contoh lain dari beban dinamik adalah angin. Beban angin adalah berupa tekanan yang sifatnya acak dan non-harmonis. Namun demikian, beban angin tersebut dapat diambil rata – ratanya sehingga dapat dianalogikan sebagai beban kuasi-statik atau bahkan beban statik yang diekuivalensikan. Beban angin umumnya memiliki nilai frekuensi yang rendah, sehingga cukup berbahaya pada struktur yang memiliki frekuensi alami yang rendah pula. Struktur yang umumnya memiliki frekuensi yang rendah adalah jembatan tipe gantung (Suspended Bridge), Cable Stayed Bridge, dan gedung yang langsing dan tinggi.

Pada karya tulis ini, respon dinamik struktur akan dianalisis akibat dari beban gempa. Gempa terjadi umumnya akibat kerusakan di lempeng bumi yang melepaskan energi yang sangat besar dan merambat seperti gelombang hingga ke permukaan. Gempa juga bisa terjadi akibat letusan gunung merapi ataupun akibat ledakan yang dilakukan di dalam tanah. Akibat energi pada gempa, permukaan gempa akan mengalami gerakan dalam tiga arah, yang biasanya disimbolkan sebagai NS (North – South), EW (East – West), dan UD (Up – Down).

Dalam analisis respon dinamik struktur, massa, kekuan, dan redaman merupakan faktor paling penting yang akan diperhatikan. Hal ini dikarenakan pada gaya dinamik yang diberikan ke struktur, maka massa, kekakuan, dan redaman merupakan variabel yang masing - masing akan memberikan sebuah perlawanan terhadap gaya dinamik tersebut. Hal ini ditunjukkan oleh gambar 2.1.



Gambar 2. 1. Pengaruh Gaya Luar Terhadap Portal SDOF (a) Gerakan Pada Sistem
(b) Gaya Equilibrium (Ray W. Clough)

Berdasarkan prinsip keseimbangan dinamik pada *free body diagram* tersebut, maka diperoleh hubungan :

$$F_I + F_D + F_S = P(t) \quad (2.1)$$

yang mana,

$$F_I = m \ddot{v}'(t) \quad (2.2)$$

$$F_D = c \dot{v}(t)$$

$$F_S = k v(t)$$

Dimana jika persamaan 2.1) disubstitusikan ke persamaan 2.2) akan diperoleh,

$$m \ddot{v}(t) + c \dot{v}(t) + k v(t) = p(t) \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3) merupakan persamaan dasar dinamika struktur yang menjadi basis perhitungan dinamik.

2.1.1 Massa

Pada sebuah struktur yang kontinu maka derajat kebebasan (lihat bab 2.1.4) yang dimiliki struktur tersebut adalah tak terhingga banyaknya. Umumnya, derajat kebebasan tersebut bersesuaian dengan lokasi massa yang ditinjau. Jika derajat kebebasan akibat banyaknya massa yang ditinjau tetap dianalisis, maka persamaan diferensial yang dimiliki akan sulit dianalisis karena rumitnya persamaan diferensial yang didapatkan. Oleh karena itu dilakukan pengederhanaan pada lokasi massa yang ditinjau pada struktur agar didapatkan derajat kebebasan yang terbatas pula.

Terdapat dua pendekatan yang sering dilakukan untuk mengederhanakan massa pada struktur. Pendekatan pertama yaitu dengan menggumpalkan massa pada lokasi – lokasi tertentu sehingga derajat kebebasan juga dapat dikurangi. Jika suatu struktur dengan massa tergumpal ini diberikan sebuah gaya horizontal maka struktur akan bergerak secara horizontal dan derajat kebebasan yang terjadi hanya pergerakan kearah horizontal (*shear building*). Karena massa bersesuaian dengan percepatan pada struktur, maka matrik massa pada system ini adalah matrik massa diagonal dengan *off-diagonal* matrik adalah nol.

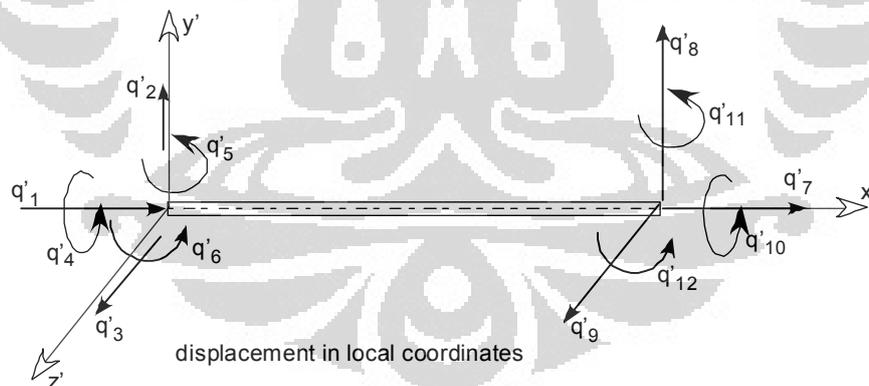
Pendekatan yang kedua adalah dengan prinsip *consistent mass matrix* yang mana element struktur yang berdeformasi akibat gaya luar akan bersesuaian dengan fungsi (*shape function*) tertentu. Pada prinsip ini, jika derajat kebebasan horizontal, vertikal, dan rotasi diperhitungkan maka standar *consisten mass matrix* akan memiliki *off-diagonal* yang tidak nol seperti yang terjadi pada pendekatan *lumped mass*.

Masing – masing pendekatan yang dilakukan memiliki kelemahan maupun kekurangan. Prinsip *consistent mass matrix* umumnya cukup baik untuk contoh kasus struktur yang kontinu seperti analisis getaran pada corong dan balok. Sementara itu, untuk struktur seperti portal, cara ini memiliki kekurangan karena pada portal berat struktur terkonsentrasi di pelat sehingga prinsip *lumped mass* akan lebih akurat.

2.1.2. Kekakuan

Pada prinsip *shear bulding*, balok pada portal akan tetap horizontal sebelum dan sesudah diberikan beban. Oleh karena penyederhanaan ini maka kekakuan dari balok haruslah sangat besar agar balok tetap horizontal dan tidak mengalami perputaran sudut. Hal ini dapat terjadi akibat pengaruh dari pelat yang memberikan kontribusi kekakuan pada balok sehingga asumsi balok sangat kuat dapat dipakai. Namun prinsip ini memakai kekuatan *upper bound/upper limit*, sehingga hasilnya cukup konservatif. Dalam perancangan struktur tahan gempa kolom haruslah lebih kuat dibandingkan balok, namun demikian rasio tersebut tidak selalu linier dengan kekuannya.

Matriks kekakuan pada struktur umumnya dapat dilakukan dengan memberikan lendutan satu – satuan pada tiap derajat kebebasan. Lalu masing – masing lendutan tersebut dianalisis pengaruhnya. Sedangkan untuk pemodelan tiga dimensi, sistem portal dengan satu lantai memiliki tiga derajat kebebasan yaitu dua arah perpindahan (sumbu x dan sumbu y) dan rotasi dari lantai. Matrik kekakuan element pada struktur portal untuk analisa finite element adalah :



$$\hat{k} = \begin{bmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & \frac{4EI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & \frac{2EI_x}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_x}{L} & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_x}{L} \\ \hline -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & \frac{2EI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & \frac{4EI_x}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_x}{L} & 0 & 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & \frac{4EI_x}{L} \end{bmatrix}$$

The transformation from local to global axis system is accomplished as follows:

$$k = T^T \hat{k} T$$

Gambar 2. 2. DOF pada Elemen Frame 3 Dimensi dan Matriks Kekakuannya

2.1.3. Redaman

Redaman merupakan peristiwa penyerapan energi diakibatkan oleh banyak faktor. Faktor – faktor tersebut antara lain yaitu:

- Gerakan antar partikel kecil di material struktur sehingga menyerap energi oleh gaya luar.
- Sambungan atau peletakan struktur yang bergeser.
- Gesekan struktur dengan udara.
- Ataupun respon inelastik dari struktur akibat timbulnya mekanisme sendi plastis.

Selain dari yang disampaikan diatas, masih banyak penyebab redaman pada struktur yang tidak dibahas pada tulisan ini.

Umumnya redaman dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu *damping system* dan *damping type*. *Damping system* disini dimaksud adalah bagaimana sebuah sistem dapat menyerap energi akibat gaya luar yang diberikan padanya. Redaman struktur dalam kategori ini dibagi menjadi tiga yaitu:

A. Redaman Klasik (*Classical Damping*)

Redaman klasik terbatas hanya pada sistem yang memiliki material yang sama tiap tingkatnya. Misalkan bangunan sepuluh lantai dengan keseluruhan material portalnya memakai baja saja. Jika sebagian lantai memakai baja dan

sebagian lagi memakai material beton, maka damping klasik tidak bisa digunakan. Hal ini dikarenakan redaman dari masing – masing material yang berbeda.

Selain harus adanya keseragaman dalam pemakaian material, damping klasik juga hanya terbatas pada struktur dengan perletakan sederhana (sendi atau jepit). Jika struktur memperhatikan interaksi struktur tanah (*soil-structure interaction*) redaman klasik tidak bisa digunakan. Hal ini akibat dari redaman tanah yang bersifat *frekuensi dependent* dimana nilai redamannya berubah ubah berdasarkan frekuensi gaya yang terjadi.

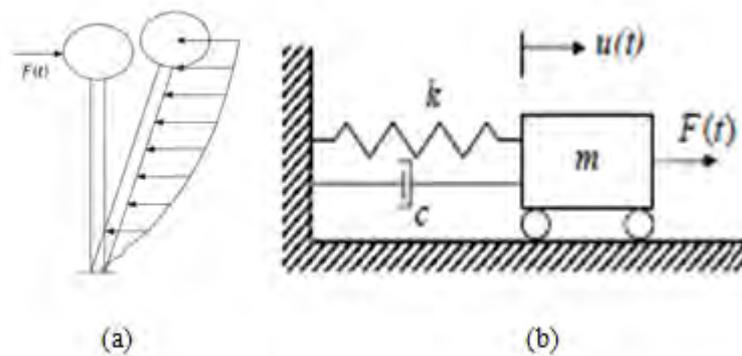
Pada redaman klasik, matrik redaman yang didapatkan akan bersifat orthogonal, sehingga dapat dilakukan analisis dengan metode *modal analysis/mode superposition*.

B. Redaman Tidak Klasik (*Non-Classical Damping*)

Seperti dijelaskan sebelumnya, redaman klasik terbatas untuk analisis yang sederhana. Sementara itu, untuk analisa dinamik yang lebih akurat lagi diperlukan analisis dengan memasukkan faktor redaman yang tidak orthogonal. Mode shape pada analisis ini tidak lagi dapat dilakukan, sehingga modal analisis juga sulit untuk diterapkan. Integrasi numerik untuk memperhatikan pengaruh dari dumping non-klasik dengan memperhatikan *coupled matrix* adalah pilihan terbaik.

2.1.4. Respon Struktur *Single Degree of Freedom (SDOF)*

Struktur SDOF yaitu struktur yang hanya memiliki satu koordinat untuk gerakannya dan massa yang terjadi berkumpul pada satu lokasi koordinat tersebut. Untuk memperjelas konsep SDOF ditampilkan gambar dibawah ini.



Gambar 2. 3 (a) Bangunan *Water Tank* Diidealisasi serta (b) Prinsip Struktur SDOF

Gambar diatas adalah sebuah struktur water tank yang diidealisasikan sebagai struktur dengan massa tergumpal diatasnya (bulatan pada struktur). Pada struktur ini diberikan gaya dinamik $F(t)$ dimana gaya tersebut berubah – ubah terhadap fungsi waktu. Kekakuan kolom serta redaman yang terjadi turut memberikan perlawanan terhadap gaya dinamik tersebut selain dari gaya inersia struktur. Prinsip struktur SDOF ditampilkan lebih sederhana pada gambar berikutnya yaitu sebuah mobil yang ditahan oleh beratnya sendiri, pegas, dan daspot damping. Contoh lain dari struktur SDOF yaitu portal satu lantai.

Struktur SDOF hanya memiliki satu buah massa, kekakuan, dan redaman. Oleh karenanya persamaan dinamiknya akibat gaya dinamik luar dapat ditulis sebagai,

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) \quad (2.3)$$

Dimana,

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_d t} (A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t) \quad (2.4)$$

Untuk struktur dengan redaman berdasarkan Euler Formula.

Pada persamaan 2.4). nilai kecepatan dan percepatan didapatkan dengan menurunkan persamaan tersebut.

Dalam pemodelan matematika, redaman biasanya ditulis sebagai *Damping Ratio*, dimana merupakan nilai dari redaman struktur berbanding dengan redaman kritis struktur tersebut. Formulasi matematisnya ditampikan berikut ini.

$$\xi = \frac{c}{c_c} \quad (2.5)$$

Dimana satuannya adalah dalam persen.

Sementara itu untuk struktur yang bergerak bebas (*free vibration*), yaitu struktur yang bergerak akibat diberi lendutan dan dilepaskan hingga struktur tersebut bergoyang, frekuensi natural yang terjadi adalah.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.6)$$

Dan persamaan gerak untuk struktur *free vibration* yaitu,

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2.7)$$

Dengan membagi persamaan 2.7) dengan massa bangunan (m) dan memasukkan persamaan 2.5) dan 2.6) maka persamaan dinamik struktur SDOF pada kondisi *free vibration* adalah,

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = 0 \quad (2.8)$$

Persamaan 2.8) merupakan persamaan yang sangat penting dan akan menjadi dasar perhitungan dinamik struktur berikutnya.

2.1.5. Respon Struktur *Multi Degree of Freedom (MDOF)*

Pada kenyataannya, tidak semua bangunan merupakan struktur SDOF. Justru kebanyakan struktur bangunan memiliki derajat kebebasan yang banyak. Pada kasus water tower misalnya, struktur tersebut memiliki derajat kebebasan yang tak terhingga banyaknya karena merupakan struktur yang kontinu, namun penyederhanaan biasa dilakukan dengan menganggap massa struktur tergumpal di atasnya sehingga menjadi struktur MDOF.

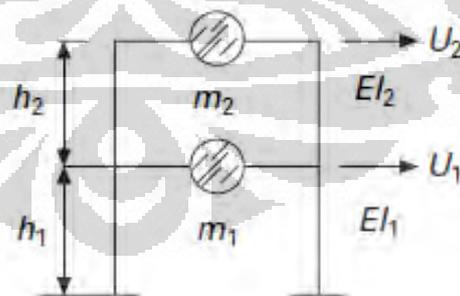
Pada struktur MDOF, properti struktur seperti massa, kekakuan, dan redaman merupakan sebuah kesatuan yang membentuk persamaan *couple (couple*

equation). Penggunaan matrik untuk menyederhanakan perhitungan biasanya dilakukan.

Massa bangunan pada struktur MDOF tersebar merata untuk tiap - tiap ketinggian. Pada portal misalnya, massa bangunan terpusat pada tiap – tiap lantai. Walaupun kenyataannya kolom juga memiliki massa, namun nilainya cukup jauh jika dibandingkan dengan massa bangunan.

Selain massa bangunan, kekuan struktur juga merupakan karakteristik dinamik struktur yang memiliki hubungan yang erat dengan massa bangunan. Hubungan ini nantinya akan menentukan nilai frekuensi sudut (ω) dan juga periode getarnya (T), kedua variabel tersebut merupakan hal yang sangat penting dalam menentukan respon dinamik sebuah struktur.

Sementara itu, matrik redaman pada struktur MDOF umumnya didapat dari pendekatan terhadap massa dan kekakuan. Terdapat tiga pendekatan untuk mendapatkan matrik redaman, yaitu pertama matrik redaman yang proporsional terhadap massa struktur (*Mass Damping*), kedua matrik redaman yang proporsional terhadap kekakuan struktur (*Stiffness Damping*), dan yang terakhir matrik redaman yang proporsional terhadap massa dan kekakuan struktur (*Reyliagh Damping*).



Gambar 2. 4 Contoh Bangunan MDOF dan Persamaan Gerakan Bebasnya

Pada gambar 2.4 diatas, persamaan MDOF-nya ditampilkan oleh persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

Atau dapat ditulis secara lebih sederhana.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (2.10)$$

Dan untuk getaran bebas tak teredam nilai tersebut menjadi,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (2.11)$$

Pada saat struktur mengalami getaran bebas, nilai simpangannya memenuhi persamaan berikut ini,

$$\mathbf{u} = \mathbf{a} \sin(\omega t + \phi) \quad (2.12)$$

Dimana \mathbf{a} merupakan vector amplitude yang berdasarkan pada tiap – tiap derajat kebebasan. Dengan menurunkan dua kali persamaan 2.10) maka kita mendapatkan percepatan struktur yaitu,

$$\ddot{\mathbf{u}} = -\omega^2 \mathbf{a} \sin(\omega t + \phi) = -\omega^2 \mathbf{u} \quad (2.13)$$

Dengan memasukkan persamaan 2.12) dan 2.13) ke persamaan 2.11) maka didapatkan,

$$[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}]\mathbf{a} = \mathbf{0} \quad (2.14)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan eigen (*Eigen Value*) dimana nilai \mathbf{a} haruslah tidak sama dengan nol. Berdasarkan prinsip nilai eigen maka determinan dari $[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}]$ haruslah sama dengan nol.

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (2.15)$$

Dari persamaan 2.15), kita dapat menentukan nilai frekuensi alami dari struktur MDOF. Persamaan diatas akan menghasilkan nilai frekuensi yang lebih dari satu dan sebanyak derajat kebebasan struktur yang kita tinjau.

Setelah mendapatkan nilai semua periode getar (ω), maka kita dapat mensubstitusikan periode getar tersebut ke persamaan 2.14) untuk mendapatkan nilai **a** untuk masing – masing periode getar. Nilai **a** disini sering disebut sebagai mode getar (*shape mode*) yang dilambangkan dengan (ϕ) dimana nilainya unik untuk setiap periode getaran.

2.2 Konsep Bangunan Tahan Gempa

Perancangan bangunan akibat beban gempa berbeda dengan konsep perancangan akibat beban statis, sehingga dalam perhitungannya gaya gempa tidak memiliki solusi tunggal karena respon dan beban berubah menurut waktu.

Besarnya tingkat pembebanan gempa berbeda-beda dari satu wilayah dengan wilayah yang lain, yang tergantung pada keadaan seismotektonik, geografi, dan geologi setempat. Analisa gempa pada bangunan tinggi perlu dilakukan karena pertimbangan keamanan struktur dan kenyamanan penghuni bangunan. Beban gempa akan menimbulkan simpangan (*drift*) yang perlu dikontrol.

Konsep dasar bangunan tahan gempa secara umum adalah sebagai berikut:

1. Bangunan tidak boleh rusak komponen struktural maupun nonstruktural ketika mengalami gempa kecil yang sering terjadi.
2. Bangunan tidak boleh rusak komponen strukturalnya ketika mengalami gempa sedang yang hanya terjadi sesekali.
3. Bangunan tidak boleh runtuh ketika mengalami gempa besar yang sangat jarang terjadi.

Sifat dari struktur yang menjadi syarat utama perencanaan bangunan tahan gempa adalah sebagai berikut:

- Kekuatan (*strength*)

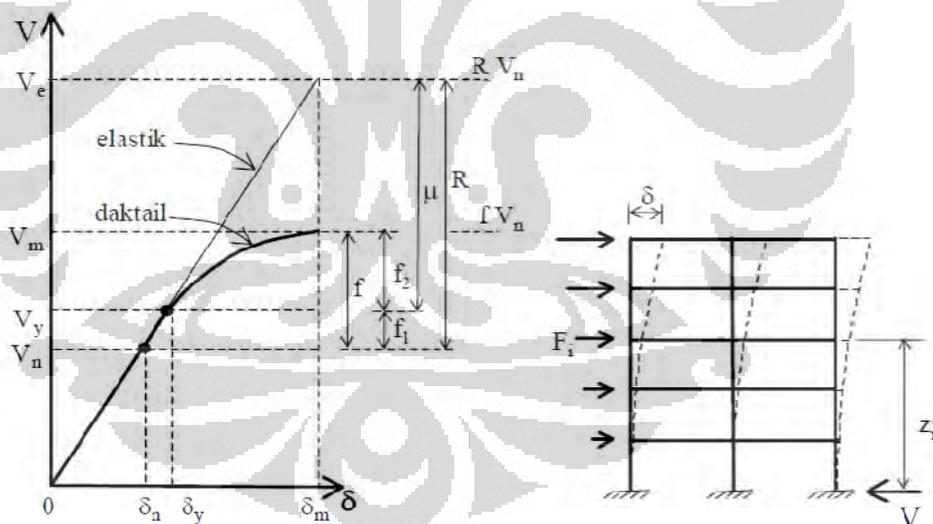
Kekuatan dapat kita artikan sebagai ketahanan dari struktur atau komponen struktur atau bahan yang digunakan terhadap beban yang

membebaninya. Perencanaan kekuatan suatu struktur tergantung pada maksud dan kegunaan struktur tersebut.

Sistem struktur dan periode natural struktur akan sangat berpengaruh terhadap respon struktur terhadap gempa. Dalam desain bangunan tahan gempa, struktur didesain memenuhi sifat kuat lebih (F_1) dan *redundancy* (F_2) dimana karena sifat tersebut struktur umumnya tidak akan bersifat sepenuhnya elastoplastis.

Sifat kuat lebih (F_1) adalah karena kekuatan aktual material yang dilaksanakan lebih besar daripada kekuatan material yang direncanakan, sedangkan *redundancy* (F_1) disebabkan karena mekanisme sendi plastis yang direncanakan pada bangunan lebih besar dari satu.

Faktor amplifikasi gaya gempa menyatakan faktor kuat lebih total yang selanjutnya disebut sebagai *overstrength factor*. Berdasarkan faktor daktilitas dan faktor kuat lebih maka desain struktur bangunan akan menjadi sebagai berikut :



Gambar 2. 5 Mekanisme bangunan berdasarkan daktilitas dan kuat lebih (SNI Gempa)

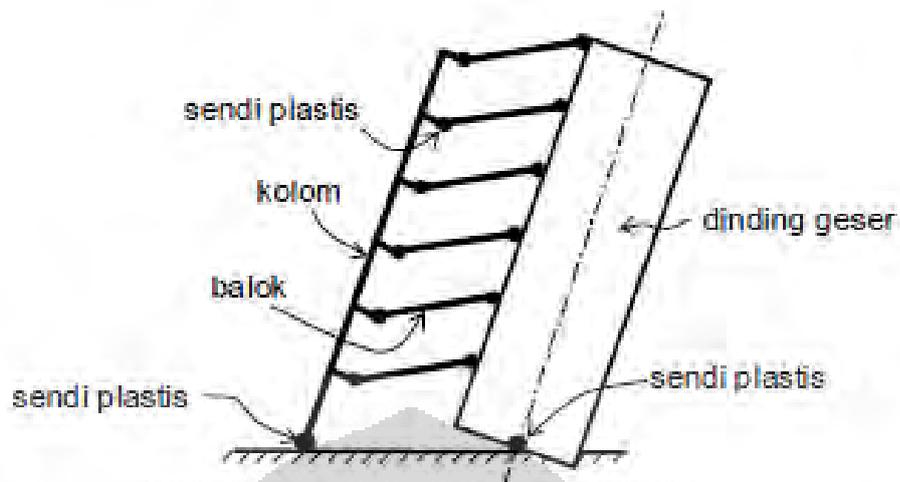
Dari gambar tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa bangunan tidak akan sepenuhnya berespon secara elastoplastis karena faktor daktilitas dan kuat lebih pada struktur.

- Daktilitas (*ductility*)

Kemampuan suatu struktur gedung untuk mengalami simpangan pasca-elastik yang besar secara berulang kali dan bolak-balik akibat beban gempa di atas beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelepasan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur gedung tersebut tetap berdiri, walaupun sudah berada dalam kondisi di ambang keruntuhan. Perilaku ini cukup penting karena saat pelepasan elemen struktur terjadi maka terjadi pula peresapan energi gempa oleh struktur. Saat terjadi gempa, daktilitas akan mempertahankan kekuatan dan kekakuan pada struktur sehingga struktur gedung tetap berdiri walaupun telah berada pada ambang keruntuhan.

Struktur dengan daktilitas tertentu akan memungkinkan terjadinya sendi plastis secara bertahap pada elemen – elemen struktur yang telah ditentukan. Dengan terbentuknya sendi plastis pada struktur, maka struktur akan mampu menahan beban gempa yang besar tanpa memberikan kekuatan berlebihan pada elemen struktur karena energi kinetik akibat gerakan tanah yang diterima akan diserap oleh sendi plastis tersebut. Semakin banyak sendi plastis yang terjadi pada struktur maka semakin banyak pula energi yang diserap oleh struktur.

Agar struktur gedung memiliki daktilitas yang tinggi, maka harus direncanakan sendi plastis yang terjadi berada pada balok - balok dan bukan terjadi pada kolom, kecuali pada kaki kolom paling bawah dan bagian atas kolom penyangga atap (Gambar 2.5). Hal ini dapat terjadi jika bangunan didesain dengan kapasitas kolom – kolom melebihi kapasitas balok yang bertemu pada kolom tersebut (*Strong Column Weak Beam*). Selain itu *displacement* yang terjadi harus dijaga batasannya agar menjaga integrasi bangunan dan bertambahnya momen akibat P- Δ efek.



Gambar 2. 6 Mekanisme keruntuhan ideal suatu struktur gedung dengan sendi plastis terbentuk pada ujung-ujung balok, kaki kolom (SNI Gempa)

Rasio antara simpangan maksimum struktur (X_{max}) terhadap simpangan struktur pada saat terjadi sendi plastis yang pertama (X_y) dinyatakan sebagai faktor daktilitas (μ) :

$$\mu = \frac{X_y}{X_{max}} \quad (2.16)$$

Faktor daktilitas yang digunakan pada bangunan beton dual sistem mengacu pada RSNI Gempa 201X adalah 8,0.

- Kekakuan (*stiffness*)

Deformasi akibat gaya lateral perlu dihitung dan dikontrol. Perhitungan yang dilakukan berhubungan dengan sifat kekakuan. Deformasi pada struktur dipengaruhi oleh besar beban yang bekerja. Hubungan ini merupakan prinsip dasar dari mekanika struktur, yaitu sifat geometri dan modulus elastisitas bahan. Kekakuan mempengaruhi besarnya simpangan pada saat terjadi gempa.

Metode analisis gempa yang digunakan untuk merencanakan bangunan tahan gempa dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu analisis statik dan analisis

dinamik. Dalam menganalisis perilaku struktur yang mengalami gaya gempa, semakin teliti analisis dilakukan, perencanaannya semakin ekonomis dan dapat diandalkan. Untuk bangunan satu tingkat dapat direncanakan hanya dengan menetapkan besarnya beban lateral yang dapat ditahan elemen struktur dan dengan mengikuti ketentuan-ketentuan dalam peraturan.

Untuk bangunan berukuran sedang, prosedur analisis dapat dilakukan dengan metode analisis statik sesuai dengan prosedur yang ditentukan dalam peraturan. Untuk bangunan yang besar dan mempunyai nilai kepentingan yang besar perhitungan beban gempanya harus dengan SNI 03-1726-2002. Pada SNI 03-1726-2002 pasal 4.2.1, struktur gedung dapat dibedakan menjadi struktur gedung beraturan dan struktur gedung tidak beraturan. Gedung yang ditetapkan sebagai struktur gedung beraturan adalah sebagai berikut:

1. Tinggi struktur gedung diukur dari taraf penjepitan lateral tidak lebih dari 10 tingkat atau 40 m.
2. Denah struktur gedung adalah persegi panjang tanpa tonjolan dan walaupun mempunyai tonjolan, panjang tonjolan tersebut tidak lebih dari 25% dari ukuran terbesar denah struktur gedung dalam arah tonjolan tersebut.
3. Denah struktur gedung tidak menunjukkan coakan sudut dan walaupun mempunyai coakan sudut, panjang sisi coakan tersebut tidak lebih dari 15% dari ukuran terbesar denah struktur gedung dalam arah sisi coakan tersebut.
4. Sistem struktur gedung terbentuk oleh subsistem-subsistem penahan beban lateral yang arahnya saling tegak lurus dan sejajar dengan sumbu-sumbu utama ortogonal denah struktur gedung secara keseluruhan.
5. Sistem struktur gedung tidak menunjukkan loncatan bidang muka dan walaupun mempunyai loncatan bidang muka, ukuran dari denah struktur bagian gedung yang menjulang dalam masing-masing arah, tidak kurang dari 75% dari ukuran terbesar denah struktur bagian gedung bawahnya. Dalam hal ini, struktur rumah atap yang tingginya tidak lebih dari 2 tingkat tidak perlu dianggap menyebabkan adanya loncatan bidang muka.
6. Sistem struktur gedung memiliki kekakuan lateral yang beraturan tanpa adanya tingkat lunak. Yang dimaksud dengan tingkat lunak adalah suatu tingkat dimana kekakuan lateralnya adalah kurang dari 70% kekakuan

lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80% kekakuan lateral rata-rata 3 tingkat di atasnya. Dalam hal ini, yang dimaksud dengan kekakuan lateral suatu tingkat adalah gaya geser yang bila bekerja di tingkat itu menyebabkan satu satuan simpangan antar-tingkat.

7. Sistem struktur gedung memiliki berat lantai tingkat yang beraturan, artinya setiap tingkat memiliki berat yang tidak lebih dari 150% dari berat lantai tingkat di atasnya atau di bawahnya. Berat atap atau rumah atap tidak perlu memenuhi ketentuan ini.
8. Sistem struktur gedung memiliki unsur-unsur vertikal dari sistem penahan beban lateral yang menerus, tanpa perpindahan titik beratnya, kecuali bila perpindahan tersebut tidak lebih dari setengah ukuran unsur dalam arah perpindahan tersebut.
9. Sistem struktur gedung memiliki lantai tingkat yang menerus, tanpa lubang atau bukaan yang luasnya lebih dari 50% luas seluruh lantai bertingkat.

Gaya lateral yang bekerja pada struktur selama terjadi gempa tidak dapat dievaluasi secara akurat oleh metode analisis statik. Analisis dinamik dipakai untuk memperoleh hasil evaluasi yang lebih akurat dari gaya gempa dan perilaku struktur. Struktur yang didesain secara statik dapat ditentukan apakah struktur tersebut cukup aman berdasarkan hasil responsnya dengan analisis dinamik. Jika dari hasil respons tersebut struktur dinyatakan tidak aman, desain struktur tersebut harus dimodifikasi agar memenuhi syarat struktur tahan gempa.

2.3 Pembebanan Akibat Gempa

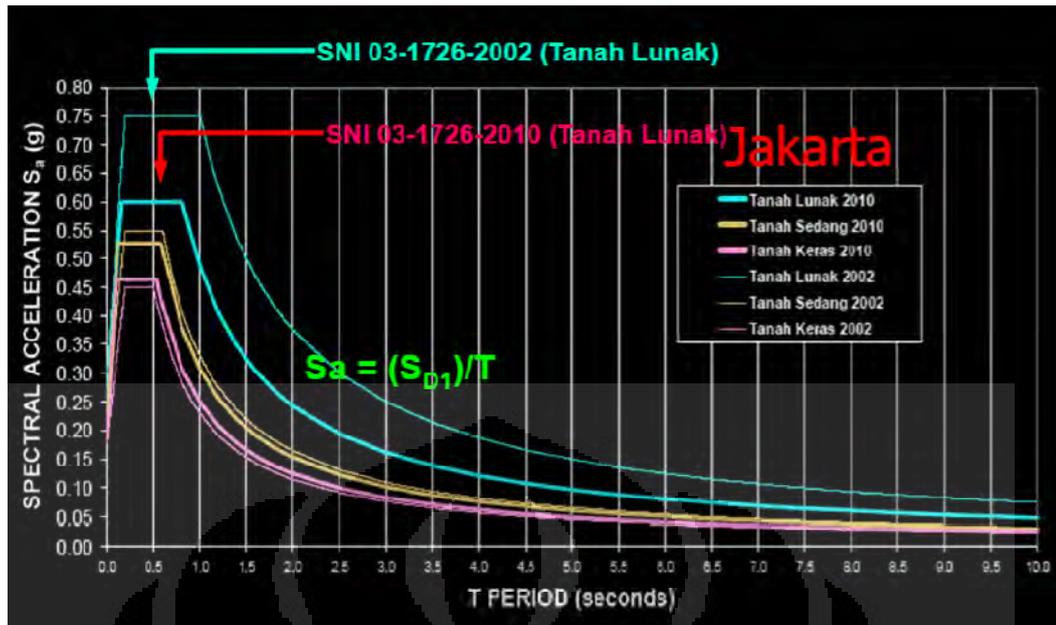
Bembebanan akibat dari pengaruh gerakan tanah dapat dimodelkan dengan beban statik ataupun beban dinamik. SNI mengatur penggunaan tipe beban apakah statik atau dinamik tergantung pada tipe bangunan apakah beraturan atau tidak. Untuk bangunan beraturan yang jumlah lantainya kurang dari 10 dan tinggi dari tarap penjepitan kurang dari 40 meter, maka penggunaan beban statik memungkinkan. Namun jika bangunan tidak masuk ke dalam kategori bangunan beraturan maka analisis dinamik perlu dilakukan. Penjelasan lebih dalam mengenai tipe analisis beban gempa dijelaskan sebagai berikut :

2.3.1 Analisa Respons Spectrum

Analisa respons spectrum adalah analisis pengaruh gempa dengan menggunakan grafik spectrum respon, dimana grafik spectrum respon adalah suatu diagram yang memberikan hubungan antara percepatan respon maksimum suatu sistem dengan Satu Derajat Kebebasan (SDK) akibat dari masukan suatu gempa tertentu, sebagai fungsi dari faktor redaman dan waktu getar alami SDK tersebut.

Dalam SNI Gempa 2002, Spectrum Respon C-T (C = Faktor Respon gempa dan T = waktu getar alami), ditetapkan untuk masing – masing wilayah gempa, dimana sistem dianggap memiliki redaman kritis 5%. Untuk kondisi $T \approx 0$ percepatan respon maksimum menjadi identik dengan percepatan muka tanah ($C = A_0$), dimana kondisi ini hanya terjadi pada struktur dengan kekakuan yang sangat besar.

Bentuk dari grafik Spectrum Respon menunjukkan suatu fungsi acak, dimana mula – mula untuk T yang meningkat, nilai dari Respon Percepatannya juga ikut meningkat dari A_0 sampai nilai T sebesar 0.2 detik dengan percepatan A_m ; untuk nilai perioda $0.2 \text{ detik} < T < T_c$, nilai C konstan sebesar A_m ; dan untuk nilai $T > T_c$, nilai C mengikuti fungsi parabola, hal ini mengandung arti bahwa dalam kondisi ini nilai kecepatan dari struktur adalah konstan. Berikut ditunjukkan grafik Spectrum Respon berdasarkan RSNI Gempa 201X dan SNI Gempa 2002 untuk wilayah gempa Jakarta.



Gambar 2. 7 Perbandingan Design Response Spectrum Wilayah Jakarta SNI 03-1726-2002 Dengan RSNI 03-1726-201X Untuk Tanah Keras, Sedang, dan Lunak (Sumber: Steffie Tumilar Ir, M.Eng, MBA Shortcourse HAKI 2011)

Desain struktur yang sangat fleksibel hendaknya dihindari. Hal ini dilakukan karena mengingat struktur yang fleksibel akan memiliki nilai waktu getar alami yang panjang, dan nilai percepatan yang terjadi akan rendah. Hal ini menyebabkan struktur akan kurang mampu menyerap energi gempa dan akhirnya menjadikan energi gempa sebagai displacement yang besar. Selain itu gaya internal yang terjadi di dalam unsur – unsur struktur menghasilkan kekuatan pasang yang rendah.

2.3.2 Analisa Time History

Analisis Dinamik Riwayat Waktu adalah suatu cara analisis untuk menentukan riwayat waktu respon dinamik struktur bangunan gedung yang berperilaku linear atau nonlinier terhadap gerakan tanah akibat Gempa Rencana sebagai data masukan, di mana respon dinamik dalam setiap interval waktu dihitung dengan metode integrasi bertahap.

Beban gempa merupakan fungsi dari waktu, sehingga respon yang terjadi pada struktur gedung juga tergantung dari waktu pembebanan. Akibat beban Gempa Rencana maka struktur akan tetap berperilaku elastik untuk analisis linear

dan berperilaku inelastik untuk analisis nonlinear. Biasanya analisis riwayat waktu lebih sering digunakan untuk kondisi nonlinear, namun tidak jarang juga digunakan untuk kondisi linear saja.

Untuk mendapatkan respon struktur akibat pembebanan dari rekam *Accelerograms*, penggunaan modal analisis tidak dapat dilakukan, integrasi numerik langsung dengan memperhatikan struktur sebagai persamaan *couple* adalah dasar dari analisis *Time History* dimana metode integrasi yang umumnya digunakan adalah metode Newmark.

Dalam RSNI Gempa 101X diatur penggunaan *Accelerograms* dimana minimal yang dipakai tiga rekam gempa gerakan tanah yang didapat di suatu lokasi yang mirip kondisi geologi, topografi dan seismotektoniknya dengan lokasi tempat struktur gedung yang ditinjau berada. Dimana untuk mengurangi ketidakpastian mengenai kondisi lokasi ini, paling sedikit harus ditinjau 3 buah akselerogram dari 3 gempa yang berbeda. Jika rekaman gempa yang didapatkan tidak cukup, diperbolehkan menggunakan rekaman gempa buatan yang disesuaikan dengan respon spectrum di lokasi struktur berada.

Rekam gempa yang digunakan juga harus dimodifikasi puncak percepatannya hingga sekurang – kurangnya setara terhadap spektrum SNI. Beban gempa adalah fungsi waktu, sehingga respon pada struktur juga tergantung dari waktu pembebanan. Contoh rekam gempa dari Accelerogram untuk gempa kobe yang telah dimodifikasi ditunjukkan oleh gambar berikut ini:



Gambar 2. 8 Rekam Gempa El-Centro Dengan PGA 0.3487g

2.4 Teori Statik dan Dinamik SSI

Teori - teori yang banyak digunakan dalam memodelkan permasalahan *soil-structure interaction* adalah :

1. *Winkler spring* dimana tanah dimodelkan sebagai pegas linier (*linier spring*).
2. *Finite Element Models 2D and 3D*.

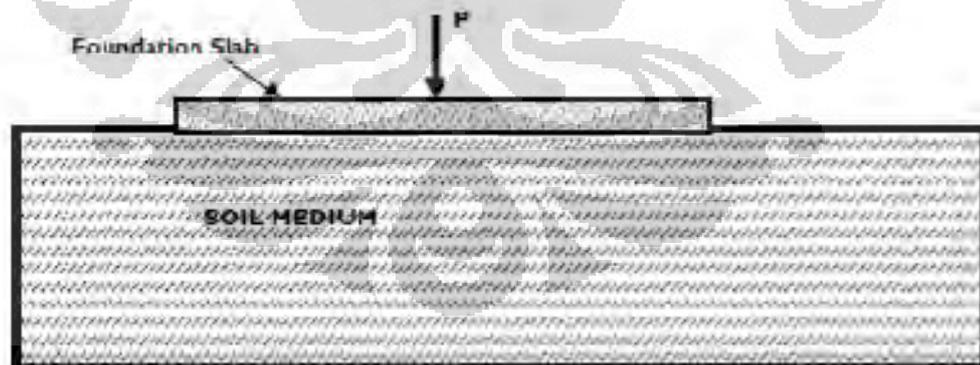
2.4.1 Winkler Springs

Pada model ini tanah diasumsikan merupakan beberapa pegas yang berjarak sangat rapat dimana pondasi tersebut berada. Sifat dari pegas tersebut linier terhadap lendutan yang terjadi dan diekspresikan sebagai :

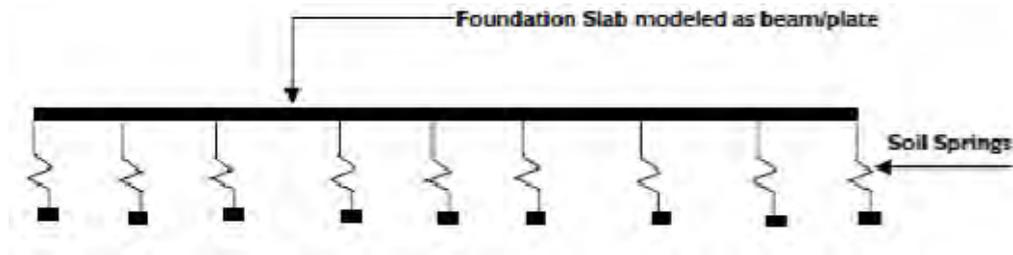
$$P = k\delta \quad (2.18)$$

Dimana P adalah gaya pada node dimana pegas di koneksikan dan k adalah konstanta pegas serta δ adalah perpindahan dari node.

Untuk memudahkan gambaran mengenai model *Winkler Springs* dapat dilihat gambar dibawah ini :



Gambar 2. 9 Pondasi Berada Diatas Tanah



Gambar 2. 10 Ekuivalensi Pegas Wingkler

Gambar diatas memperlihatkan kondisi di lapangan (gambar 2.9) dan pemodelan matematika pegas wingkler (gambar 2.10).

Untuk pegas, parameter tanah yang sangat menentukan kekakuan pegas tersebut adalah modulus subgrade tanah. Modulus subgrade tanah bisa didapatkan dari percobaan *plate load test* dimana kurva beban dan defleksi yang dihasilkan di plot dan gradient dari grafik tersebut adalah modulus subgrade untuk tanah selebar B (diameter pelat pada percobaan *plate load test*). Terzaghi dan Peck (1967) mengusulkan rumus untuk mendapatkan nilai modulus subgrade dari tanah yaitu :

$$k_s = k_1 \left(\frac{B + 0.3}{2B} \right)^2 \quad (2.19)$$

Untuk pasir dan,

$$k_s = k_1 \cdot B \quad (2.20)$$

Untuk clay, k_s adalah modulus subgrade dari tanah pada pondasi selebar B , sementara k_1 adalah modulus subgrade dari percobaan *plate load test* dengan area 300 mm x 300 m.

Tabel 2.1 memberikan beberapa nilai dari modulus subgrade untuk beberapa tipe tanah. Tabel ini bisa dijadikan pedoman dalam membandingkan dengan hasil percobaan.

Tabel 2.1. Jenis Tanah dan Nilai Modulus Subgrade-nya

(sumber : Indrajit Chowdhury : Dynamics of Structure And Foundation)

Sl. No.	Soil type	Sub-grade Modulus (kN/m^3)
1	Loose sand	4800–16000
2	Medium dense sand	9600–80000
3	Dense sand	64000–128000
4	Clayey medium dense sand	32000–80000
5	Silty medium dense sand	24000–48000
6	Clayey soil	
6a	$q_a \leq 250$ kPa	12000–24000
6b	$200 \leq q_a \leq 400$ kPa	24000–48000
6c	$q_a > 800$ kPa	>48000

q_a = Allowable bearing capacity of Foundation in kN/m^2 .

Kelemahan utama dari model *Winkler Spring* adalah pegas diidealisasikan sebagai elemen yang independent. Untuk beban titik yang bekerja pada satu pegas, maka hanya pegas itu saja yang bereaksi. Kenyataannya tanah adalah media yang kontinu dan adanya interaksi antar tanah. Selain itu, nilai modulus subgrade yang biasa didapatkan dari test plate bearing tidak akurat jika digunakan untuk mat foundation. Test plate bearing hanya berpengaruh terhadap luasan tanah yang kecil, sementara tegangan yang terjadi pada tanah akibat beban mat foundation mencakup luasan tegangan yang besar.

Untuk permasalahan seperti balok dan pelat yang tertumpu pada tanah dan permasalahan interaksi pondasi tanah, Winkler model masih sangat populer digunakan oleh insinyur. Hal ini tentu karena didukung oleh teori yang cukup sederhana serta banyaknya komersial struktur software yang mendukung teori ini, misalnya SAP2000, GTSTRUDL, ANSYS, STAAD, SACS.

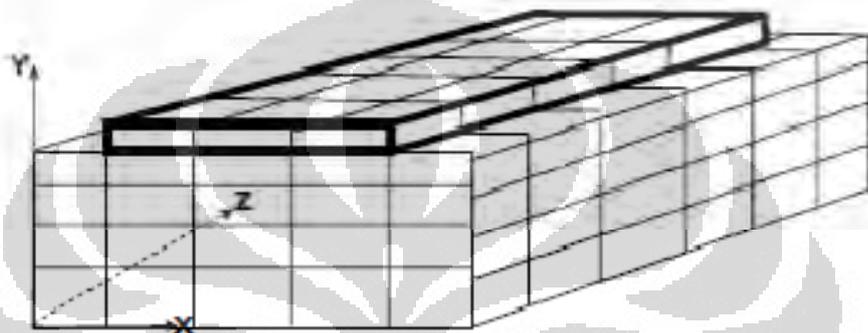
2.4.2 Finite Elements Model

Modeling dengan finite element menjadi populer dikarenakan kelebihan akan model matematikanya yang dapat menyelesaikan permasalahan seperti :

- Kondisi dengan batasan yang tidak biasa (*irregular boundary conditions*).
- Medium yang tidak homogen (tanah yang berlapis – lapis).

- Pembebanan yang kompleks, dan lainnya.

Telah kita ketahui bahwa permasalahan SSI dimana struktur yang kontak langsung dengan tanah lebih banyak diselesaikan oleh teori *winkler spring*. Namun bukan sesuatu yang tidak mungkin untuk memodelkan permasalahan serupa dengan Finite Element, dimana tanah dimodelkan sebagai element kotak seperti pada gambar berikut.



Gambar 2. 11 Model Finite Element dari Pondasi Raft yang Tertumpu pada Tanah

Walaupun pemodelan dengan Finite Element terlihat lebih sesuai dengan kondisi aslinya, namun dalam pengerjaannya lebih dibutuhkan waktu dan ketelitian. Kini dengan berkembangnya teknologi komputer, pemodelan dengan finite element dapat lebih mudah dan cepat.

Seperti halnya *winkler* model, Finite Element juga membutuhkan parameter – parameter yang harus di-input guna perhitungan kalkulasinya. Parameter – parameter tersebut adalah Modulus Elastisitas dari material (E) dan Poisson's Ratio (μ).

Percobaan di lapangan untuk mendapatkan nilai Modulus Elastisitas salah satunya yaitu *Menard pressure meter test* (Murthy 1991). Dimana mekanisme kerja alat ini adalah dengan memasukkan batang pressuremeter ke dalam lubang vertikal. Selain dari penggunaan test *Menard*, insinyur biasanya mendapatkan nilai Modulus Elastisitas dengan mengkorelasikan nilai dari CPT atau SPT. Tabel

2.2 menunjukkan nilai Modulus Elastisitas yang didapat dari berbagai nilai CPT dan SPT (Bowles 1988).

Tabel 2.2. Jenis Tanah dan Nilai SPT atau CPT

(sumber : Indrajit Chowdhury : Dynamics of Structure And Foundation)

Sl. No.	Soil	SPT	CPT
1	Sand (Normally Consolidated)	$E_s = 500(N + 15)$ $E_s = (15000 \text{ to } 22000) \log_e N$	$E_s = 2 \text{ to } 4 \text{ qc}$
2	Sand (Saturated)	$E_s = 250(N + 15)$	
3	Sand (over-consolidated)	$E_s = 18000 + 750N$	$E_s = 6 \text{ to } 30 \text{ qc}$
4	Gravelly sand and gravel	$E_s = 1200(N + 6)$	
4.1		$E_s = 600(N + 6)$ for $N \leq 15$	
4.2		$E_s = 600(N + 6) + 2000$ for $N \geq 15$	
5	Clayey sand	$E_s = 320(N + 15)$	$E_s = 3 \text{ to } 6 \text{ qc}$
6	Silty sand	$E_s = 300(N + 6)$	$E_s = 1 \text{ to } 2 \text{ qc}$
7	Soft clay		$E_s = 3 \text{ to } 8 \text{ qc}$

Here value of E_s is in kPa, N = No. of blows in a SPT test.

Sementara itu, nilai poisson ratio untuk tanah biasanya bervariasi antara 0.3 dan 0.5. Menggunakan nilai 0.4 untuk poisson ratio cukup banyak dilakukan untuk menyelesaikan masalah dilapangan.

Seperti halnya *Wikler Model*, Finite Element Model juga memiliki kelemahan dan kelebihan. Kelebihan utama dari Finite Element yaitu dapat memperhitungkan kondisi tanah yang heterogen, serta permasalahan – permasalahan non-struktural seperti *seepage*, konsolidasi, dan mekanisme transfer panas, serta non-linieritas dari model tanah.

Namun kompleksitasnya proses perhitungan dari Finite Element membuat model ini hanya cocok untuk orang yang berpengalaman dan memahami dari mekanisme perhitungannya. Penggunaan bantuan software Finite Element tanpa didasari oleh pemahaman yang kuat hanya akan menjadikan software tersebut sebagai “*black box*”, dimana input data yang salah akan menghasilkan keluaran yang salah pula “*Garbage in and Garbage Out*”.

2.4.3 Kinematic Interaction and Inertia Interaction

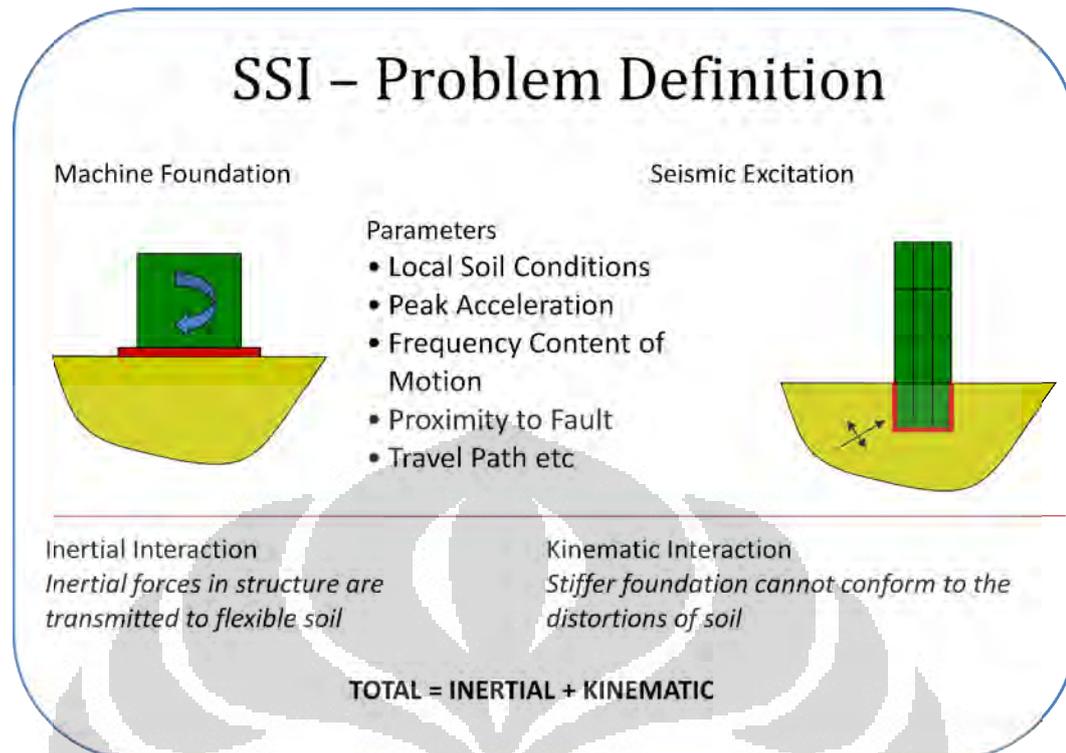
Dalam analisis *Soil-Structure Interaction*, terdapat dua interaksi yang terjadi antara tanah dan pondasi, interaksi tersebut adalah *kinematic interaction* dan *inertia interaction*.

Kinematic interaction adalah suatu fenomena dimana pondasi yang kaku tidak dapat mengikuti distorsi dari tanah. Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 2.12. Gelombang s-wave yang merambat ke permukaan tanah dan berinteraksi dengan pondasi akan menyebabkan pergerakan yang berbeda dengan fenomena *free field motion*. Untuk gelombang dengan frekuensi yang lebih kecil, pondasi dapat mengalami pergerakan *rocking* dan torsi akibat dari *unbalanced overturning moment* yang terjadi. Sementara itu untuk gelombang dengan frekuensi yang tinggi, pondasi umumnya dapat menahan gerakan tersebut.



Gambar 2. 12 Fenomena *Kinematic Interaction* Pada Pondasi

Fenomena lainnya dalam analisa *Soil-Structure Interaction* adalah *Inertia Interaction*. *Inertia Interaction* terjadi akibat dari gaya inersia yang disalurkan ke tanah yang fleksibel menyebabkan tanah dapat berdeformasi. Fenomena ini dapat ditunjukkan dengan lebih sederhana pada kasus pondasi mesin (Gambar 2.13).



Gambar 2. 13 *Inertia Interaction* dan *Kinematic Interaction* Pada Pondasi
(sumber: <http://www.ce.sc.edu/DeptInfo/members/faculty/rizos/Courses/E CIV724/Lectures/ssi.ppt>)

2.4.3 Kapan Dibutuhkan Analisa SSI ?

Veletsos dan Meek (1974) mempublikasikan bahwa pengaruh dari dinamik interaksi-struktur tanah dapat cukup signifikan pada saat,

$$\frac{V_s}{fb} \leq 20 \quad (2.21)$$

Dimana V_s = kecepatan geser tanah; f = frekuensi fundamental dari struktur dengan perletakan jepit; dan h = tinggi dari struktur. Untuk bangunan portal sederhana dengan perletakan jepit, periode waktu dapat diambil sebesar $(0.1n)$ dimana n adalah jumlah lantai dari bangunan tersebut. Sehingga didapat;

$$\frac{V_s n}{h} < 200 \quad (2.22)$$

Untuk bangunan normal, nilai rasio antara h/n (nilai ketinggian tiap lantai) adalah antara 3 sampai 3.3 meter. Jika kita ambil nilai 3, maka kita dapatkan;

$$V_s \leq 600 \text{ m/sec.} \quad (2.23)$$

Dari analisis tersebut dapat kita lihat bahwa untuk frame struktur sederhana, ketika kecepatan gelombang geser tanah lebih kecil atau sama dengan 600 meter/sec, maka kita membutuhkan analisis mengenai interaksi struktur frame dan tanah (Chowdhury and Dasgupta 2009).

Sayangnya, $V_s = 600 \text{ m/sec}$ adalah kecepatan geser tanah yang bersesuaian dengan tanah batuan. Jadi dapat kita simpulkan bahwa untuk semua tipe tanah sedang atau lunak, struktur frame akan memiliki perilaku yang berbeda pada kondisi jepit kecuali struktur tersebut tertumpu pada batuan.

Untuk jenis struktur kantilever seperti corong atau bangunan penangkap hujan, periode natural bangunan tersebut adalah;

$$T = 1.779 \sqrt{\frac{mb^4}{EI}} \quad (2.24)$$

Dimana, m = massa persatuan panjang dari sistem; h = tinggi dari struktur, EI = adalah flexural stiffness dari sistem.

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.21 ke persamaan 2.24 maka didapatkan;

$$\frac{V_s I}{h} \leq 20; \quad \text{or} \quad \frac{V_s 1.779 \sqrt{\frac{mb^4}{EI}}}{h} \leq 20; \quad \text{or, } V_s \leq \frac{11.24}{b} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (2.25)$$

Kita ketahui, $I = Ar^2$ dan $m = \rho.A$ dimana A = luas cross section; r = jari – jari gridasi; dan ρ = mass density dari material, maka :

$$V_s \leq \frac{11.24r}{b} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.26)$$

Untuk bangunan baja, kita dapat mengambil nilai akar modulus elastisitas dan density sebesar 57580. Sehingga didapatkan $V_s \leq 57580/\lambda$ dimana $\lambda = h/r$ (rasio kelangsingan dari struktur).

Untuk beton kita dapatkan :

$$V_s \leq \frac{123970}{\lambda} \quad (2.27)$$

Dari persamaan tersebut dapat kita simpulkan besarnya pengaruh SSI pada struktur kantilever. Gambar 2.12 menunjukkan batasan kecepatan gelombang geser agar SSI tidak berpengaruh banyak terhadap struktur kantilever baja dan beton.

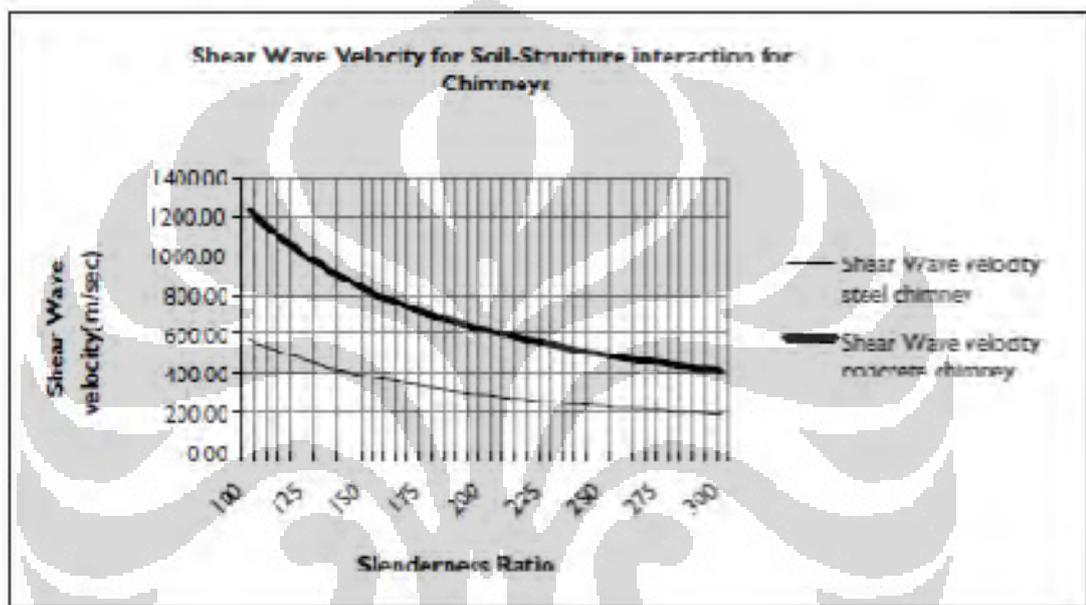


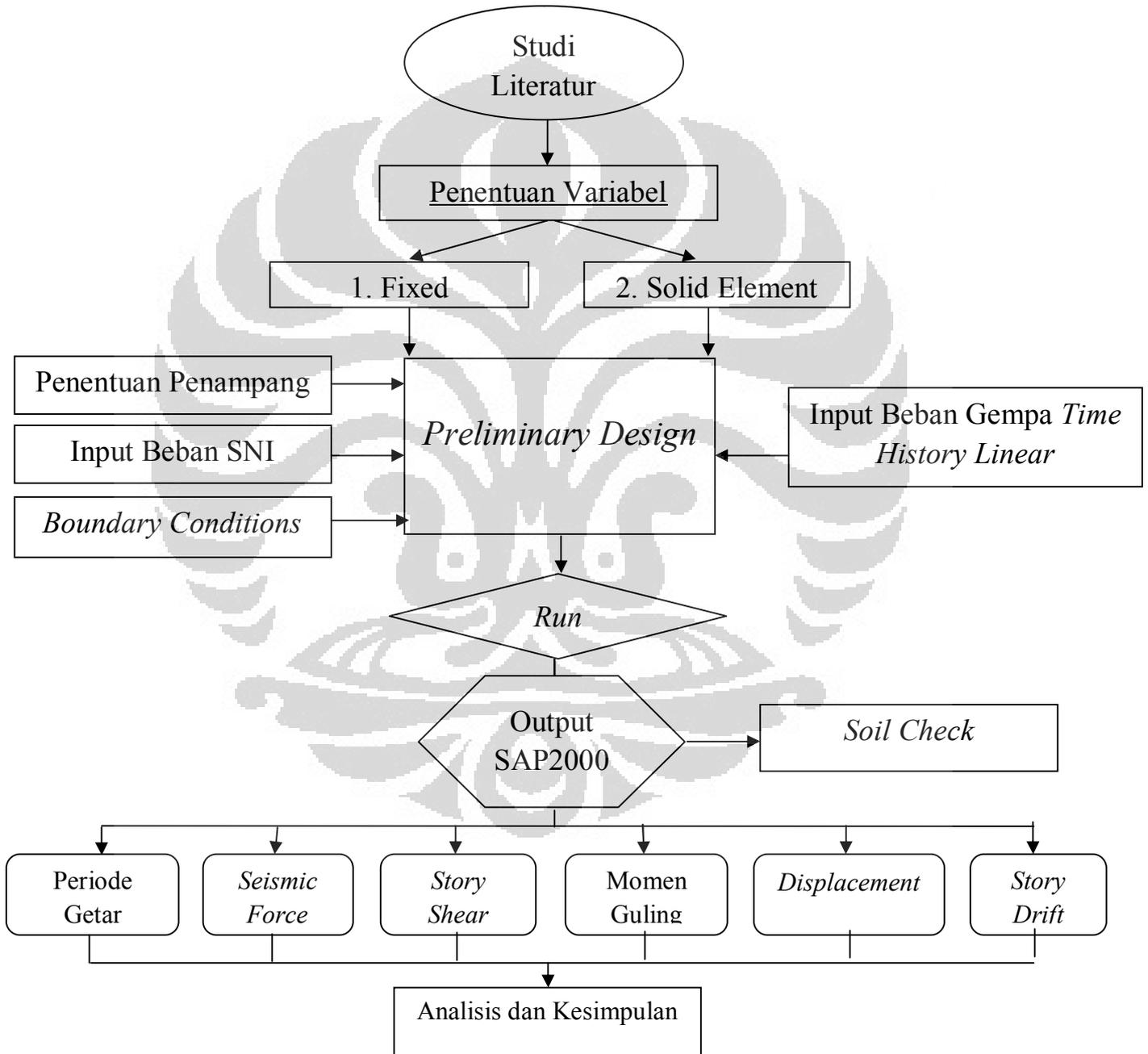
Figure 1.3 Chart to assess soil-structure Interaction for steel and concrete chimney.

Gambar 2. 14 Grafik Nilai *Shear Wave* yang Dibutuhkan Pada Tanah Agar *Chimneys* Dapat Dimodelkan Sebagai Jepit.

BAB III

METODELOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai alur pekerjaan dari penelitian yang dilakukan. Program yang digunakan adalah SAP2000. Alur pekerjaannya secara umum dapat dilihat pada bagan berikut ini :



Gambar 3. 1 Alur Kerja

3.1. Metode Analisa Kekuatan Struktur

Penggunaan bantuan komputer dalam menyelesaikan masalah – masalah yang terjadi di dunia konstruksi sudah merupakan sesuatu yang tidak bisa dihindarkan lagi. Salah satu software yang sangat membantu dalam menganalisa kekuatan struktur adalah SAP2000. SAP2000 adalah analisa struktur yang dikeluarkan oleh *Computers and Structures, inc. (CSI)*.

Tahapan – tahapan yang diperlukan dalam menganalisa suatu struktur bangunan gedung adalah:

1. Menentukan geometri model struktur.
2. Mendefinisikan data struktur
 - Data material.
 - Data penampang.
 - Data beban.
 - Data rekam gempa.
 - Data kombinasi pembebanan.
3. Menempatkan (*assign*) data ke struktur.
 - Assign penampang.
 - Assign beban yang bekerja.
4. Melakukan pemeriksaan terhadap input data.
5. Melakukan analisis struktur.
6. Evaluasi output struktur.

3.2. Informasi Perencanaan

Parameter model struktur yang dianalisis ditunjukkan oleh tabel 3.3. Modelisasi dilakukan dengan program SAP2000, dimana untuk balok dan kolom element yang digunakan adalah element 1 dimensi, sementara untuk shearwall, dinding, dan pelat dimodelkan dengan element *shell* dan *membrane* 2 dimensi.

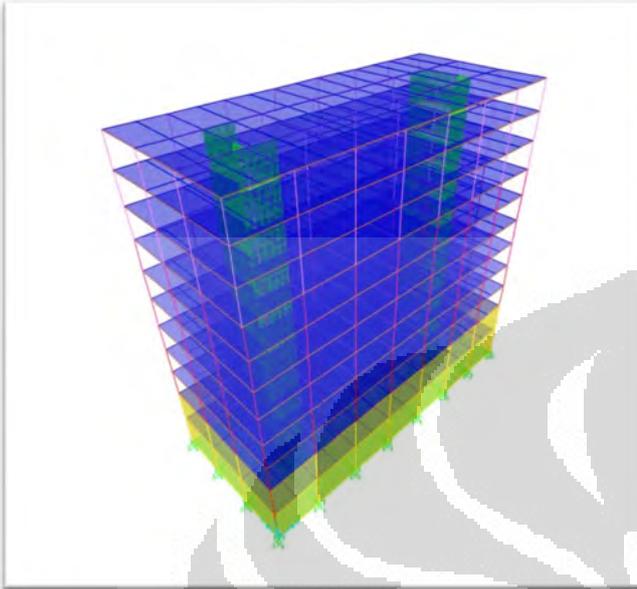
Tabel 3.1 Data Design Struktur yang Dimodelisasi

Keterangan	Data Design		
Fungsi	Perkantoran	Perkantoran	Perkantoran
Jumlah Lantai	9 Lantai	18 Lantai	27 Lantai
Jumlah Basement	2 Lantai	2 Lantai	2 Lantai
Elevasi Lantai	3.6 meter	3.6 meter	3.6 meter
Elevasi Basement	4.6 meter	4.6 meter	4.6 meter
Struktur	Beton Bertulang	Beton Bertulang	Beton Bertulang
Tebal Pelat	15 cm	15 cm	15 cm
Tebal Shear Wall	25 cm	25 cm	25 cm
Tebal Dinding Basement	25 cm	25 cm	25 cm
Fc'	35 Mpa	45 Mpa	45 Mpa
Fy	400 Mpa	400 Mpa	400 Mpa
E	27606 Mpa	31528 Mpa	31528 Mpa
μ	0.2	0.2	0.2

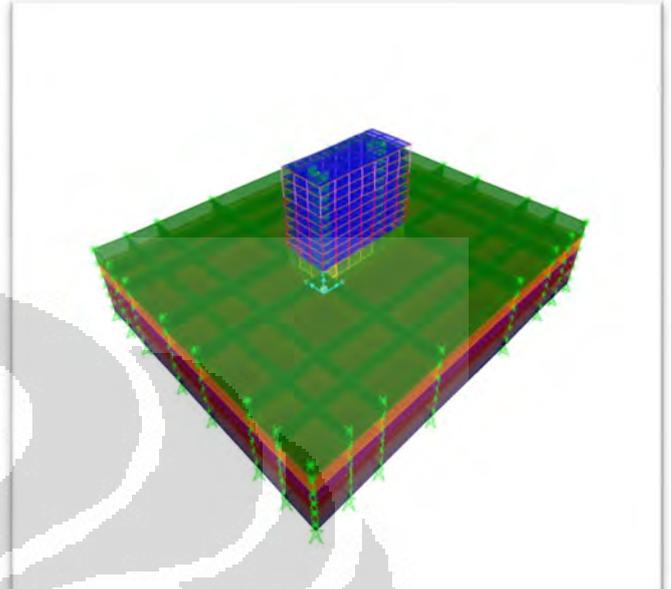
Reduksi kekakuan juga perlu dilakukan untuk mempertimbangkan efek retak pada balok. Nilai reduksi tersebut tergantung dari bentuk kolom dan balok serta element pelat yang digunakan. Pada penelitian ini, dikarenakan pelat menggunakan element membrane maka nilai reduksi yang digunakan baik untuk kolom dan balok adalah 0.7.

Modelisasi Variabel Struktur

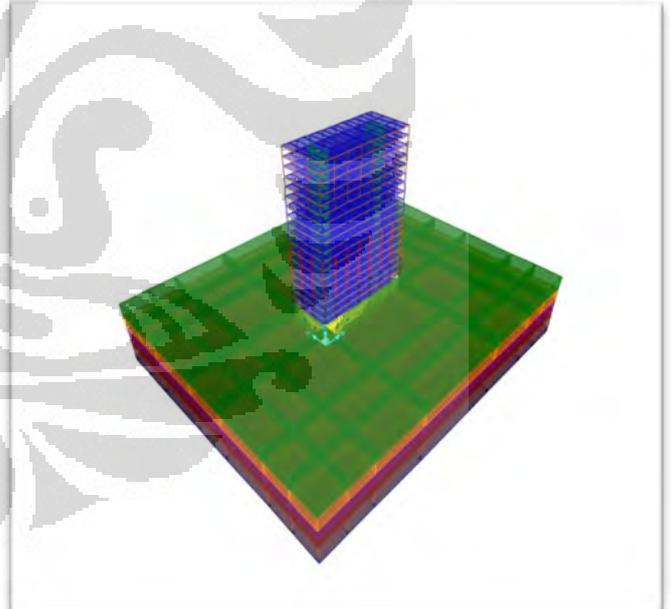
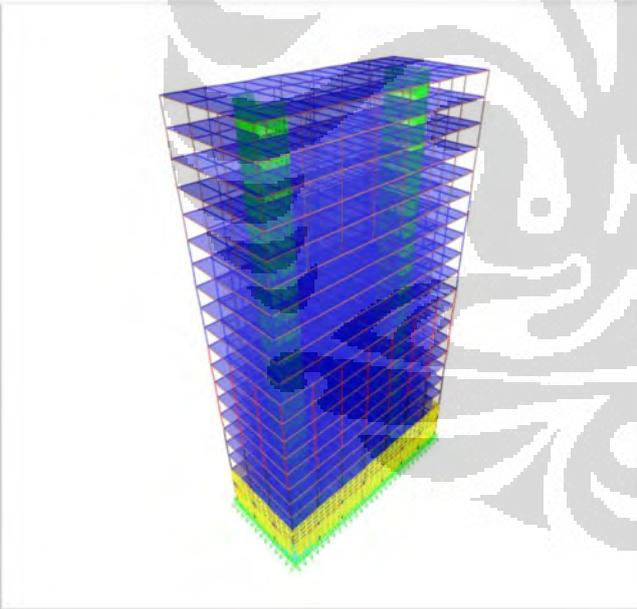
Struktur Perletakan Jepit



Struktur Dengan Tanah



Variabel 1 (Struktur 9 Lantai)

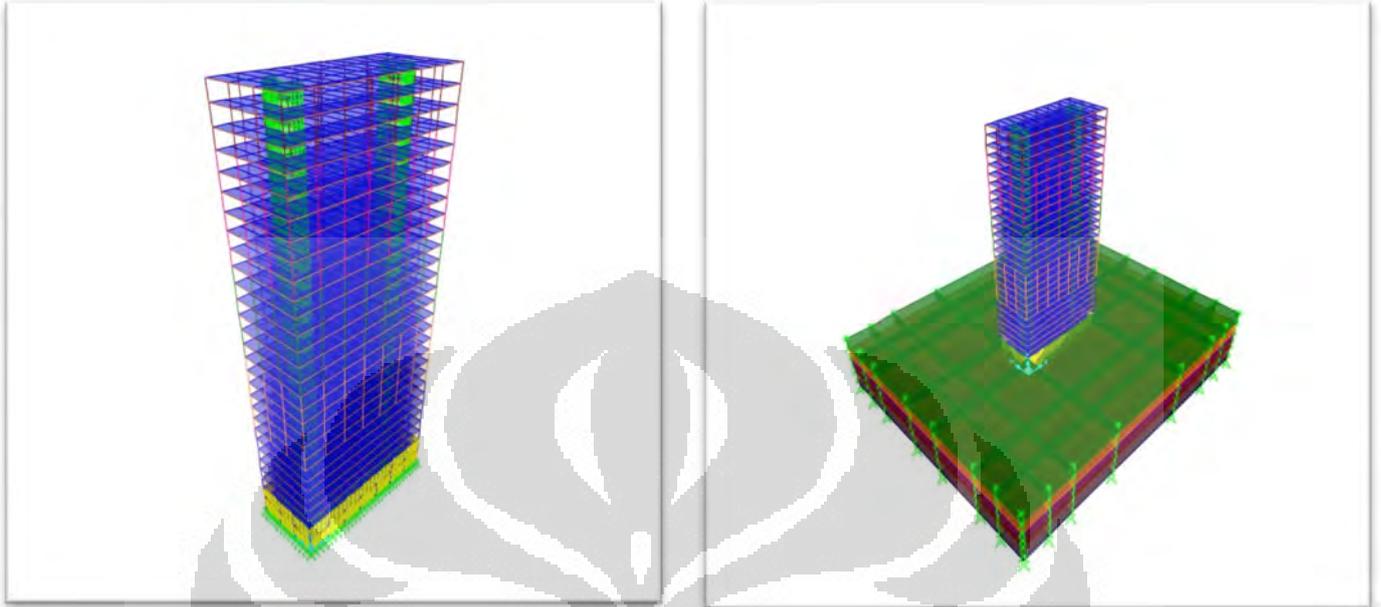


Variabel 2 (Struktur 18 Lantai)

Modelisasi Variabel Struktur

Struktur Perletakan Jepit

Struktur Dengan Tanah

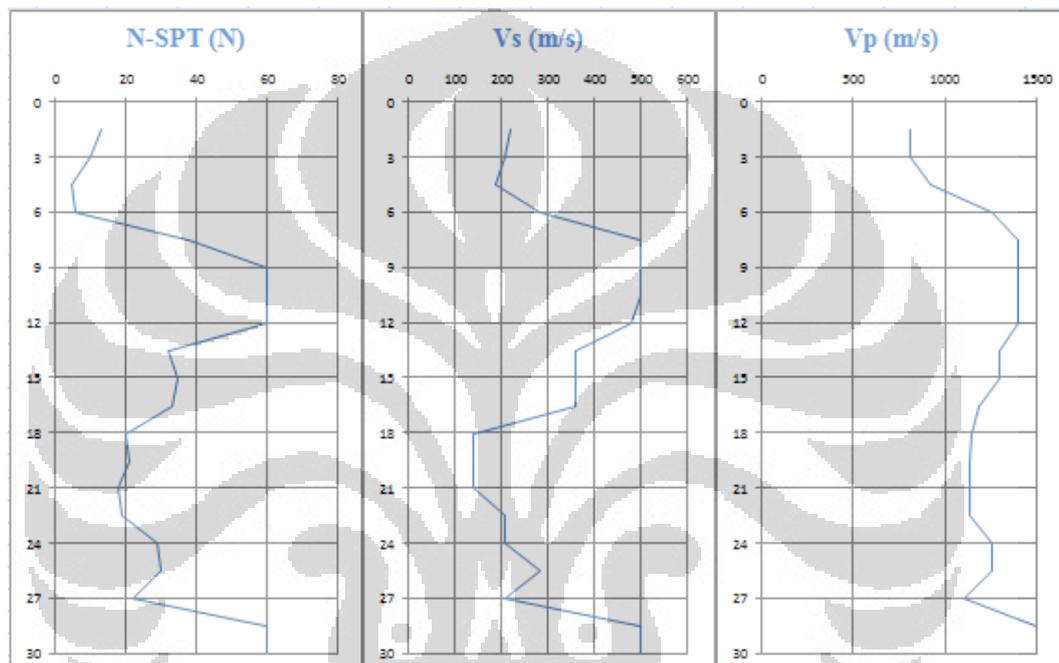


Variabel 3 (Struktur 27 Lantai)

Gambar 3. 2 Modelisasi Variabel Struktur

3.3. Data Input Material Tanah

Tanah pada sekeliling bangunan dimodelkan dengan *linear solid 3D element*, input data yang dibutuhkan adalah properti linear element yaitu modulus elastisitas (E) dan poisson ratio (μ). Nilai tersebut didapatkan dari properti tanah awal seperti ditunjukkan oleh gambar 3.2.



Gambar 3. 3 Properti Tanah

Data diatas lalu diolah untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dan poisson ratio tanah. Persamaan 3.1) dan persamaan 3.2) dibawah ini digunakan untuk mendapat nilai poisson ratio (μ) dan modulus geser tanah (G). Berat jenis tanah diasumsikan sama sebesar $1,6 \text{ kN/m}^3$. Dari nilai poisson ratio dan modulus geser tanah dapat diperoleh nilai modulus elastisitas tanah melalui persamaan 3.3).

$$\mu = \frac{1-2(Vs/Vp)^2}{2(1-(Vs/Vp)^2)} \quad (3.1)$$

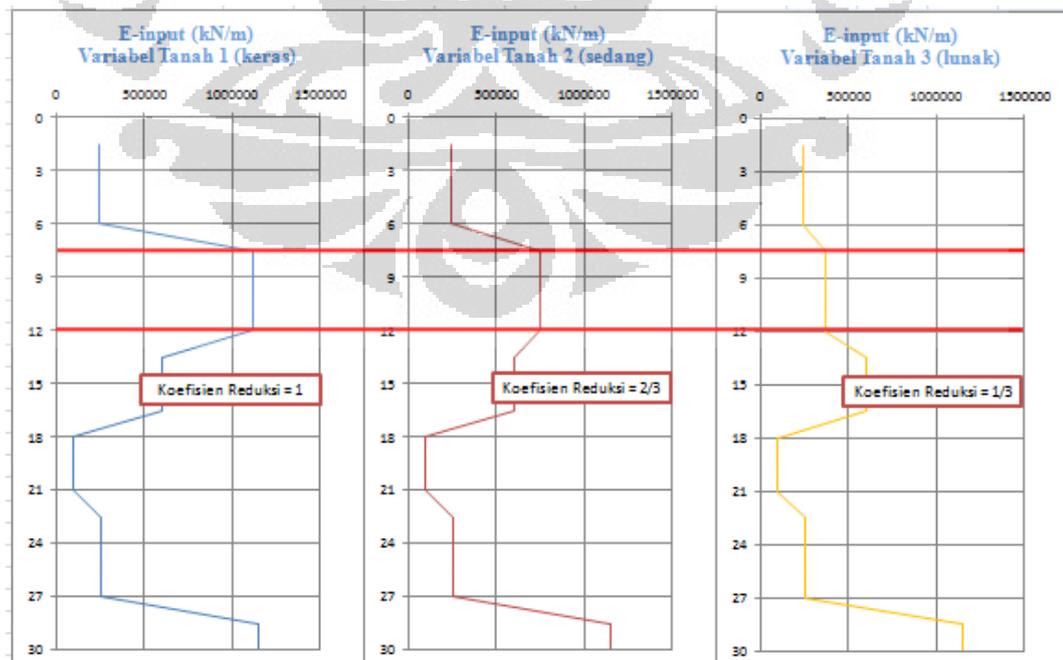
$$G = 1.6 \times Vs^2 \quad (3.2)$$

$$E = 2.G.(1 + \mu) \quad (3.3)$$

Hasil data yang diolah lalu dikelompokkan menjadi 6 kelompok. Dimana masing – masing kelompok menggambar layer tanah yang akan dimodelkan. Setelah itu, data tanah dikelompokkan kembali dengan memberikan suatu koefisien reduksi pada tanah layer dua, dimana pada layer tersebut pondasi MAT struktur berada. Ketiga variasi tersebut yaitu :

1. Variabel tanah 1 (keras) dengan koefisien reduksi pada layer dua yaitu 1
2. Variabel tanah 2 (sedang) dengan koefisien reduksi pada layer dua yaitu 2/3
3. Variabel tanah 3 (lunak) dengan koefisien reduksi pada layer dua yaitu 1/3.

Nilai input modulus elastisitas yang digunakan ditunjukkan oleh grafik 3.2. Sementara hasil perhitungan lengkap dari data tanah yang digunakan ditunjukkan oleh tabel 3.2.



Gambar 3. 4 Input Modulus Elastisitas Tanah

Depth	μ (Empiris)	G (kPa)	E (kPa)	Layer	Tebal	E-input (kN/m)		
						Variabel Tanah 1 (Keras)	Variabel Tanah 1 (Sedang)	Variabel Tanah 1 (Lunak)
1.5	0.46	77440	226234	1	6	246626	246626	246626
3	0.46	70560	206662			246626	246626	246626
4.5	0.48	57760	170736			246626	246626	246626
6	0.47	129960	382872			246626	246626	246626
7.5	0.43	400000	1141520	2	6	1120344	746896	373448
9	0.43	400000	1141520			1120344	746896	373448
10.5	0.43	400000	1141520			1120344	746896	373448
12	0.43	368640	1056813			1120344	746896	373448
13.5	0.46	207360	604858	3	4.5	603570	603570	603570
15	0.46	207360	604858			603570	603570	603570
16.5	0.45	207360	600996			603570	603570	603570
18	0.49	31360	93608	4	4.5	93603	93603	93603
19.5	0.49	31360	93600			93603	93603	93603
21	0.49	31360	93600			93603	93603	93603
22.5	0.48	70560	209202	5	6	252700	252700	252700
24	0.49	70560	209664			252700	252700	252700
25.5	0.47	129960	382872			252700	252700	252700
27	0.48	70560	209061			252700	252700	252700
28.5	0.44	400000	1150000	6	3	1150000	1150000	1150000
30	0.44	400000	1150000			1150000	1150000	1150000

Tabel 3.2 Hasil Pengolahan Data Tanah Untuk Input Data Material di Model

3.4. Pembebanan Pada Struktur

Pada analisis ini digunakan hanya tiga kategori pembebanan, yaitu beban mati, beban hidup, dan beban gempa.

1. Beban mati pada pelat lantai

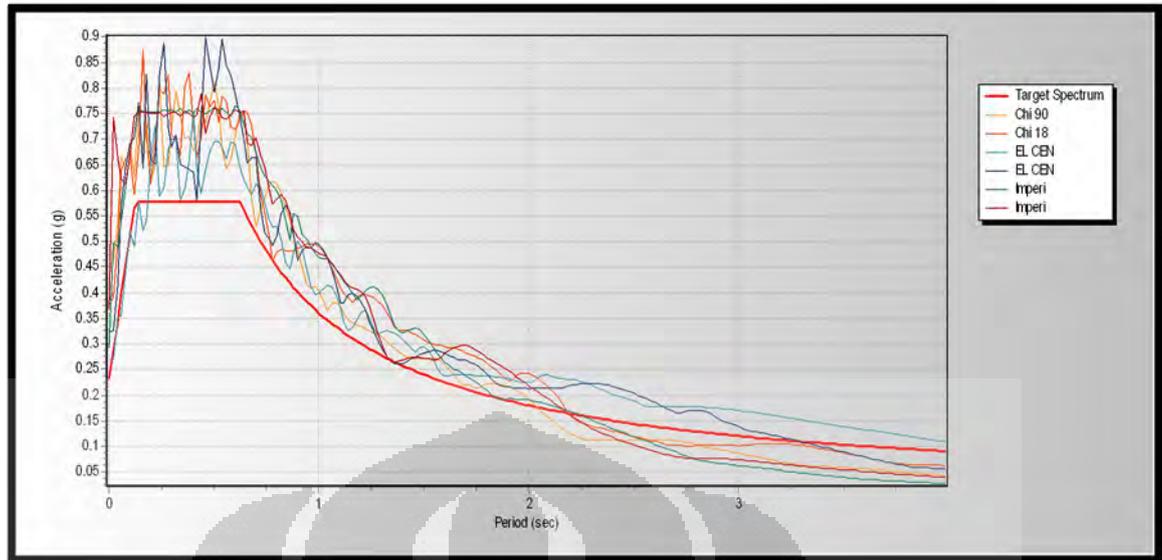
Adukan dengan tebal 4 cm : $4 \times 21 \text{ kg/m}^2$	$= 84 \text{ Kg/m}$
Lantai keramik tebal 7 mm : $0.7 \times 24 \text{ kg/m}^2$	$= 16.8 \text{ kg/m}^2$
Penutup langit – langit dan penggantung	$= 18 \text{ kg/m}^2$
Mekanikal dan elektrik	$= 20 \text{ kg/m}^2$
SDL	$= 1.4 \text{ kN/m}^2$
2. Beban hidup pada pelat lantai LL $= 2.5 \text{ kN/m}^2$
3. Beban mati partisi $= 1 \text{ kN/m}$

Dalam RSNI Gempa 201X dijelaskan bahwa minimal yang dipakai adalah tiga rekam gempa rekaman gerakan tanah akibat gempa yang didapat di suatu lokasi yang mirip kondisi geologi, topografi dan seismotektoniknya dengan lokasi tempat struktur gedung yang ditinjau berada. Jika rekaman yang didapatkan tidak mencukupi, maka diijinkan untuk menggunakan rekaman gempa buatan yang disesuaikan dengan kondisi struktur berada.

Pada penelitian ini akan digunakan tiga rekaman gempa dengan masing – masing arah East – West (EW) dan North – South (NS), rekaman gempa tersebut adalah :

1. Rekaman Gempa Chi - Chi
2. Rekaman Gempa El – Centro
3. Rekaman Gempa Imperial Valley

Rekaman gempa tersebut disesuaikan dengan respon spectrum Jakarta ($S_s = 0.65$ dan $S_1 = 0.25$) dengan klasifikasi tanah sedang. Software yang digunakan untuk proses *spectral matching* adalah *SeismoMatch* dari SeismoSoft. Setelah proses *matching* dilakukan, rekaman gempa tersebut di *scale up* sampai nilai respon spectrumnya berada diatas respon spectrum Jakarta. Hasil penyesuaian spectrum rekaman gempa ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 3. 5 Hasil Dari *Scale Up* dan *Spectral Matching* Dari Rekaman Gempa

3.5. Parameter yang Akan Dievaluasi

Parameter – parameter yang akan dievaluasi dari analisa struktur bangunan atas yaitu :

1. Periode getar alami struktur.
2. Gaya gempa yang terjadi (*seismic force*)
3. Gaya geser tiap tingkat (*story shear*)
4. Momen guling
5. Simpangan struktur (*displacement*)
6. Dan *story drift*.

BAB IV

ANALISA DATA

IV.1 Pendahuluan

Pada bab ini akan dilakukan analisa struktur dari keluaran program SAP2000. Analisa tersebut mencakup analisa periode getar struktur, *seismic force*, *story shear*, momen guling simpangan struktur, dan *story drift* yang terjadi.

Struktur yang dianalisa yaitu :

1. Struktur 9 lantai dengan 2 basement yang dimodelisasi dengan perletakan jepit dan struktur yang dimodelisasi beserta tanah disekelilingnya, dimana tanah yang dimodelisasi dibeda – bedakan nilai modulus elastisitasnya sehingga menjadi 3 variabel yaitu properti tanah variabel 1 (keras), tanah variabel 2 (sedang), dan properti tanah variabel 3 (lunak).
2. Struktur 18 lantai dengan 2 basement yang dimodelisasi dengan perletakan jepit dan struktur yang dimodelisasi beserta tanah disekelilingnya, dimana tanah yang dimodelisasi dibeda – bedakan nilai modulus elastisitasnya sehingga menjadi 3 variabel yaitu properti tanah variabel 1 (keras), tanah variabel 2 (sedang), dan properti tanah variabel 3 (lunak).
3. Struktur 27 lantai dengan 2 basement yang dimodelisasi dengan perletakan jepit dan struktur yang dimodelisasi beserta tanah disekelilingnya, dimana tanah yang dimodelisasi dibeda – bedakan nilai modulus elastisitasnya sehingga menjadi 3 variabel yaitu properti tanah variabel 1 (keras), tanah variabel 2 (sedang), dan properti tanah variabel 3 (lunak).

IV.2 Analisa Struktur

IV.2.1 Struktur 9 Lantai

IV.2.1.1 Waktu Getar Alami

Waktu getar alami struktur merupakan karakteristik penting yang ada dalam struktur, perubahan waktu getar alami yang terjadi akibat asumsi dalam modelisasi yang berbeda dapat mengubah respon struktur terhadap gempa.

Berikut dilampirkan tabel periode getar struktur dari beberapa asumsi perletakan yang dilakukan :

Tabel 4.1. Periode Getar Struktur 9 lantai

<i>Variabel</i>	<i>Periode (Detik)</i>	
	<i>Mode 1</i>	<i>Mode 2</i>
Perletakan Jepit	1.267	1.012
Tanah Variabel 1 (Keras)	1.267	0.999
Tanah Variabel 2 (Sedang)	1.268	0.999
Tanah Variabel 3 (Lunak)	1.269	1

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa tidak terjadi banyak perbedaan pada periode getar struktur pada peletakan jepit dengan struktur yang mempertimbangkan efek *SSI* untuk semua variabel tanah. Hal ini dikarenakan deformasi yang terjadi pada tanah cukup kecil, sehingga efek *inertia interaction* tidak terlalu mempengaruhi struktur.

IV.2.1.2 *Seismic Force*

Pada karya tulis ini, analisa struktur dilakukan dengan analisa dinamik *Linear Time History* dimana gempa yang diberikan merupakan gempa buatan dari rekaman gempa Chi – Chi, Imperial Valley, dan El-Centro. Pada rekaman gempa ini, dilakukan proses pengesuaian (*matching*) dengan respon spektrum tanah di Jakarta agar sesuai dengan kondisi di Indonesia.

Pada analisa gempa *linear time history*, gaya seismic gempa yang masuk ke lantai dianalisis dari output program SAP2000. Nilai gaya – gaya tersebut ditunjukkan di bawah ini:

Tabel 4.2. Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 9 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Seismic Force Chi – Chi EW (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
9	87.17	9	92.35	9	94.813	9	98.593
8	-24.72	8	-20.914	8	-18.273	8	-14.273
7	-191.954	7	-195.457	7	-196.43	7	-192.5466
6	-398.012	6	-391.849	6	-392.32	6	-381.6894
5	-580.034	5	-580.65	5	-566.39	5	-569.797
4	-698.92	4	-697.4	4	-706.62	4	-705.667
3	-698.66	3	-716.55	3	-718.88	3	-721.786
2	-579.79	2	-593.532	2	-609.115	2	-621.059
1	-379.33	1	-384.218	1	-383.755	1	-402.045

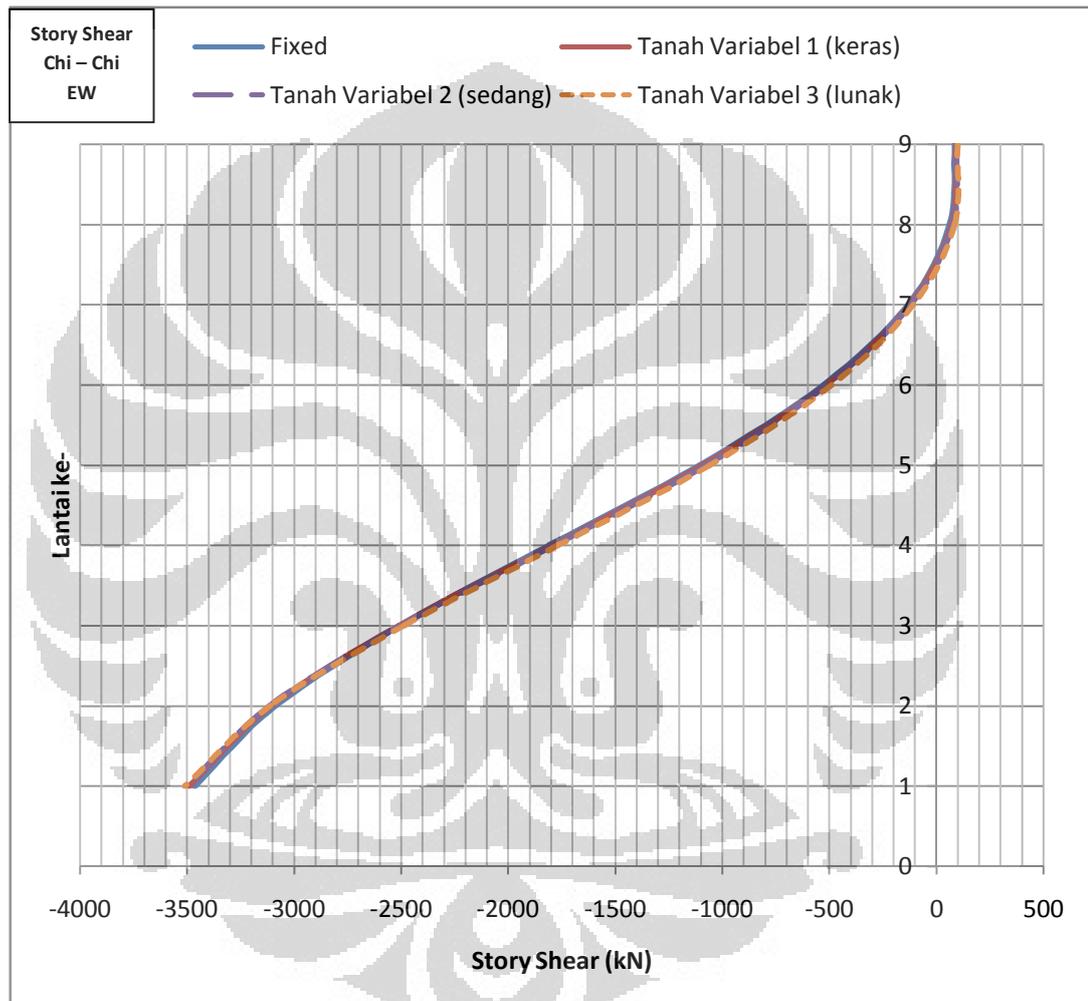
Tabel 4.3. Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 9 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Seismic Force Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
9	-676.456	9	-600.54	9	-602.453	9	-623.0322
8	-778.394	8	-712.87	8	-722.625	8	-723.7548
7	-626.776	7	-598.82	7	-601.725	7	-620.178
6	-508.451	6	-499.156	6	-499.777	6	-495.451
5	-403.073	5	-411.054	5	-418.818	5	-412.749
4	-323.95	4	-352.37	4	-343.032	4	-337.465
3	-284.4	3	-317.45	3	-313.28	3	-307.52
2	-264.85	2	-279.46	2	-277.69	2	-278.45
1	-220.11	1	-197.49	1	-178.38	1	-213.66

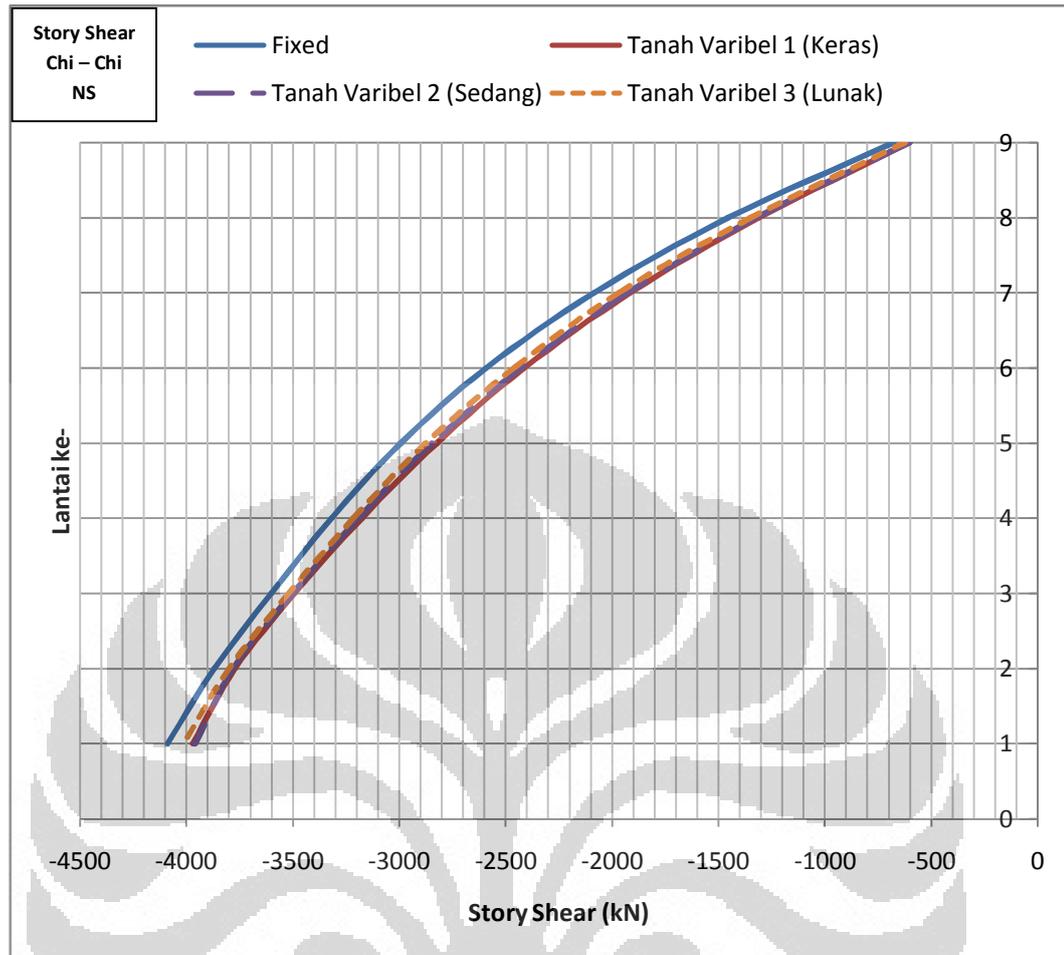
Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa struktur yang mempertimbangkan efek SSI untuk semua variabel, memiliki besaran gaya gempa yang hampir sama dengan struktur perletakan jepit, dan perbedaan yang dihasilkan nilainya tidak terlalu besar.

IV.2.1.3 *Story Shear*

Story Shear merupakan nilai kumulatif dari *seismic force* yang terjadi tiap lantai. Besarnya nilai *story shear* cukup penting untuk dianalisa karena akan menyangkut proses design struktur. Hasil keluaran SAP2000 untuk *story shear* yang terjadi pada arah EW dan NS ditampilkan pada grafik dibawah ini :



Gambar 4. 1 *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

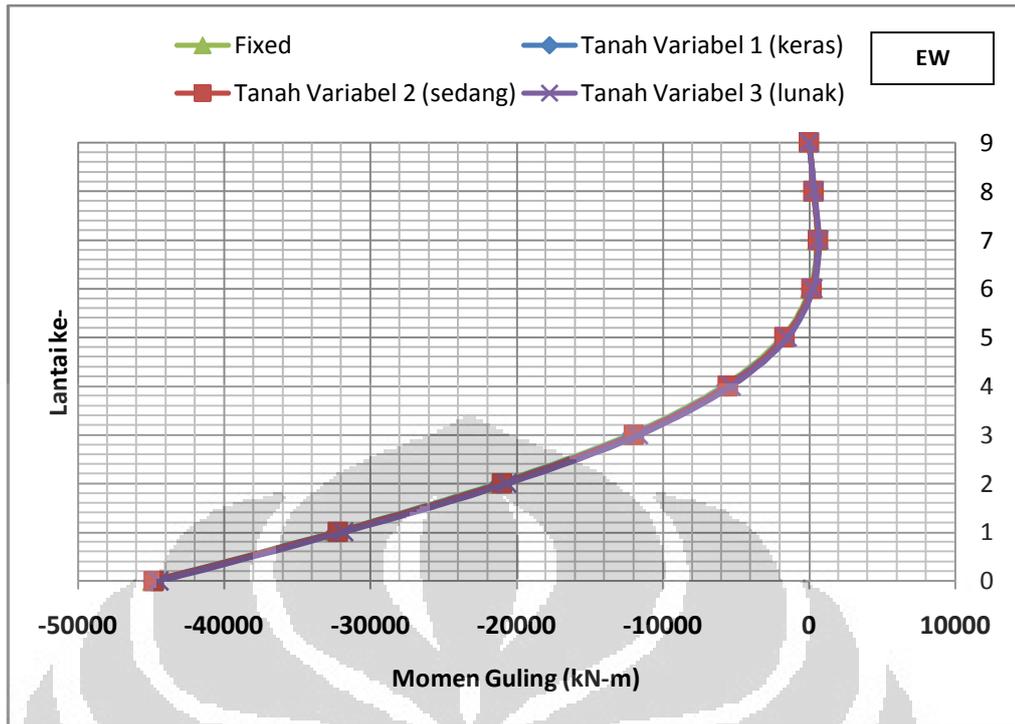


Gambar 4. 2 *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

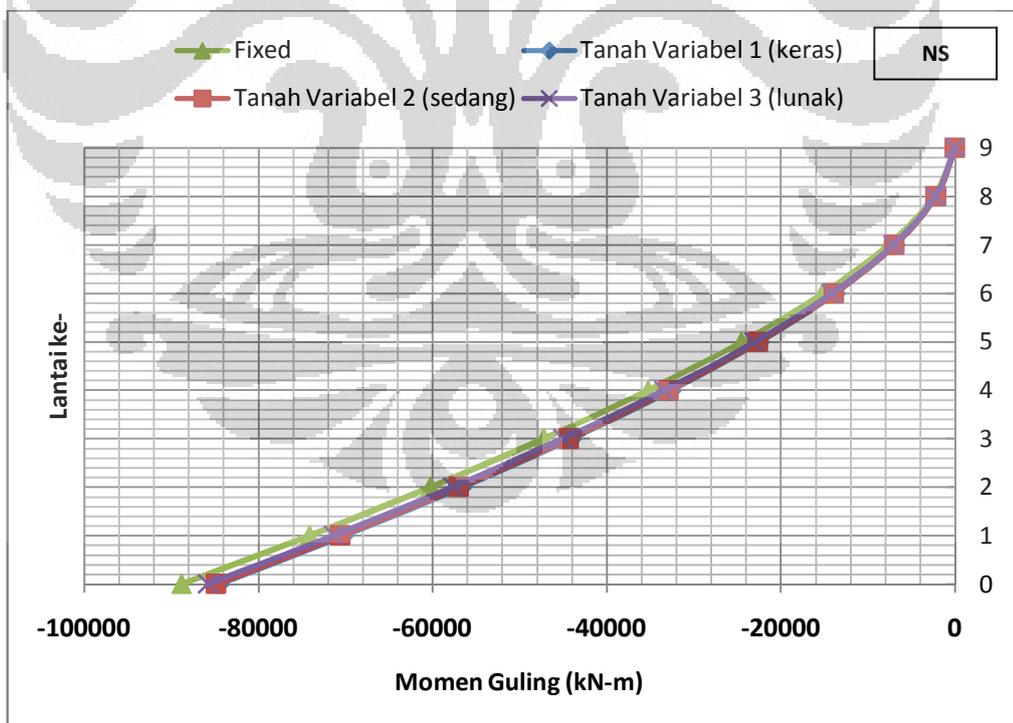
Dari kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa tidak banyak perbedaan gaya geser lantai antara struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan SSI. Namun, nilai gaya geser lantai pada struktur dengan perletakan jepit lebih besar jika dibandingkan struktur dengan SSI.

IV.2.1.4 Momen Guling

Analisa momen guling pada struktur dilakukan untuk membandingkan pengaruh dari asumsi peletakan yang digunakan. Hasil keluaran SAP2000 untuk struktur 9 lantai ditunjukkan oleh grafik dibawah ini :



Gambar 4. 3 Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

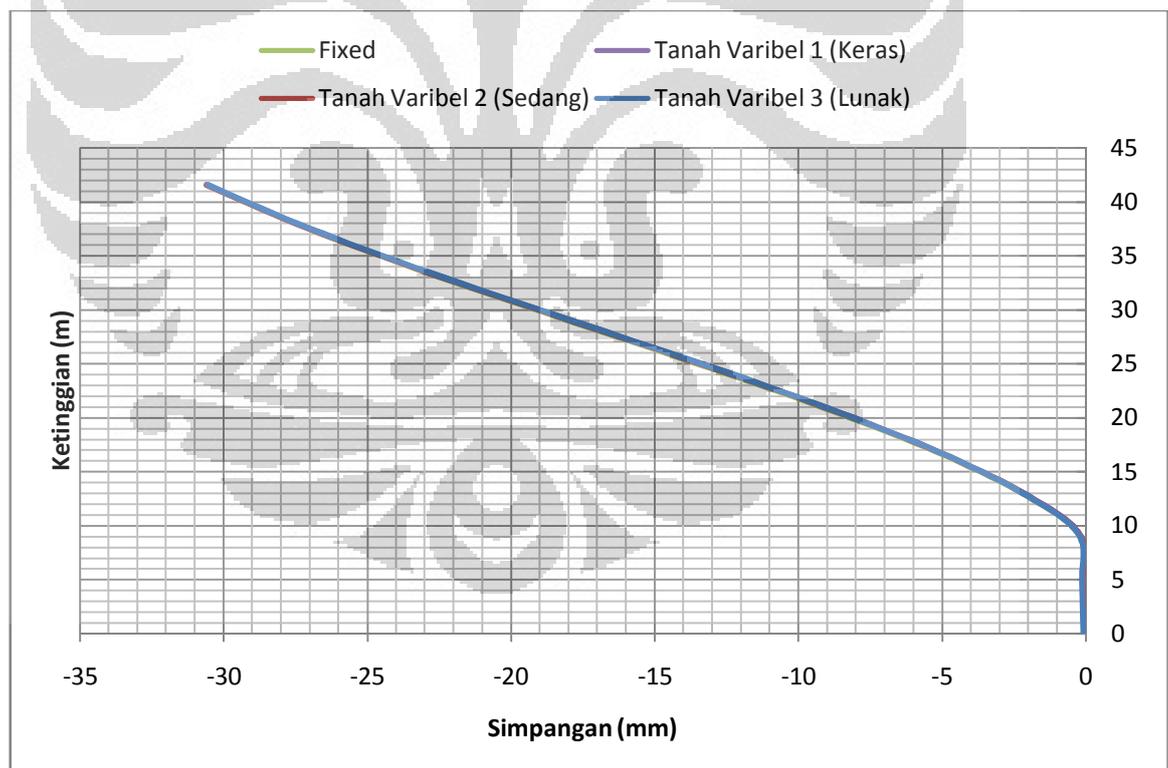


Gambar 4. 4 Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

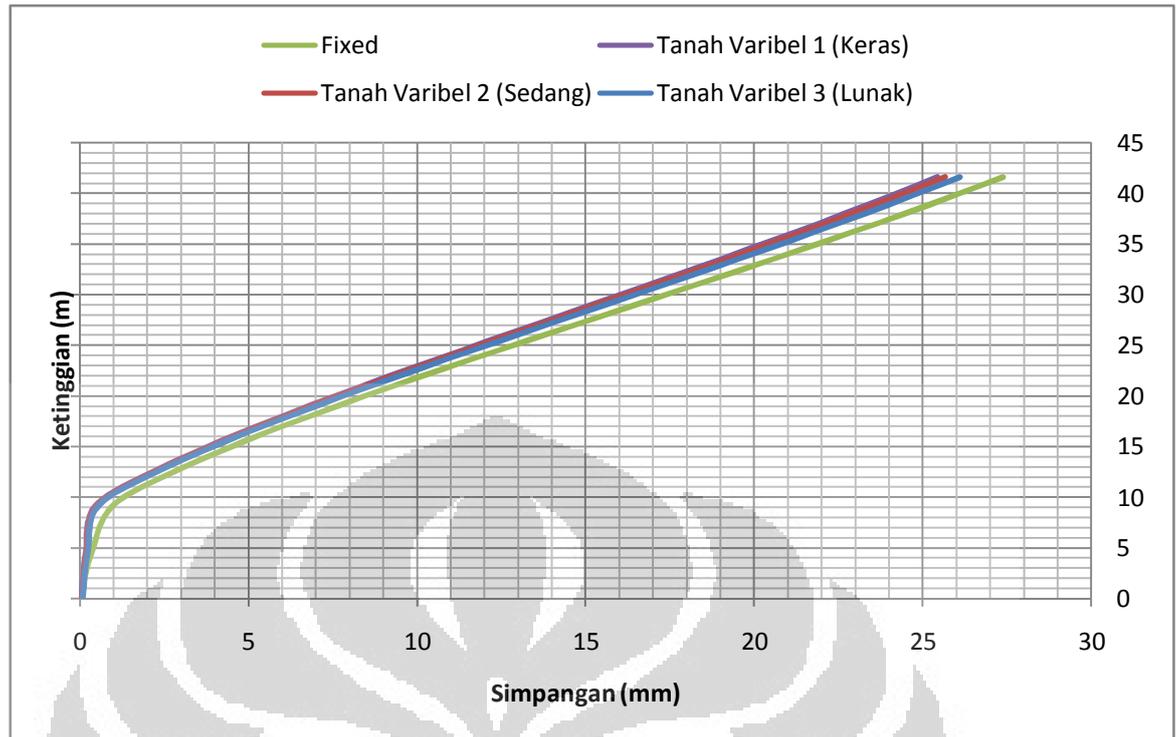
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa momen guling yang terjadi antara struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI untuk semua variabel tanah hampir sama, dimana garis pada grafik untuk semua variabel berimpit. Hal ini dapat dipahami mengingat nilai *story shear* pada struktur perletakan jepit hanya berbeda sedikit dengan struktur yang memperhatikan efek SSI.

IV.2.1.5 Simpangan Struktur

Simpangan struktur terhadap gaya gempa harus dikontrol karena dapat membuat gedung menjadi tidak nyaman untuk dihuni. Selain itu, simpangan struktur yang terlalu besar dapat membuat gaya tambahan terhadap struktur akibat dari efek $P-\Delta$. Hasil dari analisis yang dilakukan SAP2000 terhadap model yang ditinjau mengenai simpangan struktur diolah dan ditunjukkan pada grafik di bawah ini :



Gambar 4. 5 Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.

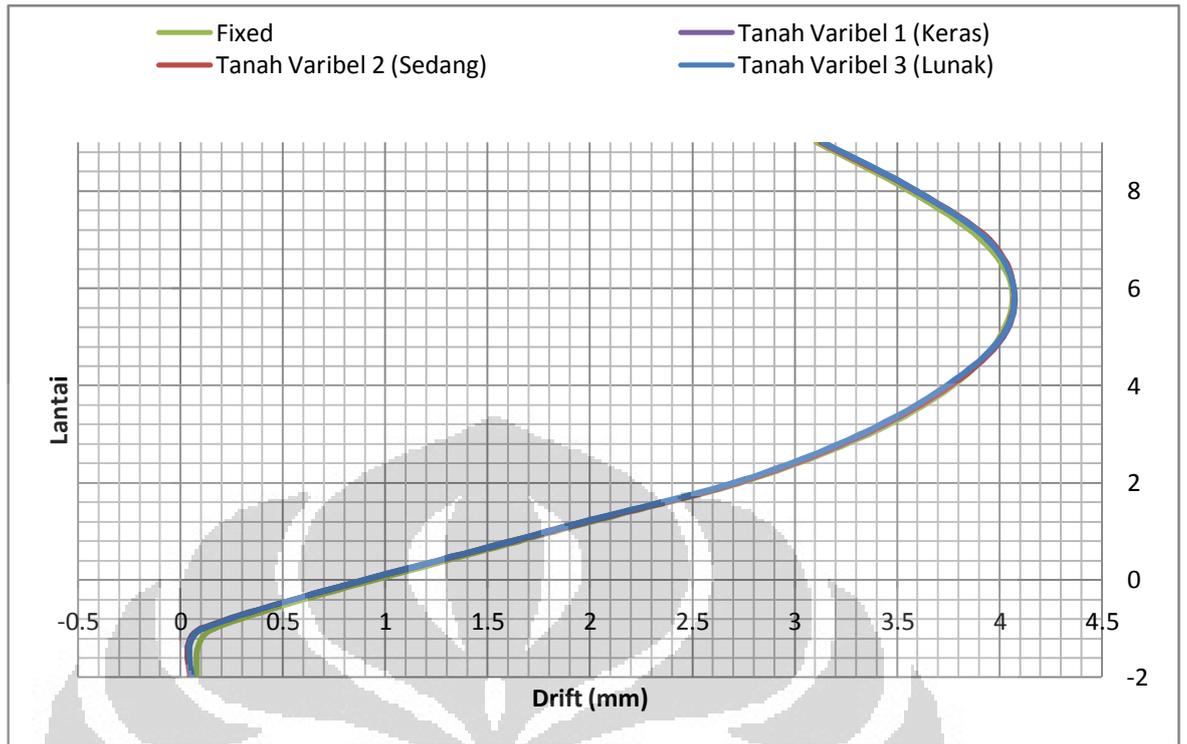


Gambar 4. 6 Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap. Nilai simpangan

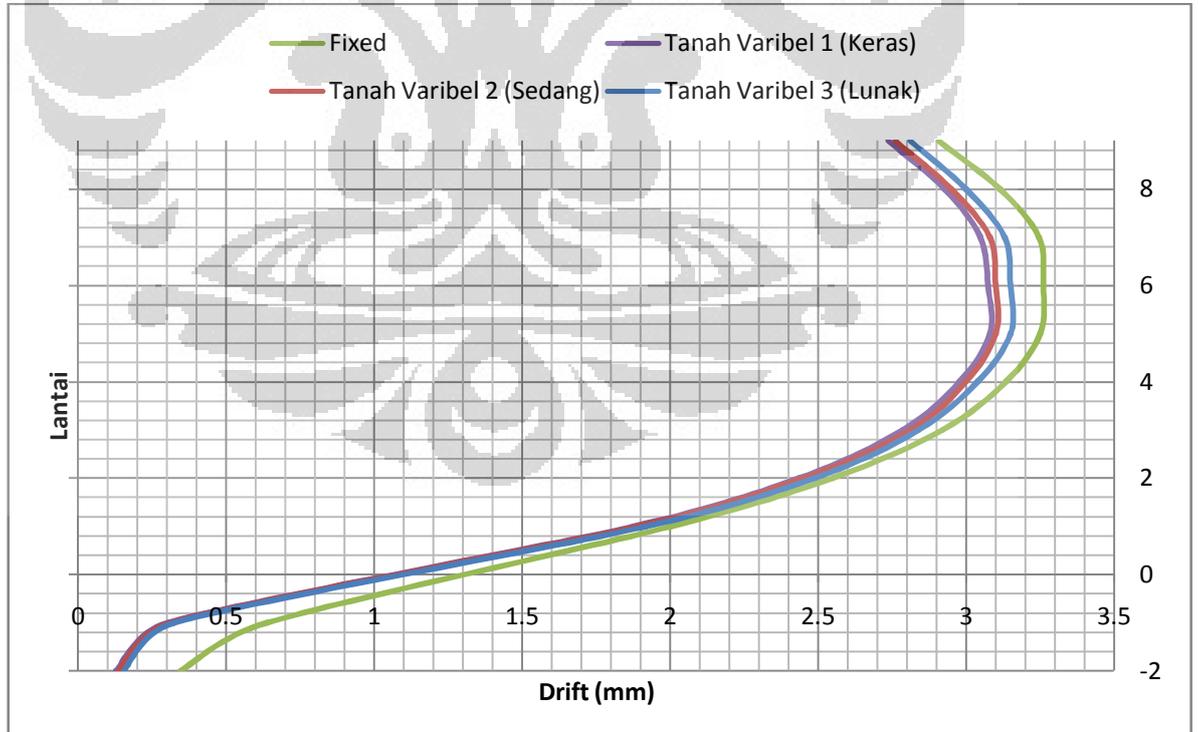
Nilai simpangan yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI berimpit untuk arah EW dan memiliki perbedaan untuk arah NS. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki simpangan yang lebih besar dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh dari kekangan tanah pada sekeliling basement lebih besar dibandingkan pengaruh dari deformasi pada tanah di bawah pondasi. Akibat tidak adanya kekangan tanah pada sekeliling basement di perletakan jepit, nilai deformasi yang terjadi pada perletakan tersebut akan lebih besar.

IV.2.1.6 *Story Drift*

Story drift adalah simpangan lantai struktur relatif terhadap lantai dibawahnya. Nilai *story drift* yang terjadi dapat mengidentifikasi gaya geser yang terjadi pada kolom. Selain itu, *story drift* juga dapat dijadikan acuan awal apakah diperlukannya analisa $P-\Delta$. *Story drift* pada struktur 9 lantai akibat gempa Chi – Chi ditunjukkan pada grafik dibawah ini :



Gambar 4. 7 *Story Drift* Arah Memanjang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi
EW Pada Struktur 9 Lantai



Gambar 4. 8 *Story Drift* Arah Melintang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi
NS Pada Struktur 9 Lantai

Nilai *story drift* yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI berimpit untuk arah EW, sementara pada arah NS mengalami perbedaan. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki *story drift* yang lebih besar dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI.

IV.2.2 Struktur 18 Lantai

IV.2.2.1 Waktu Getar Alami

Berikut dilampirkan tabel periode getar struktur dari keluaran software SAP2000 untuk beberapa asumsi perletakan yang dilakukan :

Tabel 4.4. Periode Getar Struktur 18 lantai

<i>Variabel</i>	<i>Periode (Detik)</i>	
	<i>Mode 1</i>	<i>Mode 2</i>
Perletakan Jepit	2.244	2.03
Tanah Variabel 1 (Keras)	2.254	2.048
Tanah Variabel 2 (Sedang)	2.258	2.05
Tanah Variabel 3 (Lunak)	2.263	2.06

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan pada periode getar struktur pada peletakan jepit dan struktur yang mempertimbangkan efek SSI. Struktur pada perletakan jepit memiliki nilai periode yang lebih kecil dibandingkan dengan variabel lainnya. Hal ini dapat dipahami mengingat tanah yang dimodelkan dengan *solid element* dapat berdeformasi tergantung dengan properti materialnya. Semakin besar deformasi tanah yang terjadi, semakin besar nilai periode getar struktur tersebut.

IV.2.1.2 Seismic Force

Pada analisa gempa *linear time history*, gaya seismic gempa yang masuk ke lantai dianalisis dari output program SAP2000. Nilai gaya – gaya tersebut ditunjukkan di bawah ini:

Tabel 4.5. Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 18 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Seismic Force Chi – Chi EW (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
18	-244.86	18	-243.22	18	-243.81	18	-241.94
17	-255.3837	17	-259.55	17	-258.02	17	-257.708
16	-177.0833	16	-175.124	16	-175.358	16	-174.542
15	-89.067	15	-87.636	15	-87.282	15	-85.332
14	-5.926	14	-2.42	14	-1.16	14	-0.281
13	66.97	13	71.76	13	71.9	13	72.9842
12	113.113	12	121.63	12	123.86	12	123.2488
11	132.098	11	138.994	11	138.1	11	141.9136
10	116.589	10	122.119	10	124.868	10	127.0464
9	49.37	9	54.197	9	54.792	9	55.79
8	-28.63	8	-23.927	8	-21.6525	8	-18.803
7	-159.42	7	-153.663	7	-149.8275	7	-150.064
6	-302.39	6	-297.78	6	-296.29	6	-295.343
5	-437.05	5	-435.02	5	-435.75	5	-428.07
4	-533.32	4	-532.82	4	-534.76	4	-540.657
3	-560.713	3	-590.245	3	-587.501	3	-598.659
2	-544.717	2	-546.825	2	-564.609	2	-571.206
1	-426.72	1	-435.97	1	-441.51	1	-454.788

Tabel 4.6. Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 18 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

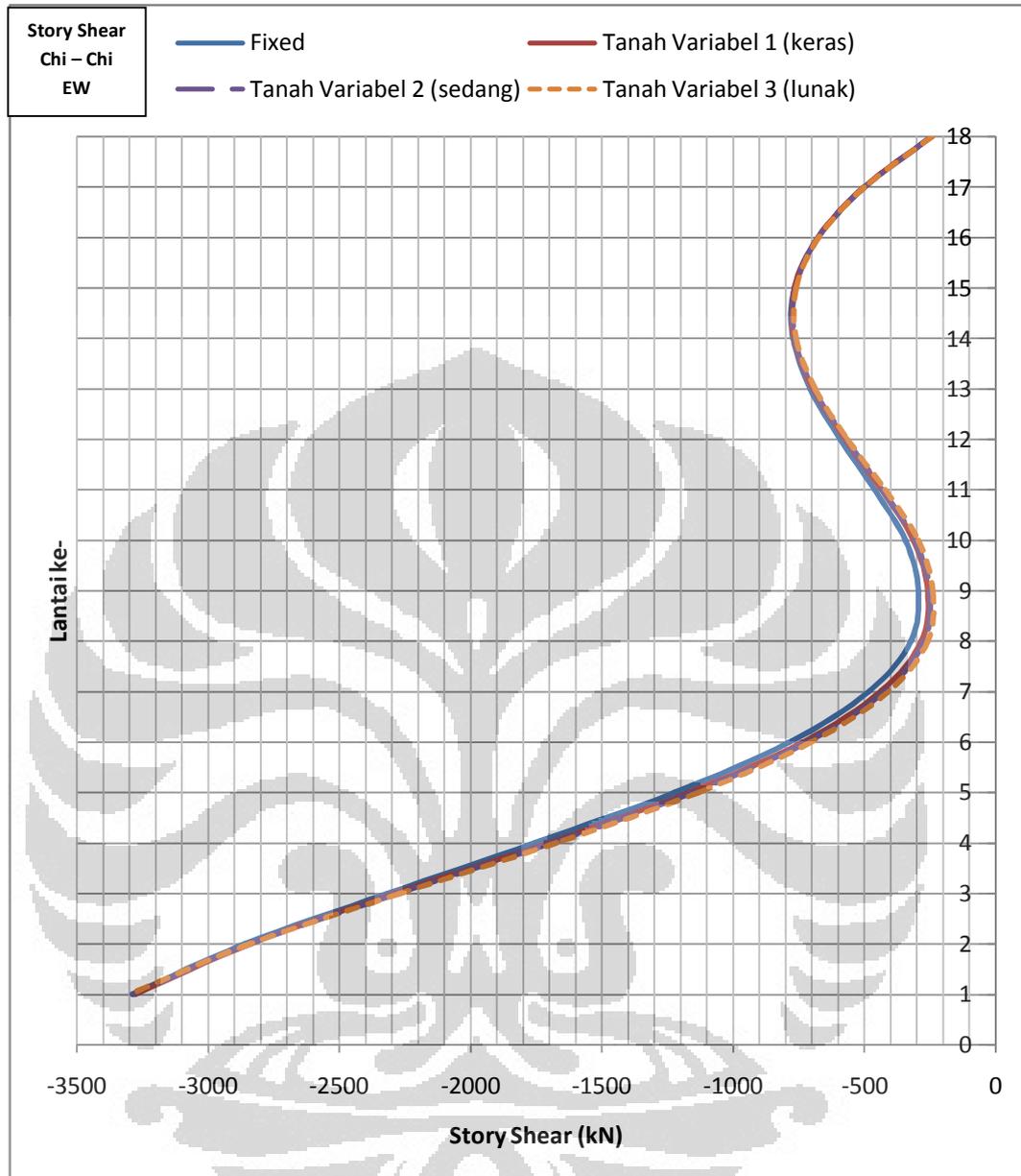
Seismic Force Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
18	170.77	18	174.26	18	170.299	18	165.116
17	184.526	17	188.57	17	184.281	17	176.439
16	140.4097	16	135.961	16	133.26	16	126.405
15	92.1243	15	81.738	15	79.78	15	76.03
14	38.081	14	26.061	14	23.86	14	20.78
13	-19.079	13	-35.29	13	-36.5	13	-39.329
12	-83.292	12	-103.18	12	-102.86	12	-103.311
11	-147.1	11	-173.55	11	-174.98	11	-172.92
10	-223.77	10	-245.594	10	-247.16	10	-246.455
9	-236.222	9	-258.1295	9	-255.65	9	-255.795

Seismic Force Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
8	-386.613	8	-410.4065	8	-405.16	8	-405.225
7	-472.131	7	-490.6	7	-493.336	7	-495.807
6	-524.055	6	-544.954	6	-545.084	6	-538.828
5	-566.752	5	-570.941	5	-575.043	5	-577.407
4	-568.067	4	-564.835	4	-574.262	4	-572.205
3	-562.65	3	-557.58	3	-549.695	3	-557.938
2	-523.11	2	-491.42	2	-501.68	2	-512.92
1	-426.89	1	-388.4	1	-393.62	1	-409.5

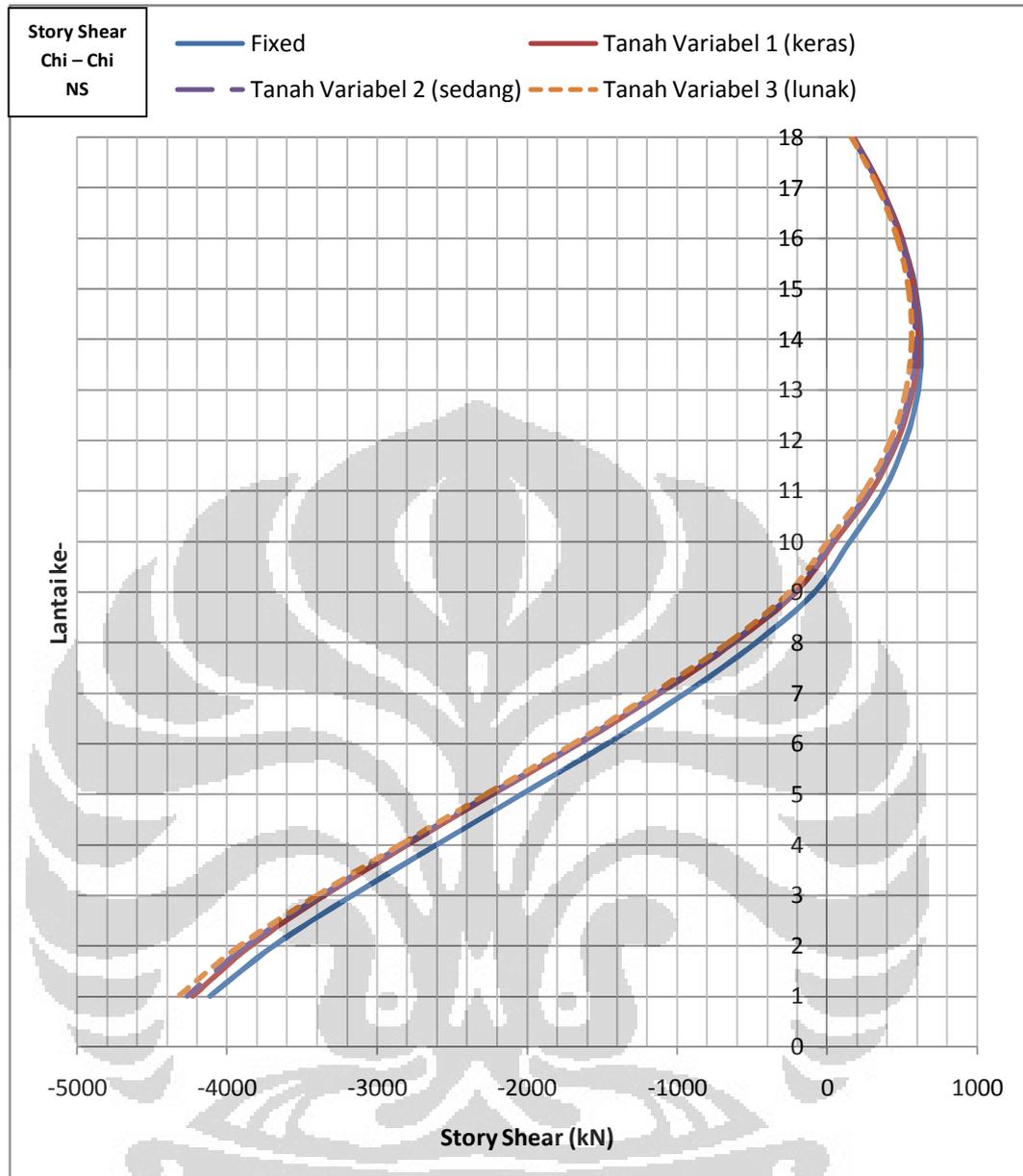
Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa struktur yang mempertimbangkan efek *SSI* memiliki nilai gaya gempa yang lebih kecil dibandingkan dengan struktur dengan perletakan jepit, walaupun perbedaannya cukup kecil.

IV.2.2.3 *Story Shear*

Story Shear merupakan nilai kumulatif dari seismic force yang terjadi tiap lantai. Hasil keluaran SAP2000 untuk *story shear* yang terjadi pada arah EW dan NS ditampilkan pada grafik dibawah ini :



Gambar 4. 9 *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

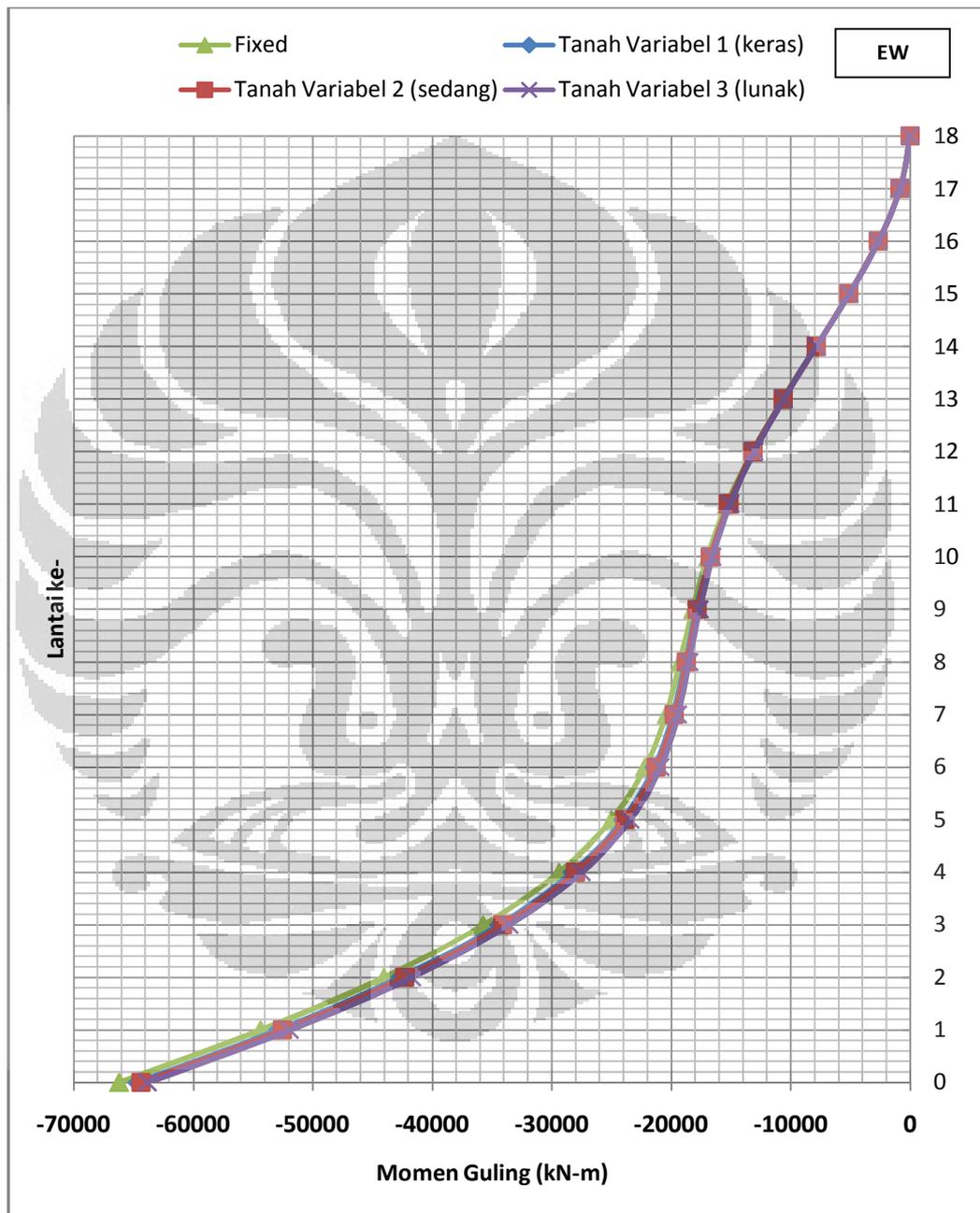


Gambar 4. 10 *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

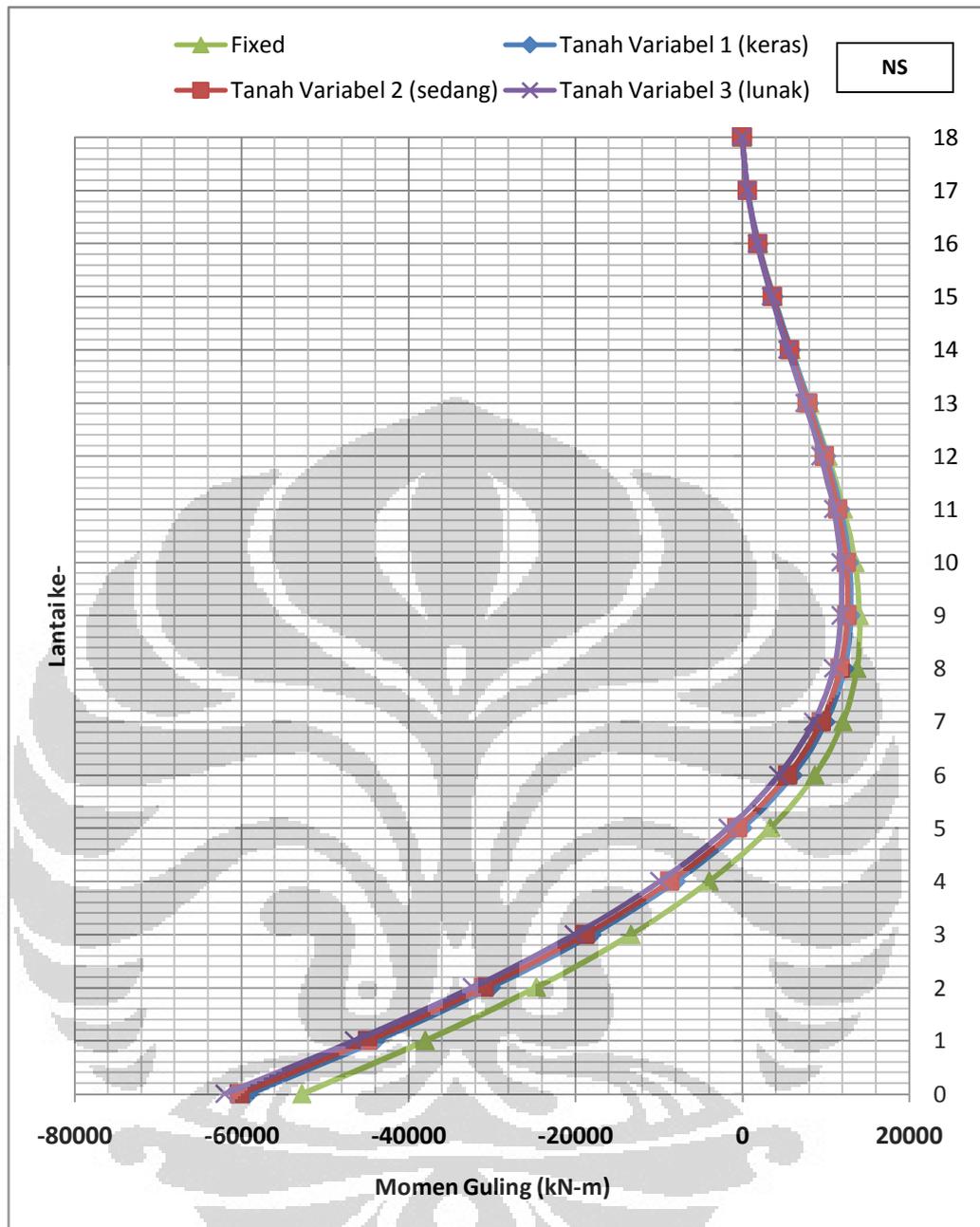
Dari kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai *story shear* yang terjadi akibat gempa EW tidak banyak perbedaan. Sementara itu, pada arah NS, perbedaan *story shear* untuk masing – masing variabel mulai terlihat. Nilai *story shear* untuk perletakan jepit lebih kecil dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI, walaupun nilainya tidak terlalu banyak perbedaan.

IV.2.2.4 Momen Guling

Analisa momen guling pada struktur dilakukan untuk membandingkan pengaruh dari asumsi peletakan yang dilakukan. Hasil keluaran SAP2000 untuk struktur 18 lantai ditunjukkan oleh grafik dibawah ini :



Gambar 4. 11 Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.



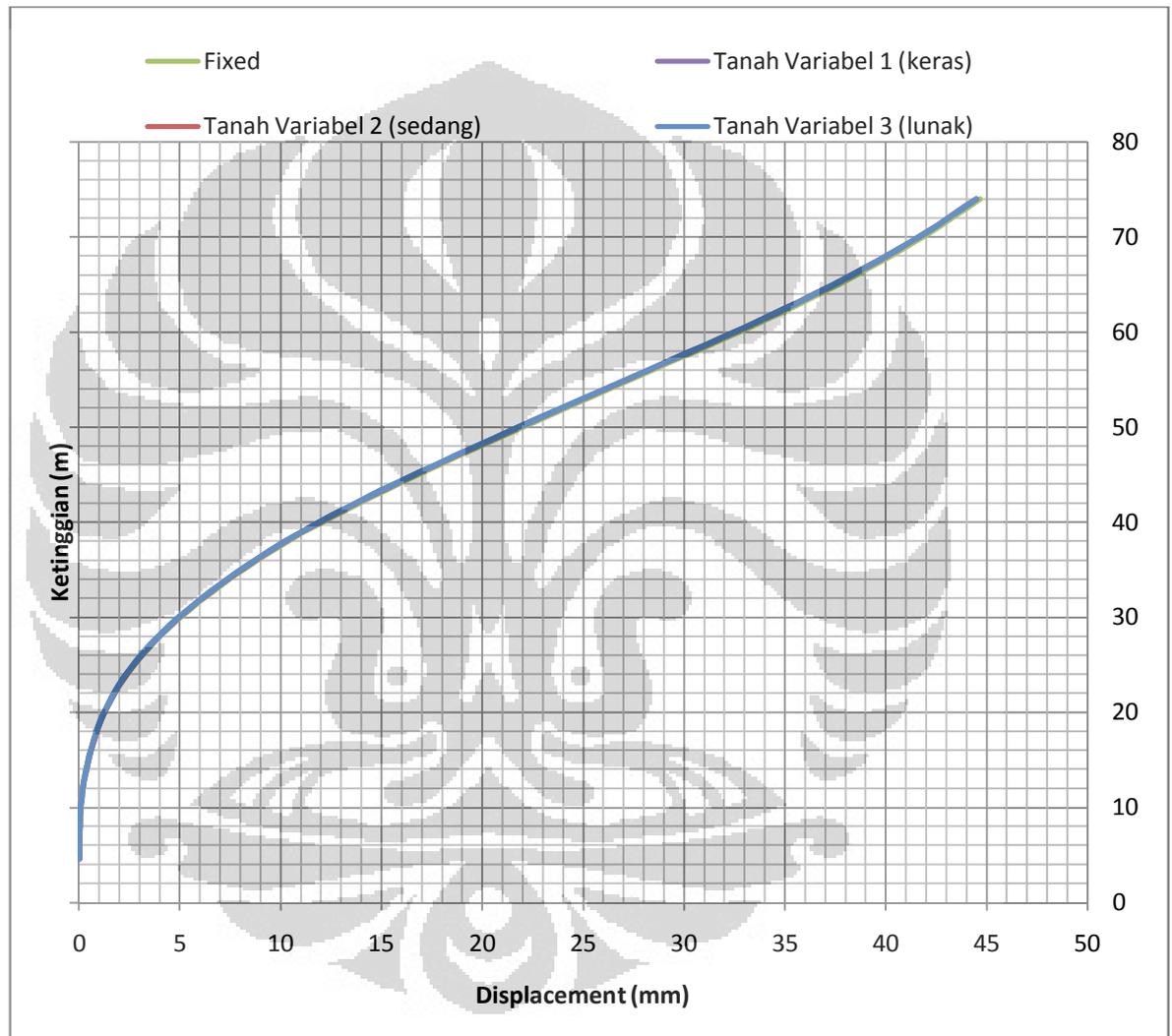
Gambar 4. 12 Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa momen guling yang terjadi antara struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI mengalami perbedaan terutama untuk peninjauan arah NS. Nilai momen guling pada struktur dengan perletakan jepit lebih kecil dibandingkan struktur dengan efek SSI.

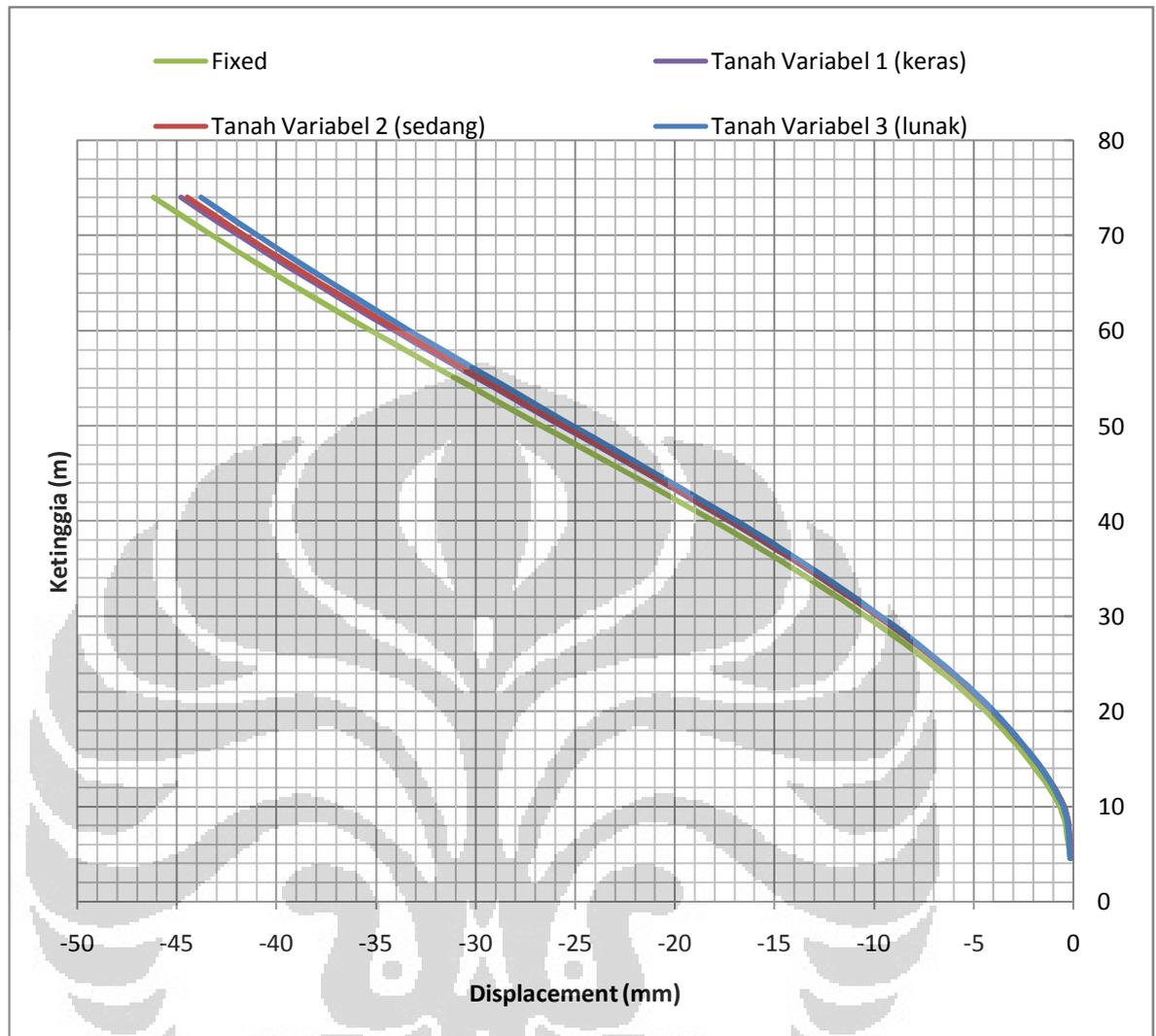
Sementara itu, perbandingan nilai momen guling untuk beberapa variabel tanah tidak menunjukkan banyak perbedaan.

IV.2.2.5 Simpangan Struktur

Hasil dari analisis yang dilakukan SAP2000 terhadap model struktur 18 lantai diolah dan ditunjukkan pada grafik berikut ini :



Gambar 4. 13 Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



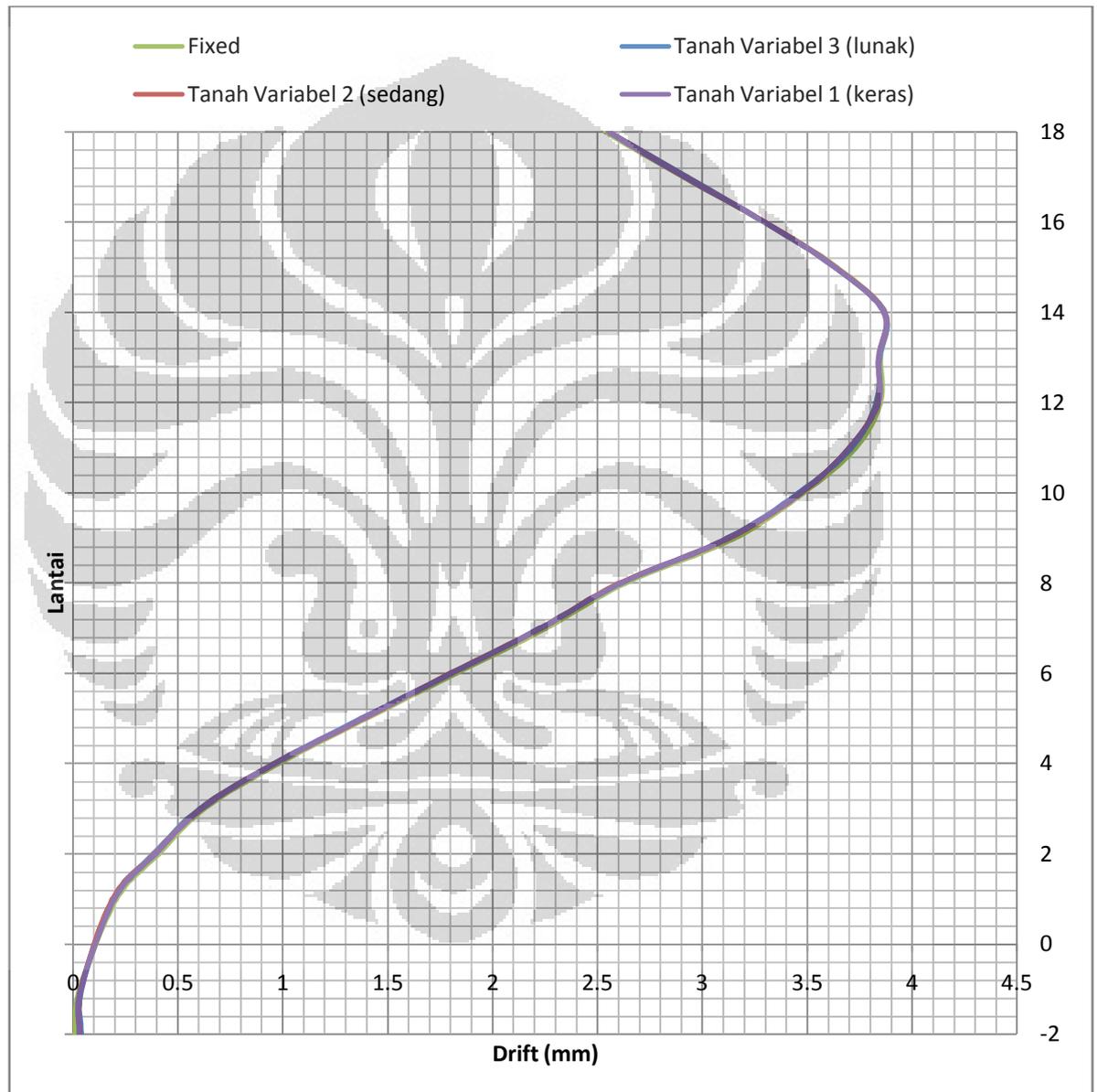
Gambar 4. 14 Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap. Nilai simpangan

Nilai simpangan yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI berimpit untuk arah EW dan memiliki perbedaan untuk arah NS. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki simpangan yang lebih besar dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh dari kekangan tanah pada sekeliling basement lebih besar dibandingkan pengaruh dari deformasi pada tanah di bawah pondasi. Akibat tidak adanya kekangan tanah pada sekeliling basement di perletakan jepit,

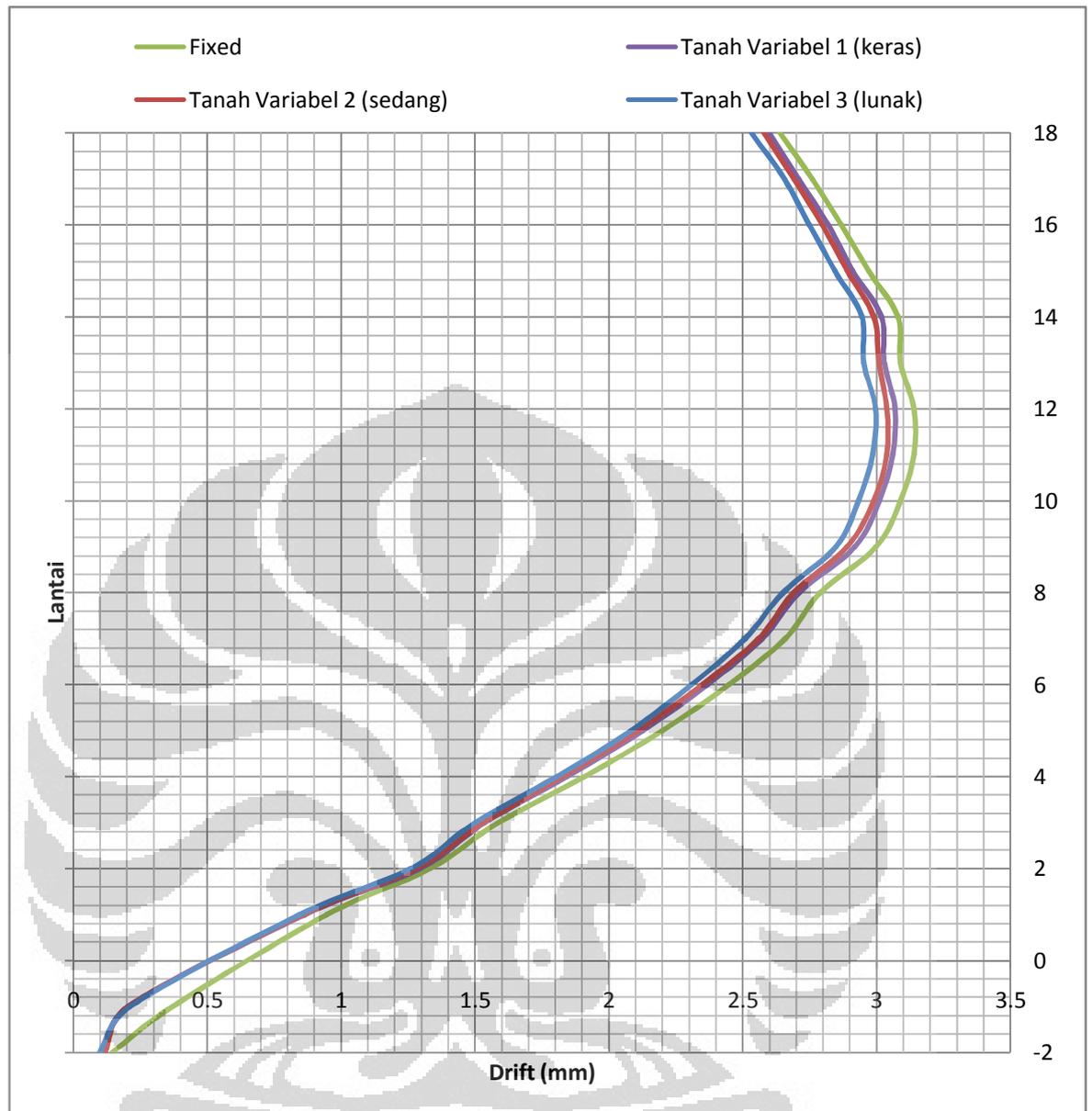
nilai deformasi yang terjadi pada perletakan tersebut akan lebih besar dibandingkan variabel lainnya.

IV.2.2.6 Story Drift

Story drift pada struktur 18 lantai akibat gempa Chi – Chi ditunjukkan pada grafik dibawah ini :



Gambar 4. 15 *Story Drift* Arah Memanjang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Pada Struktur 18 Lantai



Gambar 4. 16 *Story Drift* Arah Melintang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Pada Struktur 18 Lantai

Nilai *story drift* yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI berimpit untuk arah EW, sementara pada arah NS mengalami perbedaan. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki *story drift* yang lebih besar dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI.

IV.2.3 Struktur 27 Lantai

IV.2.3.1 Waktu Getar Alami

Berikut dilampirkan tabel periode getar struktur dari keluaran software SAP2000 untuk beberapa asumsi perletakan yang dilakukan :

Tabel 4.7. Periode Getar Struktur 27 lantai

<i>Variabel</i>	<i>Periode (Detik)</i>	
	<i>Mode 1</i>	<i>Mode 2</i>
Perletakan Jepit	3.255	3.110
Tanah Variabel 1 (Keras)	3.290	3.177
Tanah Variabel 2 (Sedang)	3.295	3.187
Tanah Variabel 3 (Lunak)	3.304	3.206

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan pada periode getar struktur pada peletakan jepit dan struktur yang mempertimbangkan efek SSI. Struktur pada perletakan jepit memiliki nilai periode yang lebih kecil dibandingkan dengan variabel lainnya. Hal ini dapat dipahami mengingat tanah yang dimodelkan dengan *solid element* dapat berdeformasi tergantung dengan properti materialnya. Semakin besar deformasi tanah yang terjadi pada modal analisis, semakin besar nilai periode getar struktur tersebut. Struktur dengan tanah variabel 3 (lunak) memiliki nilai periode getar yang paling lama.

IV.2.3.2 Seismic Force

Pada analisa gempa *linear time history*, gaya seismic gempa yang masuk ke lantai dianalisis dari output program SAP2000. Nilai gaya – gaya tersebut ditunjukkan di bawah ini :

Tabel 4.8. Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 27 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Seismic Force Chi – Chi EW (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
27	195.687	27	197.4	27	197.13	27	200.802
26	251.693	26	248.045	26	245.94	26	247.248
25	218.406	25	223.828	25	217.36	25	225.2934

Seismic Force Chi – Chi EW (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
24	204.594	24	202.757	24	202.38	24	204.9886
23	184.26	23	185.08	23	186.43	23	184.378
22	160.94	22	161.0503	22	157.04	22	159.934
21	139.38	21	140.4697	21	137.6	21	142.066
20	125.237	20	124.527	20	123.87	20	122.4
19	114.233	19	114.143	19	112	19	112.1675
18	89.41	18	91.51	18	89.75	18	90.8785
17	115.85	17	113.94	17	114.01	17	110.994
16	115.3	16	114.846	16	112.38	16	114.74
15	110.99	15	113.849	15	110.19	15	112.521
14	106.01	14	100.075	14	102.8	14	103.459
13	84.87	13	89.124	13	85.58	13	86.196
12	51.93	12	52.153	12	53.55	12	54.584
11	-0.195	11	-1.347	11	-0.515	11	1.83
10	-78.545	10	-79.98	10	-78.715	10	-74.86
9	-153.0155	9	-151.01	9	-143.367	9	-148.58
8	-299.5645	8	-305.05	8	-293.433	8	-293.97
7	-432.593	7	-432.57	7	-425.77	7	-429.59
6	-574.157	6	-578.38	6	-583.05	6	-571.21
5	-707.002	5	-732.55	5	-695.96	5	-720.414
4	-765.568	4	-764.91	4	-777.94	4	-768.902
3	-763.07	3	-759.86	3	-765.19	3	-781.234
2	-677.23	2	-692.51	2	-701.516	2	-708.418
1	-561.615	1	-588.2	1	-585.301	1	-597.484

Tabel 4.9. Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 27 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

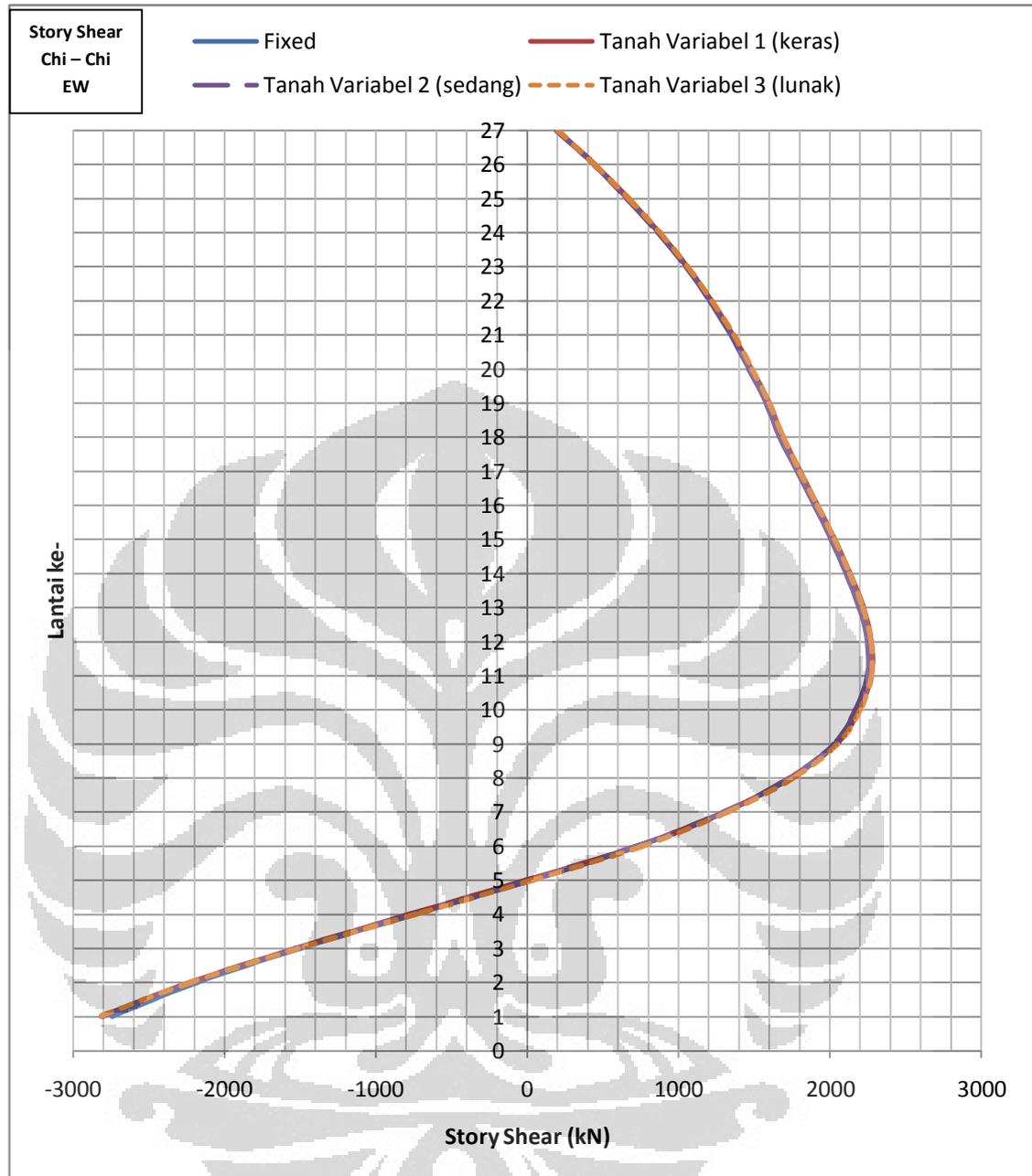
Seismic Force Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
27	175.34	27	155.912	27	154.48	27	152.18
26	219.5	26	195.292	26	195.053	26	192.0433
25	206.2785	25	181.892	25	178.027	25	177.4717
24	190.7215	24	170.682	24	167.61	24	162.0975
23	175.457	23	156.472	23	154.99	23	151.9675
22	151.9958	22	134.139	22	131.64	22	128.75
21	125.2019	21	110.491	21	107.43	21	104.74

Seismic Force Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
20	96.8043	20	82.95	20	80.85	20	78.06
19	67.191	19	54.748	19	52.49	19	49.236
18	28.732	18	20.71	18	19.65	18	16.984
17	6.1327	17	-2.838	17	-4.55	17	-7.995
16	-24.0947	16	-29.74	16	-31.9	16	-35.198
15	-49.094	15	-54.322	15	-55.54	15	-60.067
14	-68.842	14	-71.44	14	-71.12	14	-75.655
13	-81.2995	13	-80.898	13	-81.54	13	-85.902
12	-86.566	12	-85.138	12	-86.35	12	-91.313
11	-80.6564	11	-78.201	11	-78.63	11	-83.036
10	-62.0761	10	-57.155	10	-57.53	10	-61.722
9	-26.136	9	-20.016	9	-20.005	9	-24.346
8	10.5318	8	19.655	8	18.495	8	13.869
7	63.4482	7	73.078	7	71.88	7	67.24
6	129.62	6	143.0395	6	142.357	6	136.94
5	212.35	5	224.1375	5	227.143	5	219.845
4	284.61	4	298.6	4	290.79	4	294.087
3	354.547	3	362.338	3	365.98	3	356.283
2	395.603	2	414.202	2	410.99	2	411
1	434.67	1	428.12	1	433.66	1	439.316

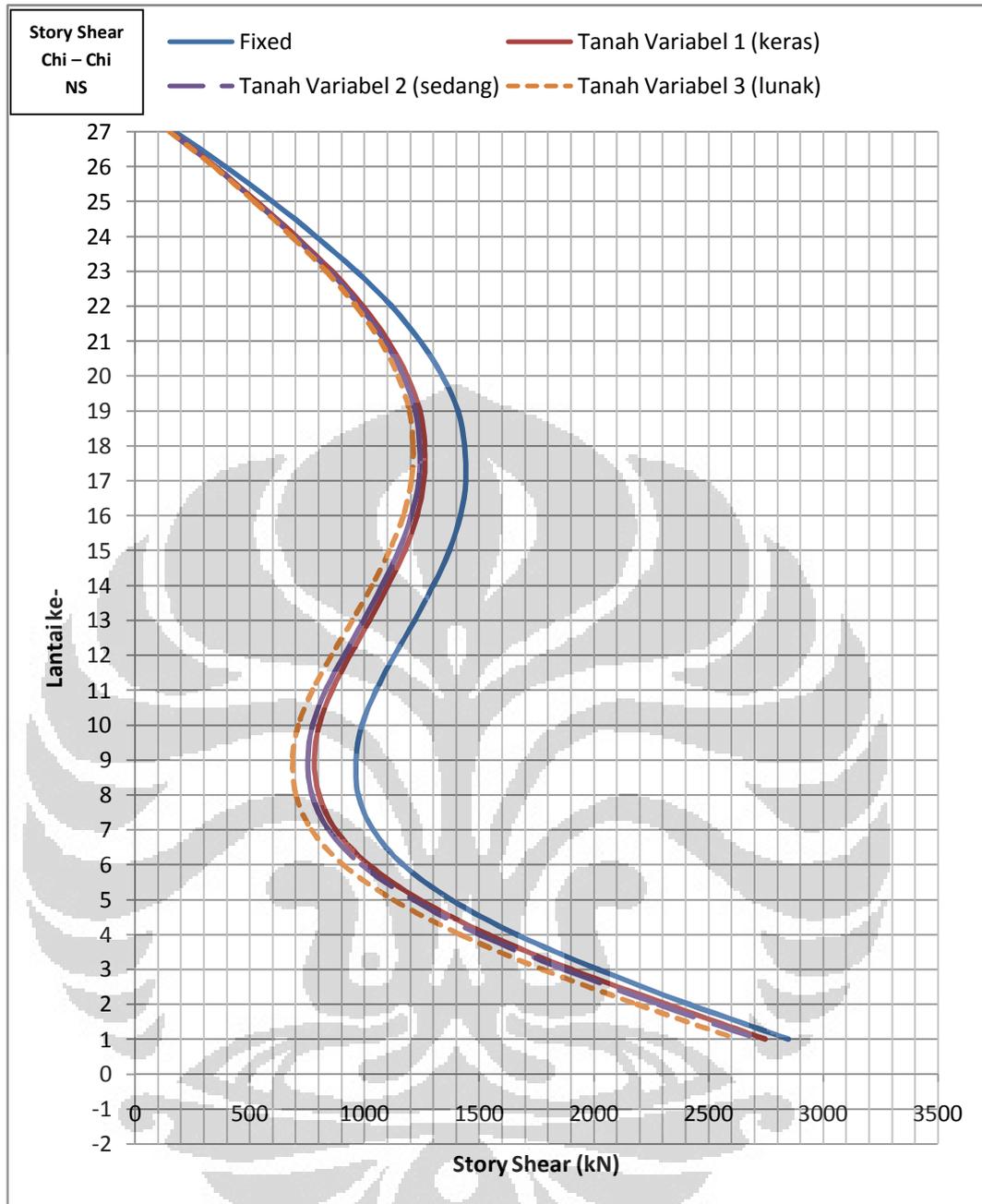
Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa struktur yang mempertimbangkan efek *SSI* memiliki nilai gaya gempa yang lebih kecil dibandingkan dengan struktur dengan perletakan jepit, walaupun perbedaannya cukup kecil.

IV.2.3.3 Story Shear

Story Shear merupakan nilai kumulatif dari seismic force yang terjadi tiap lantai. Hasil keluaran SAP2000 untuk *story shear* yang terjadi pada arah EW dan NS ditampilkan pada grafik dibawah ini :



Gambar 4. 17 *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.



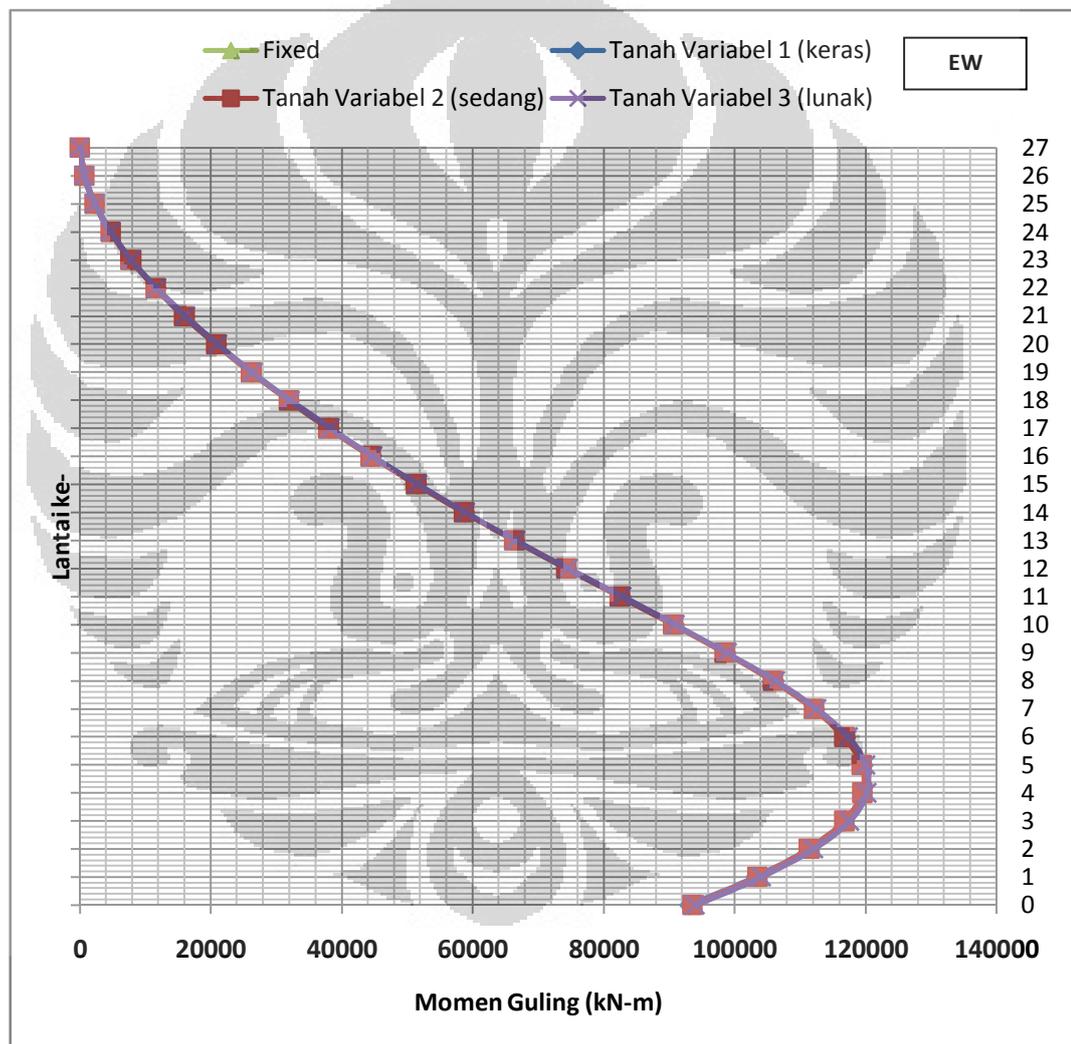
Gambar 4. 18 *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Dari kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai *story shear* yang terjadi akibat gempa EW tidak banyak perbedaan. Sementara itu, pada arah NS, perbedaan *story shear* untuk masing – masing variabel mulai terlihat. Nilai *story shear* untuk perletakan jepit lebih besar dibandingkan dengan struktur yang

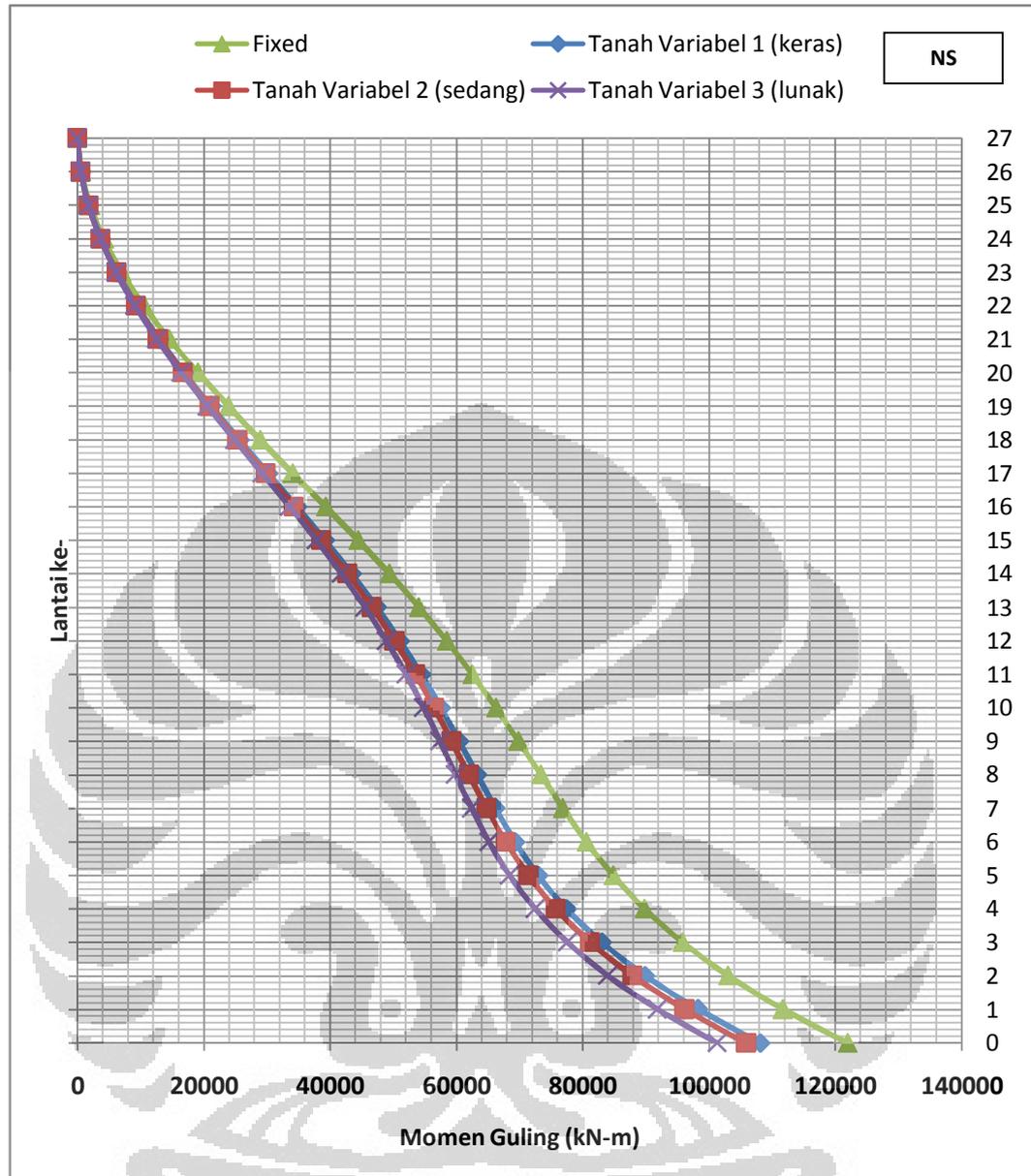
mempertimbangkan efek SSI, sementara untuk masing – masing variabel tanah yang ditinjau nilainya berimpit dan tidak banyak perubahan.

IV.2.3.4 Momen Guling

Analisa momen guling pada struktur dilakukan untuk membandingkan pengaruh dari asumsi peletakan yang dilakukan. Hasil keluaran SAP2000 untuk struktur 18 lantai ditunjukkan oleh grafik dibawah ini :



Gambar 4. 19 Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

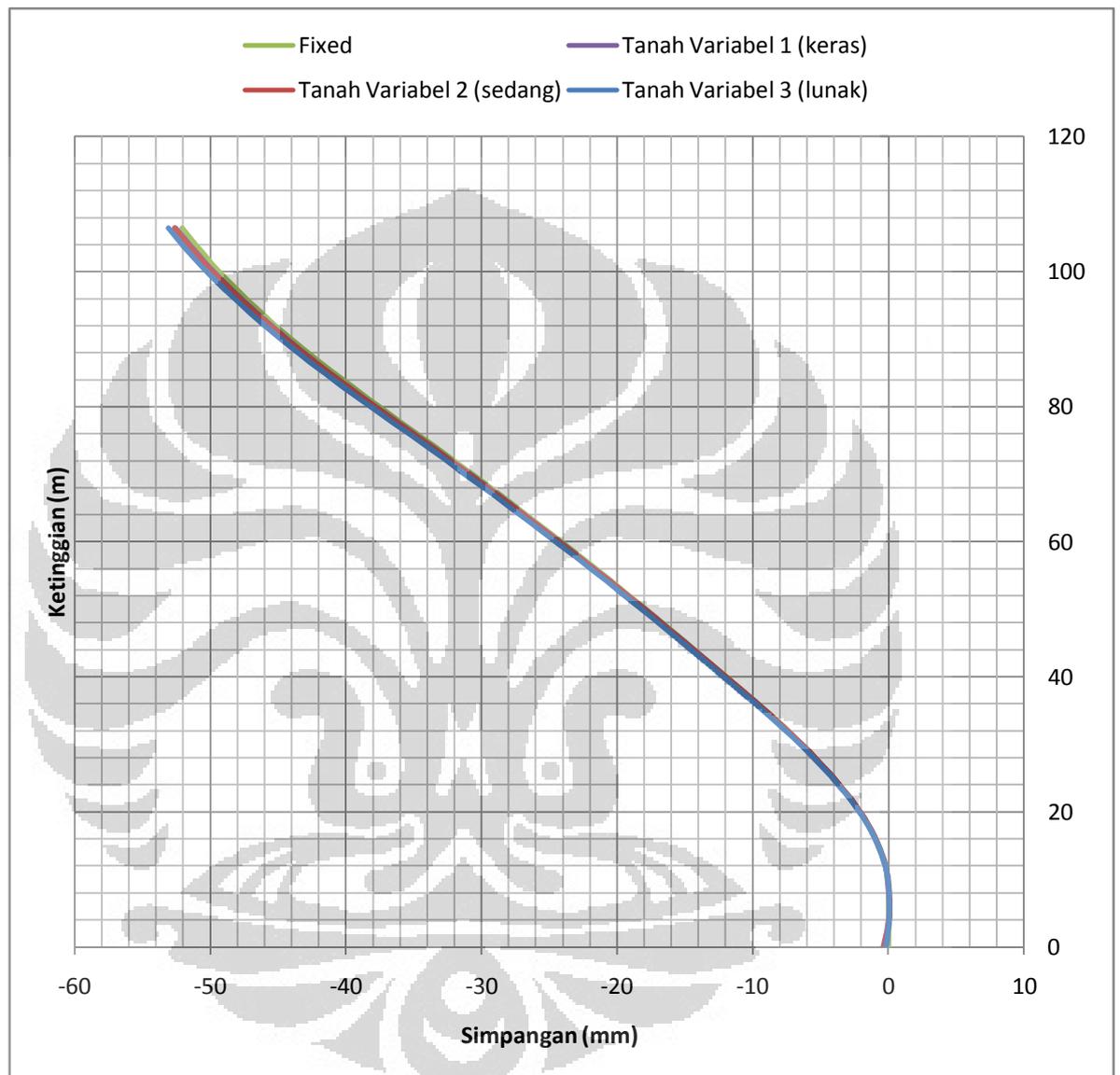


Gambar 4. 20 Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

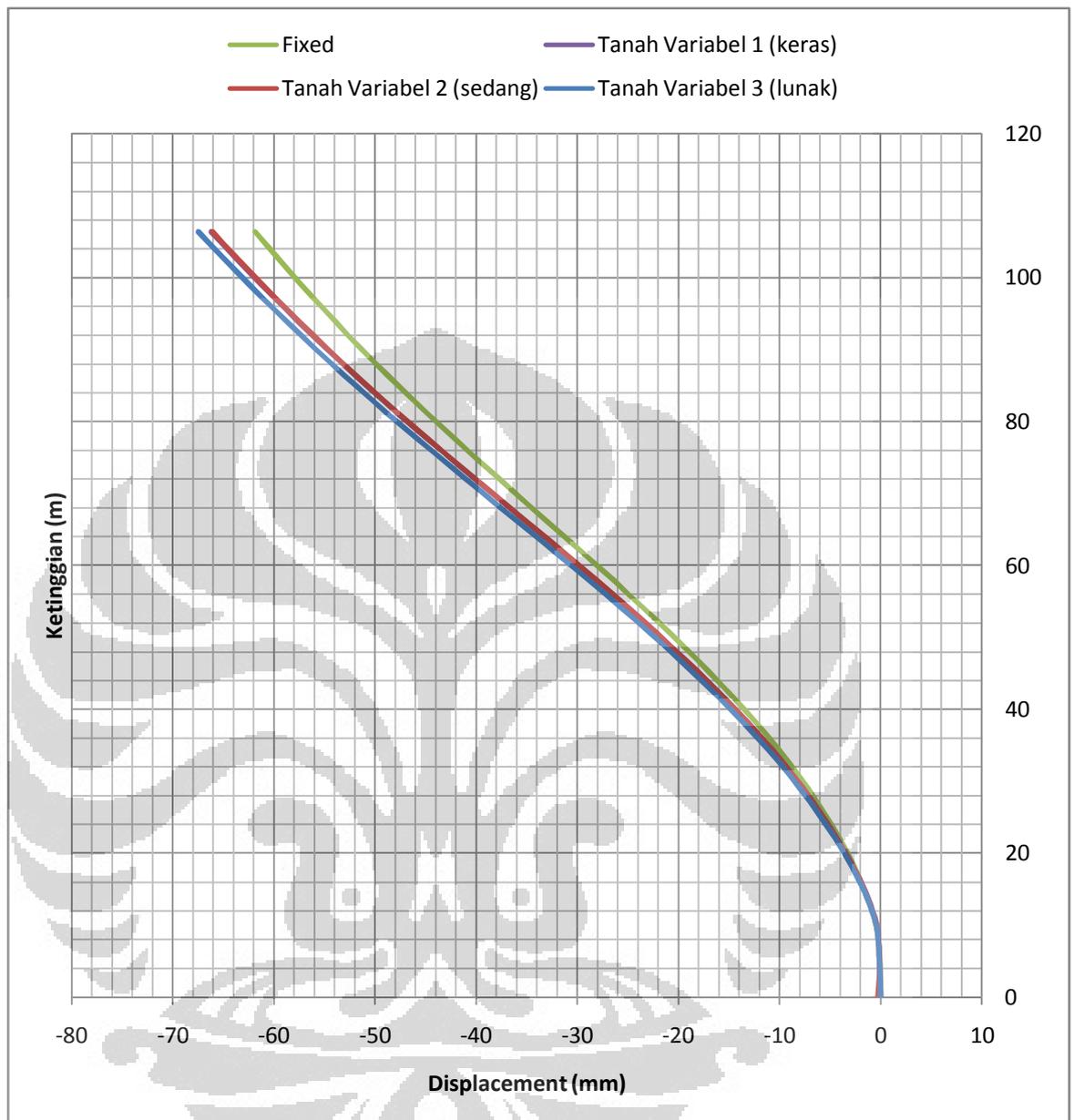
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa momen guling yang terjadi antara struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI tidak terlalu banyak mengalami perbedaan untuk arah EW. Sementara itu, untuk arah NS, nilai momen guling yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit lebih besar jika dibandingkan dengan struktur yang memperhatikan efek SSI.

IV.2.3.5 Simpangan Struktur

Hasil dari analisis yang dilakukan SAP2000 terhadap model struktur 27 lantai diolah dan ditunjukkan pada grafik berikut ini :



Gambar 4. 21 Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



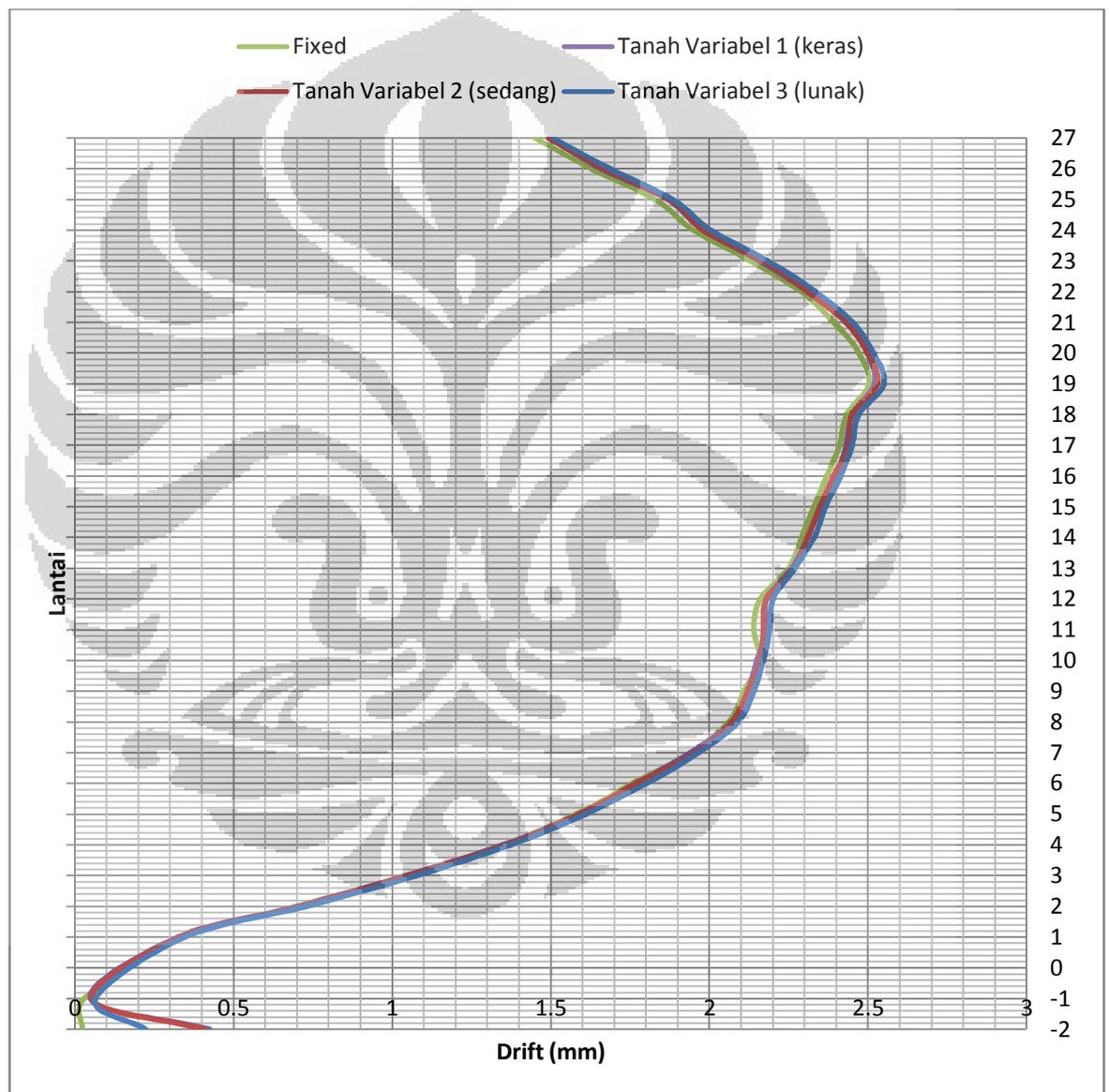
Gambar 4. 22 Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap. Nilai simpangan

Nilai simpangan yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI berimpit untuk arah EW dan memiliki perbedaan untuk arah NS. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki simpangan yang lebih kecil dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh dari kekangan tanah pada sekeliling basement

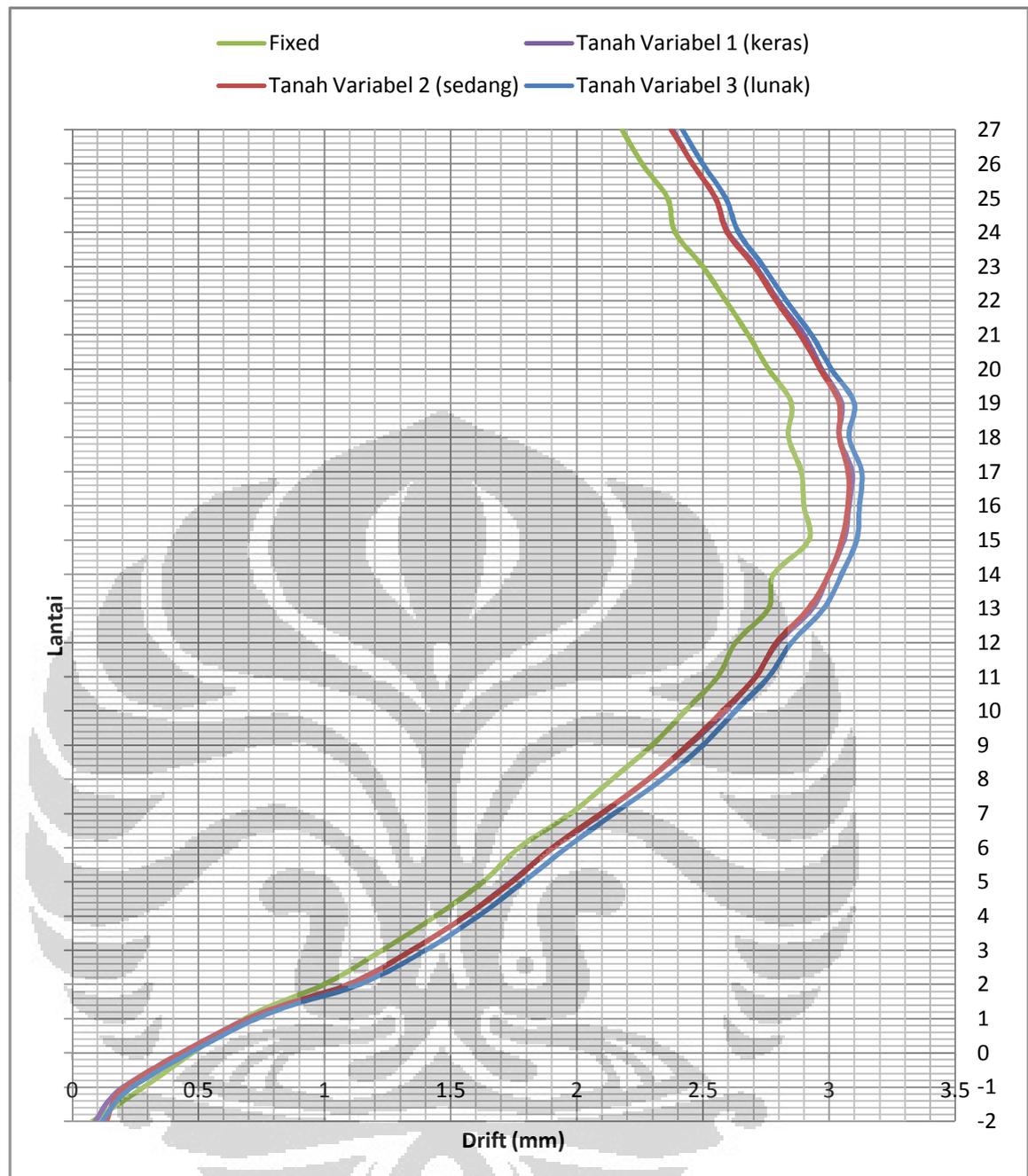
lebih kecil dibandingkan pengaruh dari deformasi pada tanah di bawah pondasi. Ini dapat dipahami mengingat pada struktur 27 lantai, pengaruh kekangan tanah pada basement akan semakin kecil seiring dengan meningkatnya tinggi bangunan.

IV.2.3.6 Story Drift

Story drift pada struktur 27 lantai akibat gempa Chi – Chi ditunjukkan pada grafik dibawah ini :



Gambar 4. 23 *Story Drift* Arah Memanjang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Pada Struktur 27 Lantai



Gambar 4. 24 *Story Drift* Arah Melintang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Pada Struktur 27 Lantai

Nilai *story drift* yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI berimpit untuk arah EW, sementara pada arah NS mengalami perbedaan. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki *story drift* yang lebih besar dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI.

BAB V

KESIMPULAN

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan data dan analisis dari 3 kelompok struktur dengan variasi ketinggian (9 lantai, 18 lantai, dan 27 lantai), dimana pada masing – masing variasi dimodelkan dengan perletakan jepit, perletakan solid element dengan properti tanah variable 1 (keras), solid element dengan properti tanah variable 2 (sedang), dan solid element dengan properti tanah variable 3 (lunak), hasil dari analisis tersebut dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

V.1.1 Untuk Struktur 9 Lantai

- Waktu getar alami yang dimiliki oleh struktur untuk perletakan jepit, perletakan solid element dengan properti tanah variabel 1 (keras), solid element dengan properti tanah variabel 2 (sedang), dan solid element dengan properti tanah variabel 3 (lunak), tidak memiliki banyak perbedaan dan hampir sama.
- Nilai *seismic force* yang terjadi untuk struktur yang mempertimbangkan efek SSI pada semua variabel, memiliki besaran gaya gempa yang hampir sama dengan struktur perletakan jepit, dan perbedaan yang dihasilkan nilainya tidak terlalu besar baik untuk arah EW dan NS.
- Nilai *story shear* yang terjadi tidak banyak perbedaan antara gaya geser lantai struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan SSI. Namun, nilai gaya geser lantai pada struktur dengan perletakan jepit lebih besar jika dibandingkan struktur dengan SSI.
- Nilai momen guling yang terjadi antara struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI untuk semua variabel tanah hampir sama, dimana garis pada grafik untuk semua variabel berimpit. Hal ini dapat dipahami mengingat nilai *story shear* pada struktur perletakan jepit hanya berbeda sedikit dengan struktur yang memperhatikan efek SSI.
- Nilai simpangan yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI untuk semua variabel tanah berimpit untuk arah EW

dan memiliki perbedaan untuk arah NS. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki simpangan yang lebih besar dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh dari kekangan tanah pada sekeliling basement lebih besar dibandingkan pengaruh dari deformasi pada tanah di bawah pondasi. Akibat tidak adanya kekangan tanah pada sekeliling basement di perletakan jepit, nilai deformasi yang terjadi pada perletakan tersebut menjadi lebih besar.

- Nilai *story drift* yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI untuk semua variabel tanah berimpit pada arah EW, sementara pada arah NS mengalami perbedaan. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki *story drift* yang lebih besar dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI.

V.1.2 Untuk Struktur 18 Lantai

- Nilai periode getar struktur pada peletakan jepit dan struktur yang mempertimbangkan efek SSI untuk masing – masing variabel tanah memiliki perbedaan. Struktur pada perletakan jepit memiliki nilai periode yang lebih kecil dibandingkan dengan variabel lainnya. Hal ini dapat dipahami mengingat tanah yang dimodelkan dengan *solid element* dapat berdeformasi tergantung dengan properti materialnya. Semakin besar deformasi tanah yang terjadi pada modal analisis, semakin besar nilai periode getar struktur tersebut. Struktur dengan tanah variabel 3 (lunak) memiliki nilai periode getar yang paling lama.
- Nilai *seismic force* untuk struktur yang mempertimbangkan efek SSI memiliki nilai gaya gempa yang lebih kecil dibandingkan dengan struktur dengan perletakan jepit, walaupun perbedaannya sangat kecil. Struktur dengan tanah variabel 3 (lunak) memiliki nilai *seismic force* yang paling kecil dibandingkan variabel lainnya.
- Nilai *story shear* yang terjadi akibat gempa EW tidak banyak perbedaan. Sementara itu, pada arah NS, perbedaan *story shear* untuk masing – masing variabel mulai terlihat. Nilai *story shear* untuk perletakan jepit lebih besar

dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI, dimana nilai terkecil terjadi untuk struktur dengan variabel tanah 3 (lunak).

- Nilai momen guling yang terjadi antara struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI mengalami perbedaan terutama untuk peninjauan arah NS. Nilai momen guling pada struktur dengan perletakan jepit lebih kecil dibandingkan struktur dengan efek SSI. Sementara itu, perbandingan nilai momen guling untuk beberapa variabel tanah tidak menunjukkan banyak perbedaan.
- Nilai simpangan yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI berimpit untuk arah EW dan memiliki perbedaan untuk arah NS. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki simpangan yang lebih besar dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI untuk semua variabel tanah. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh dari kekangan tanah pada sekeliling basement lebih besar dibandingkan pengaruh dari deformasi pada tanah di bawah pondasi. Akibat tidak adanya kekangan tanah pada sekeliling basement di perletakan jepit, nilai deformasi yang terjadi pada perletakan tersebut akan lebih besar dibandingkan variabel lainnya.
- Nilai *story drift* yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI berimpit untuk arah EW, sementara pada arah NS mengalami perbedaan. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki *story drift* yang lebih besar dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI untuk semua variabel tanah.

V.1.3 Untuk Struktur 27 Lantai

- Nilai periode getar struktur pada peletakan jepit dan struktur yang mempertimbangkan efek SSI untuk masing – masing variabel tanah memiliki perbedaan. Struktur pada perletakan jepit memiliki nilai periode yang lebih kecil dibandingkan dengan variabel lainnya. Hal ini dapat dipahami mengingat tanah yang dimodelkan dengan *solid element* dapat berdeformasi tergantung dengan properti materialnya. Semakin besar deformasi tanah yang terjadi pada

modal analisis, semakin besar nilai periode getar struktur tersebut. Struktur dengan tanah variabel 3 (lunak) memiliki nilai periode getar yang paling lama.

- Nilai *seismic force* untuk struktur yang mempertimbangkan efek SSI memiliki nilai gaya gempa yang lebih kecil dibandingkan dengan struktur dengan perletakan jepit, walaupun perbedaannya sangat kecil. Untuk struktur dengan tanah pada semua variabel tidak banyak perbedaan dan bisa dianggap sama.
- Nilai *story shear* yang terjadi akibat gempa EW tidak banyak perbedaan. Sementara itu, pada arah NS, perbedaan *story shear* untuk masing – masing variabel sedikit terlihat. Nilai *story shear* untuk perletakan jepit lebih kecil dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI, sementara untuk masing – masing variabel tanah yang ditinjau nilainya berimpit dan tidak banyak perubahan.
- Nilai momen guling yang terjadi antara struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI tidak terlalu banyak mengalami perbedaan untuk arah EW. Sementara itu, untuk arah NS, nilai momen guling yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit lebih besar jika dibandingkan dengan struktur yang memperhatikan efek SSI.
- Nilai simpangan yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI berimpit untuk arah EW dan memiliki perbedaan untuk arah NS. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki simpangan yang lebih kecil dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh dari kekangan tanah pada sekeliling basement lebih kecil dibandingkan pengaruh dari deformasi pada tanah di bawah pondasi. Ini dapat dipahami mengingat pada struktur 27 lantai, pengaruh kekangan tanah pada basement akan semakin kecil seiring dengan meningkatnya tinggi bangunan.
- Nilai *story drift* yang terjadi pada struktur dengan perletakan jepit dan struktur dengan efek SSI berimpit untuk arah EW, sementara pada arah NS mengalami perbedaan. Pada arah NS, struktur dengan perletakan jepit memiliki *story drift* yang lebih besar dibandingkan dengan struktur yang mempertimbangkan efek SSI.

V.2 Saran

1. Anggapan perilaku tanah tetap linear selama gempa terjadi kurang sesuai dengan kenyataan di lapangan. Tanah umumnya lebih baik dimodelkan dengan model plastis mohr coulomb agar bisa mendekati perilakunya di kenyataan. Software komersial SAP2000 tidak mampu memodelkan perilaku nonlinear material untuk solid element, sehingga diperlukan software yang lebih *advance* namun kurang praktis seperti Abaqus, Ansys, dan lainnya.
2. Umumnya, untuk mempertimbangkan pengaruh tanah pada struktur, seorang insinyur struktur cukup menggunakan *spring* dalam modelisasi. Penambahan variabel perletakan *spring* pada penelitian selanjutnya rasanya bisa dilakukan untuk memperjelas efek *soil-structure interaction*. Namun masalah timbul ketika menentukan nilai modulus subgrade tanah (K). Hasil dari analisis diprediksi bisa berbeda jauh dengan tanah yang dimodelkan sebagai solid element karena banyak faktor. Oleh karenanya, jika variabel perletakan *spring* ditambahkan pada penelitian, diperlukan *back analysis* untuk mencari nilai modulus subgrade yang sesuai dengan hasil dari tanah yang dimodelkan dengan solid element.
3. SAP2000 menurut evaluasi penulis tidak cukup baik untuk memodelkan permasalahan SSI karena banyaknya problem yang didapatkan. Penelitian selanjutnya bisa menggunakan software MATLAB untuk memodelkan permasalahan SSI untuk struktur 2 dimensi. Peneliti dapat mengkombinasikan antara finite element method dan boundary element method agar permasalahan refleksi gelombang pada boundari dapat diselesaikan.
4. Dengan adanya analisis ini, diharapkan dapat memberikan informasi tambahan mengenai efek *soil-structure interaction* pada perilaku struktur akibat gaya dinamik gempa.

DAFTAR REFERENSI

- Bungale S. Taranath. *Structural Analysis and Design of Tall Buildings*. New York: McGraw- Hill, 1988.
- Clough R, Penzien J. *Dynamics of Structures*. 2nd ed. McGraw-Hill Inc, 1993.
- Chopra, Anil. K. *Dynamic of Structure: Theory And Applications To Earthquake Engineering*, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1995.
- Chowdhury, Indrajit. & Dasgupta, P. Shambhu. *Dynamics of Structure and Foundation: A Unified Approach – 1. Fundamentals*, CRC Press. London, UK. 2009.
- Chowdhury, Indrajit. & Dasgupta, P. Shambhu. *Dynamics of Structure and Foundation: A Unified Approach – 2. Applications*, CRC Press. London, UK. 2009.
- Farzad Naeim, ed., *The Seismic Design Handbook*, 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 2001.
- Katili, Irwan. *Metode Elemen Hingga Untuk Skeletal*. Jakarta. RajaGrafindo Persada, 2008.
- Katili, Irwan. *Metode Elemen Hingga Untuk Analisis Tegangan*. Jakarta. UI Press, 2006.
- Katili, Irwan. *Metode Elemen Hingga Untuk Pelat Lentur*. Jakarta. UI Press, 2006.
- Mario Paz, *Structural Dynamics*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.
- Rastandi, J. Irwan. *Modelization of Dynamic Soil-Structure Interaction Using Integral Transform-Finite Element Coupling*. Technischen Universität München. German. 2003.

SAP2000, ETABS, and SAFE Design Manual, 2011. CSI Computer and Structures Inc, Berkeley, California, 2002.

Wilson E L. *Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures* [M]. 3rd ed. CSI Computer and Structures Inc, Berkeley, California, 2002.

Wolf, John. P. *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1985.

American Society of Civil Engineers. 2005. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. ASCE 7-10.

Standar SNI 03-1726-2002, "*Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung*", Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, 2001.

Standar SNI 03-2847-2002, "*Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*", Badan Standarisasi Nasional, Bandung, 2001.

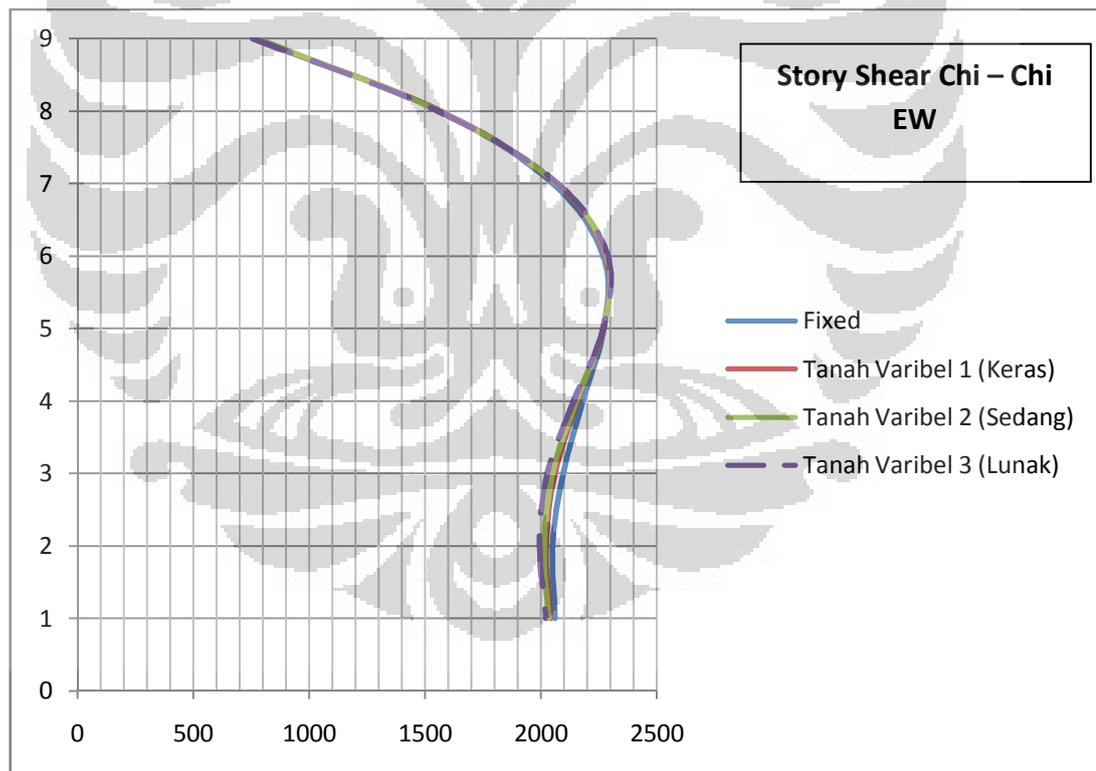
Standar RSNI 03-1726-201X, "*Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung*", Badan Standarisasi Nasional, Bandung, 2011.

LAMPIRAN 1

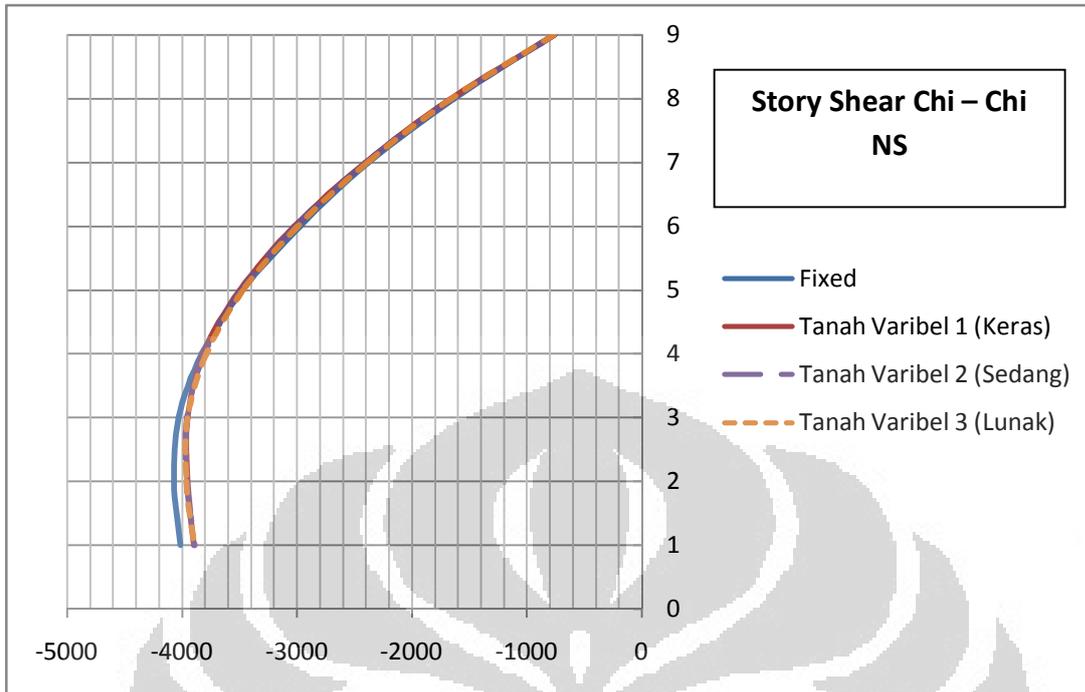
Lampiran 1. nilai story shear pada struktur 9 lantai

Tabel 1.1. Nilai *Seismic Force* Pada Struktur 9 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.

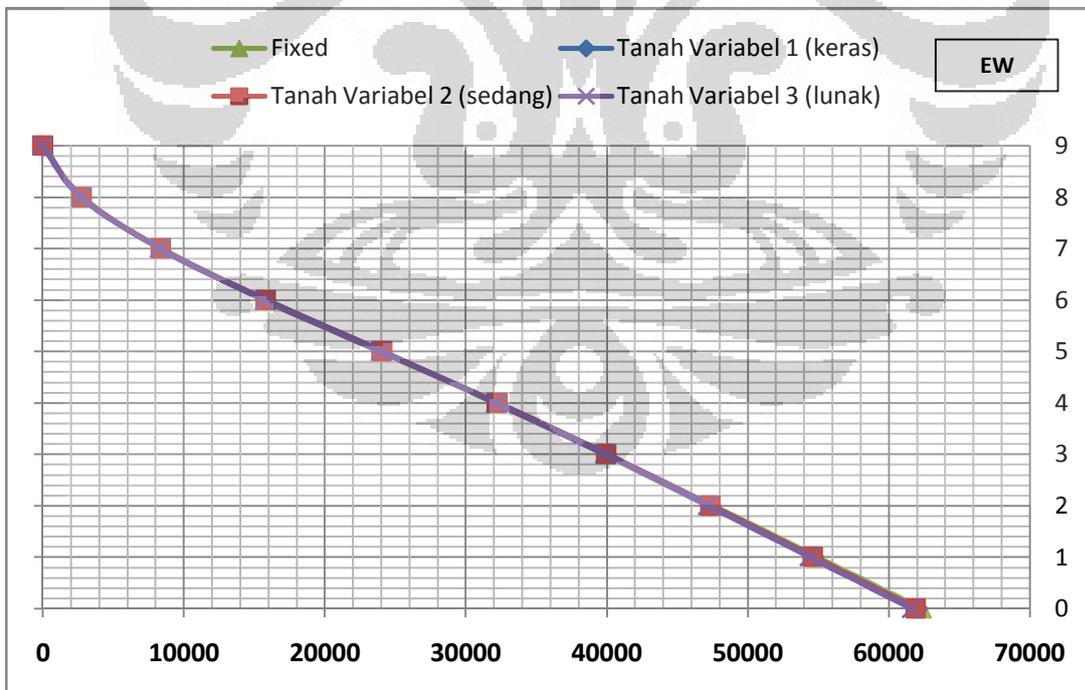
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
9	765.08	9	760.368	9	771.298	9	754.454
8	792.416	8	801.446	8	784.33	8	797.338
7	494.466	7	505.496	7	513.108	7	519.592
6	218.646	6	214.898	6	217.584	6	217.856
5	2.205	5	-11.956	5	-16.664	5	-19.21
4	-91.639	4	-110.44	4	-116.556	4	-128.7
3	-83.4206	3	-97.822	3	-102.586	3	-112.422
2	-46.9854	2	-38.408	2	-37.266	2	-33.152
1	10.4816	1	18.17	1	19.852	1	26.3316



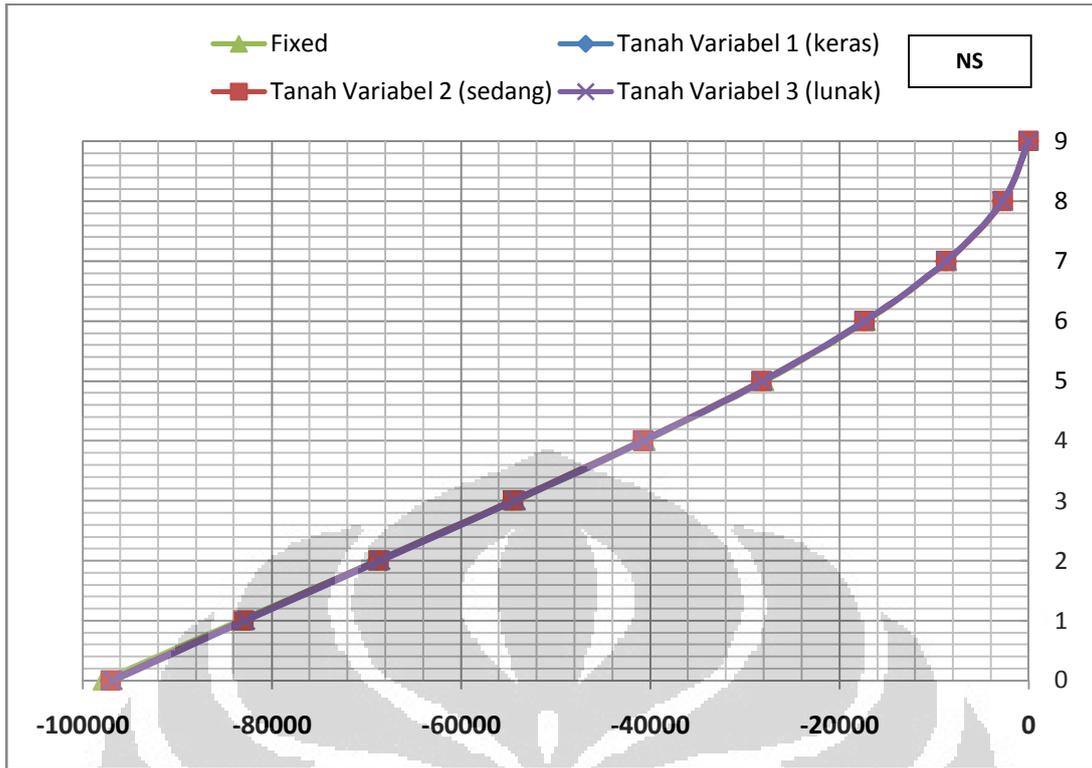
Grafik 1.2. *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



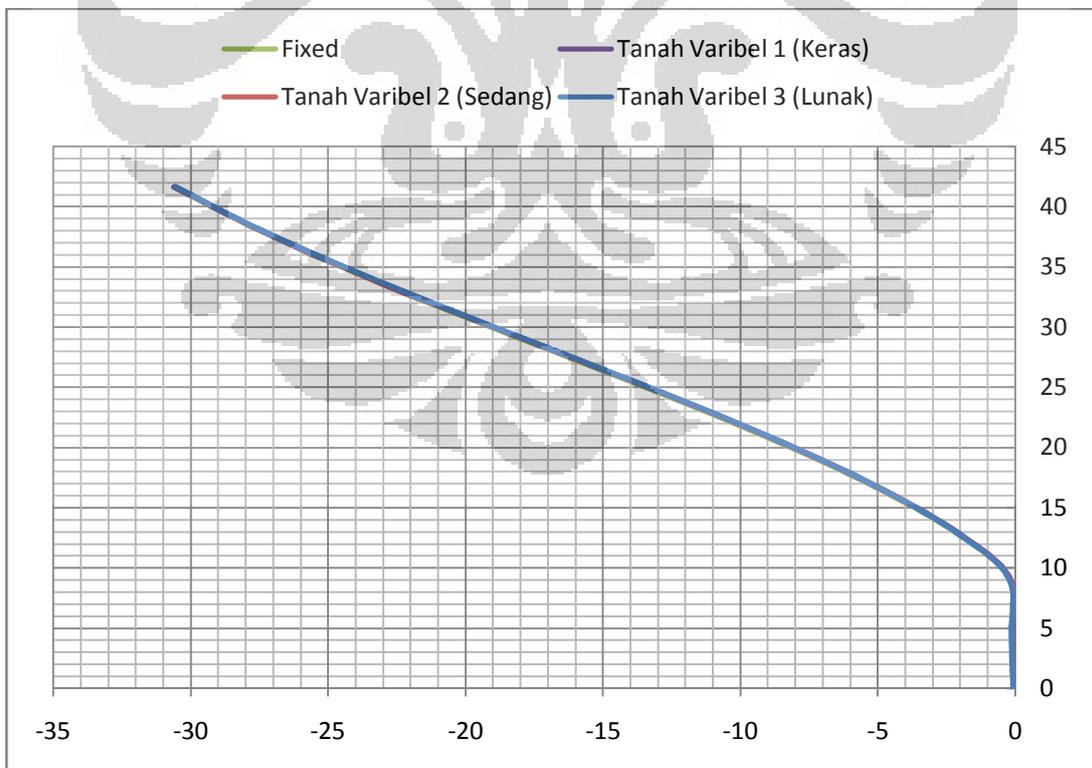
Grafik 1.3. *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



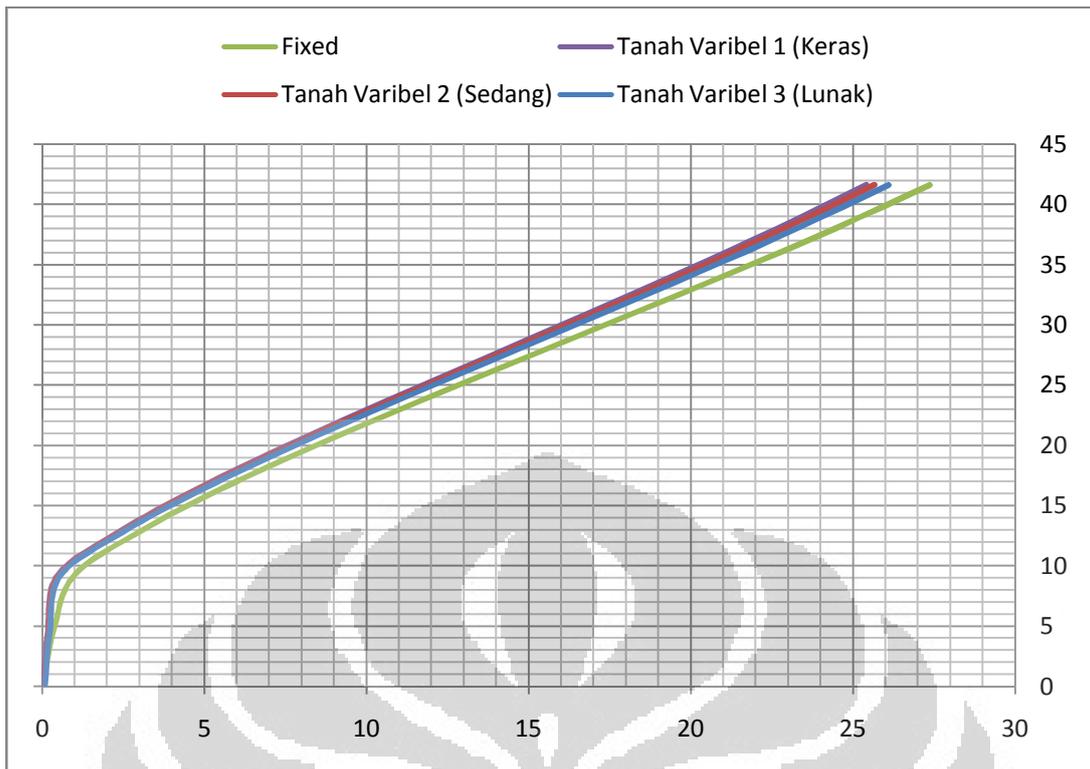
1.4. Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



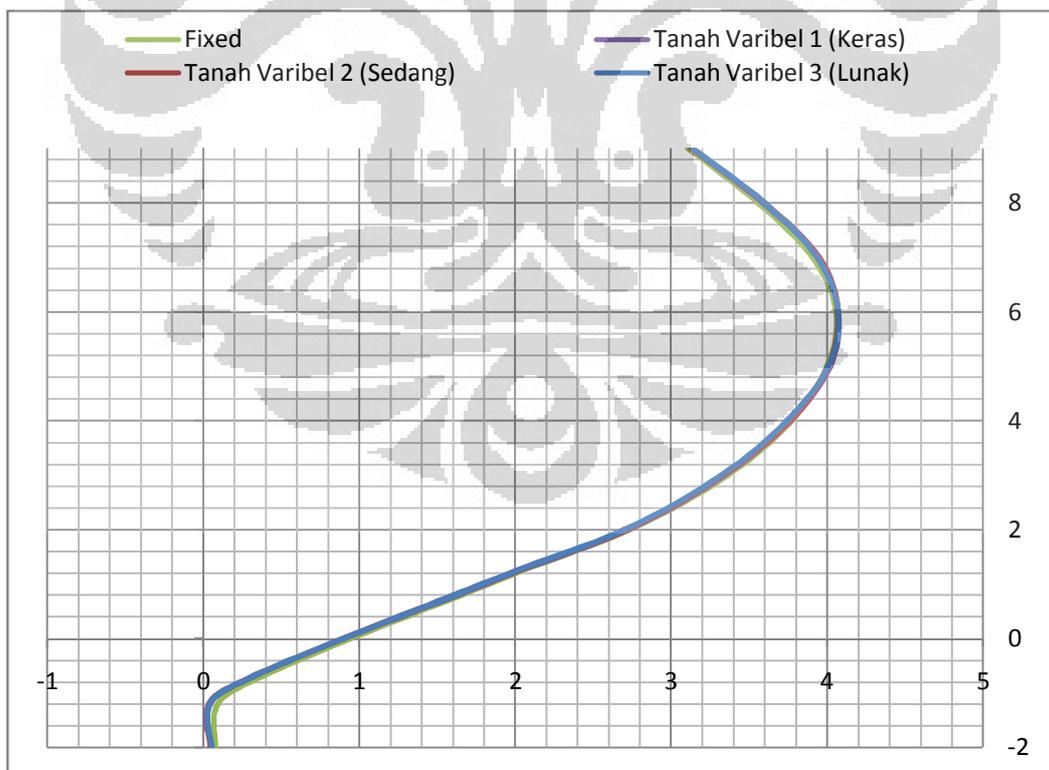
Grafik 1.5. Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



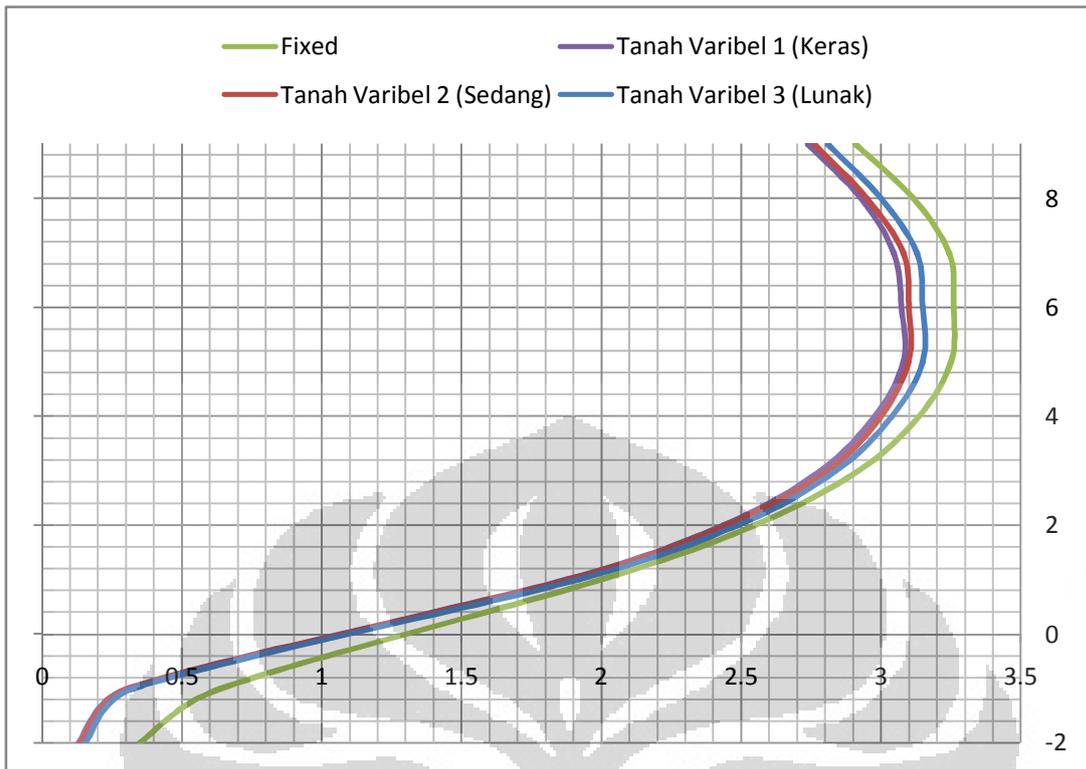
Grafik 1.6. Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



Grafik 1.7. Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



Grafik 1.8. Story Drift Arah Memanjang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Pada Struktur 9 Lantai



Grafik 1.9. *Story Drift* Arah Memanjang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Pada Struktur 9 Lantai

LAMPIRAN 2

Lampiran 2. nilai story shear pada struktur 18 lantai

Tabel 1. Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 18 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.

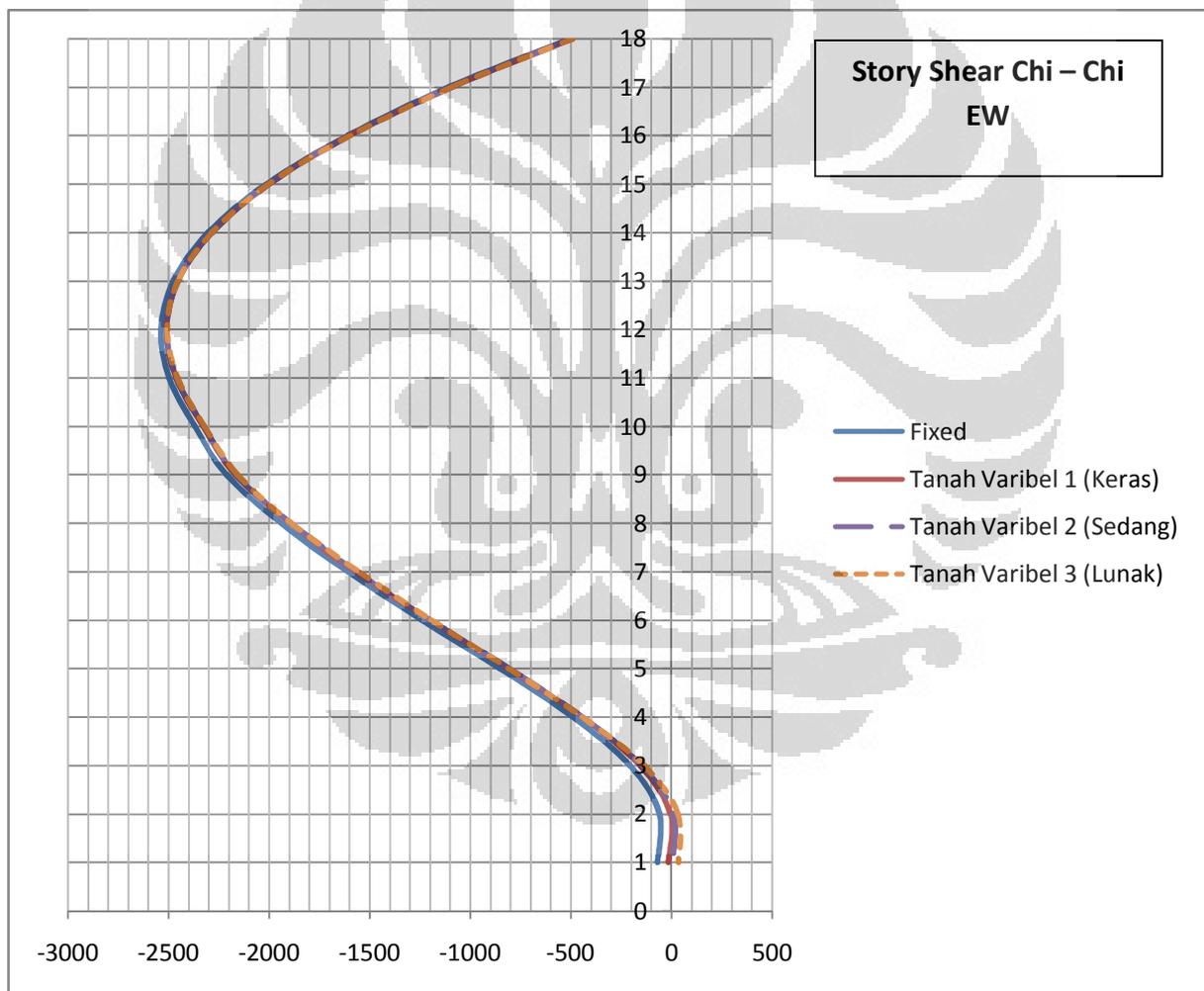
Seismic Force Chi – Chi EW (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
18	-501.087	18	-496.16	18	-497.563	18	-490.11
17	-603.024	17	-592.78	17	-596.257	17	-597.132
16	-503.837	16	-510.963	16	-502.63	16	-507.483
15	-405.192	15	-400.032	15	-407.361	15	-407.254
14	-288.725	14	-285.084	14	-281.298	14	-281.465
13	-173.425	13	-167.75	13	-168.547	13	-169.572
12	-62.206	12	-56.46	12	-55.366	12	-53.757
11	41.655	11	47.226	11	47.931	11	50.048
10	127.262	10	134.435	10	135.311	10	134.169
9	156.539	9	159.339	9	158.989	9	165.126
8	272.759	8	273.088	8	273.603	8	268.87
7	331.674	7	323.181	7	326.873	7	334.003
6	365.309	6	369.712	6	364.869	6	358.51
5	388.1682	5	388.473	5	393.73	5	386.615
4	365.8778	4	368.169	4	364.965	4	368.176
3	284.4077	3	292.5125	3	295.771	3	307.529
2	144.3243	2	148.9635	2	158.45	2	166.387
1	-9.08	1	-11.62	1	-6.67	1	2.77

Tabel 2. Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 18 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.

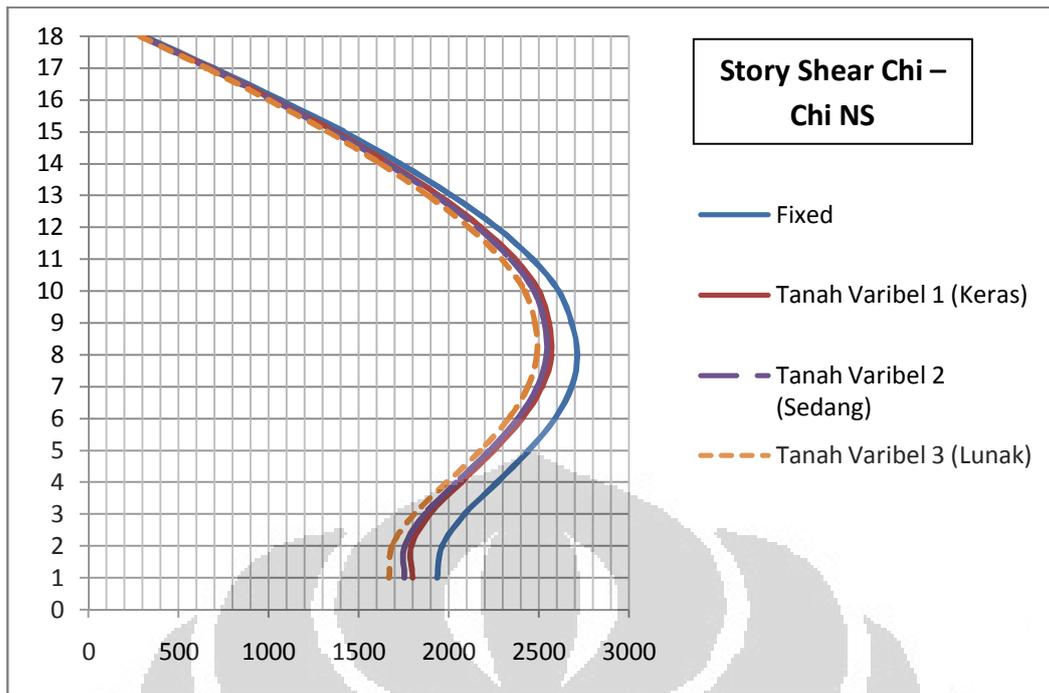
Seismic Force Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
18	305.35	18	295.51	18	292.522	18	286.51
17	390.5	17	382.01	17	375.71	17	369.03
16	372.43	16	355.09	16	356.959	16	341.77
15	343.064	15	333.04	15	327.229	15	325.22
14	317.606	14	302.5057	14	300.04	14	294.75
13	285.12	13	273.4102	13	270.52	13	264.9
12	247.84	12	235.9341	12	231.94	12	228.88
11	201.55	11	188.87	11	185.478	11	181.43
10	146.03	10	131.898	10	132.572	10	127.93
9	72.34	9	58.298	9	57.62	9	56.56

LAMPIRAN 2

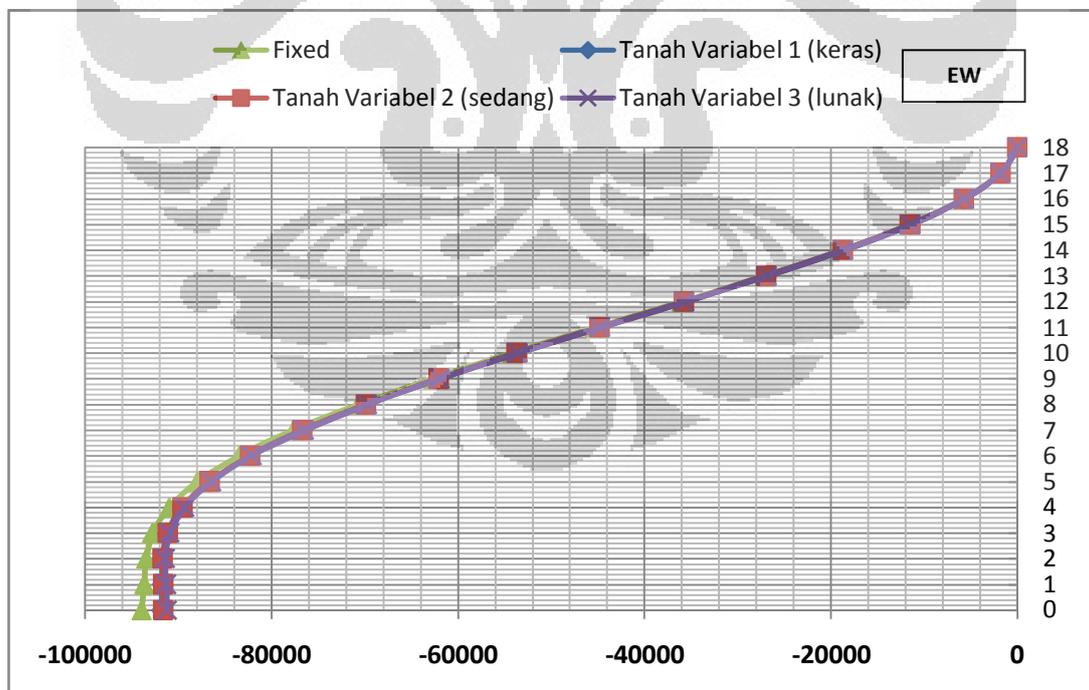
Seismic Force Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
8	29.49	8	11.621	8	11.54	8	10.69
7	-31.59	7	-51.9834	7	-50.92	7	-49.3
6	-93.6058	6	-111.2736	6	-110.53	6	-107.444
5	-143.0502	5	-159.66	5	-158.526	5	-158.593
4	-175.417	4	-180.24	4	-182.074	4	-182.713
3	-178.05	3	-170.36	3	-174.335	3	-180.63
2	-128.4229	2	-103.13	2	-110.699	2	-123.16
1	-28.4041	1	6.64	1	-2.81	1	-18.31



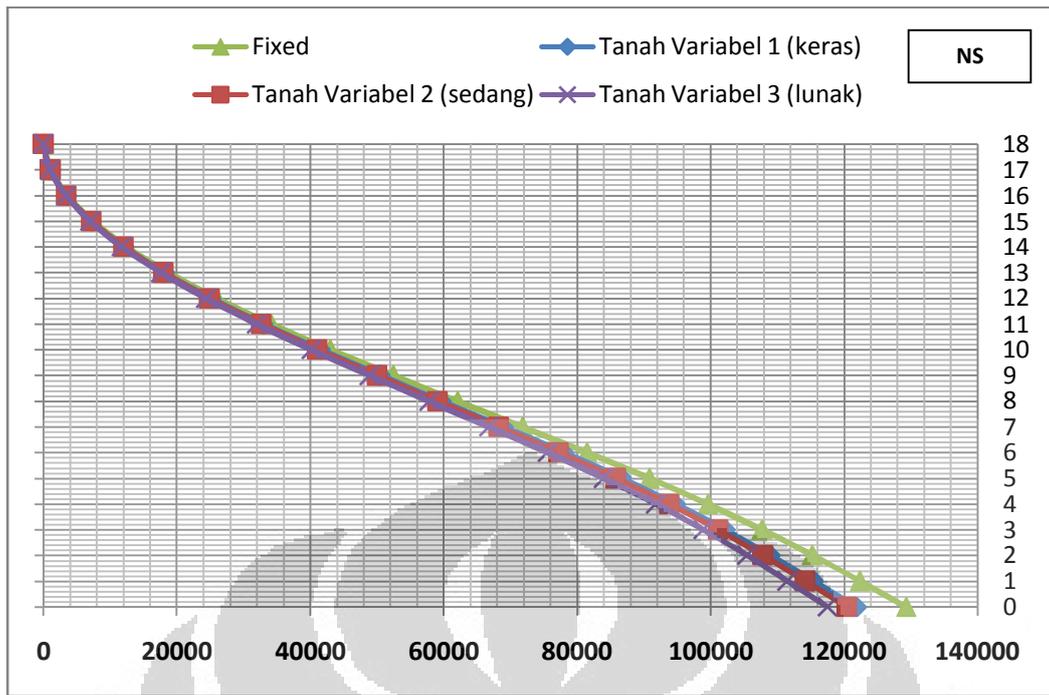
Grafik 1. *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap



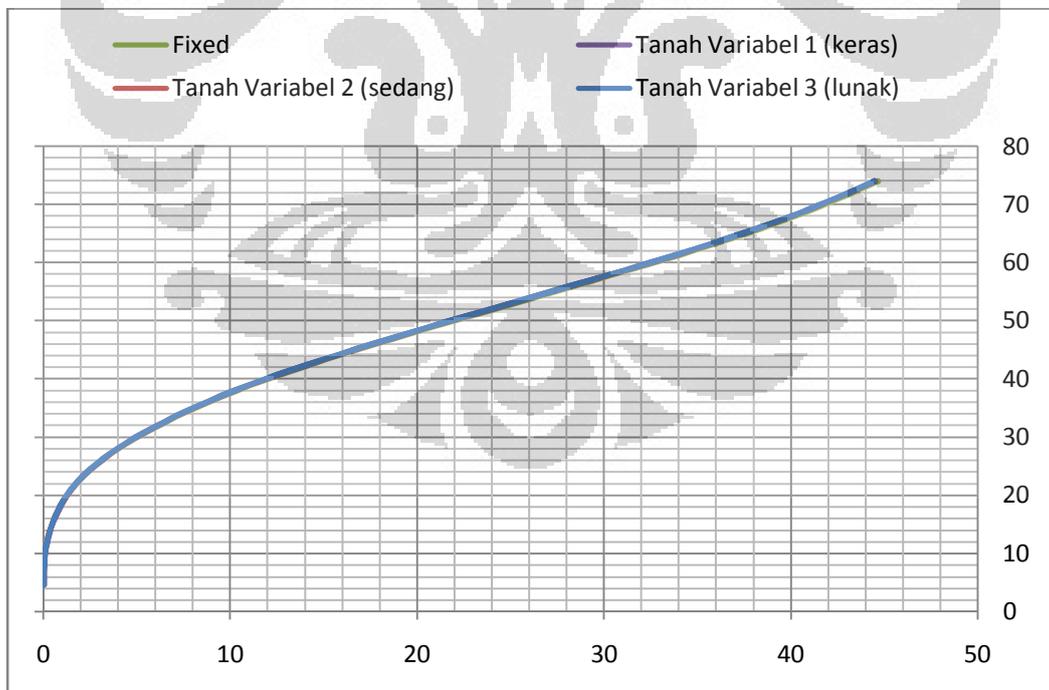
Grafik 2. *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



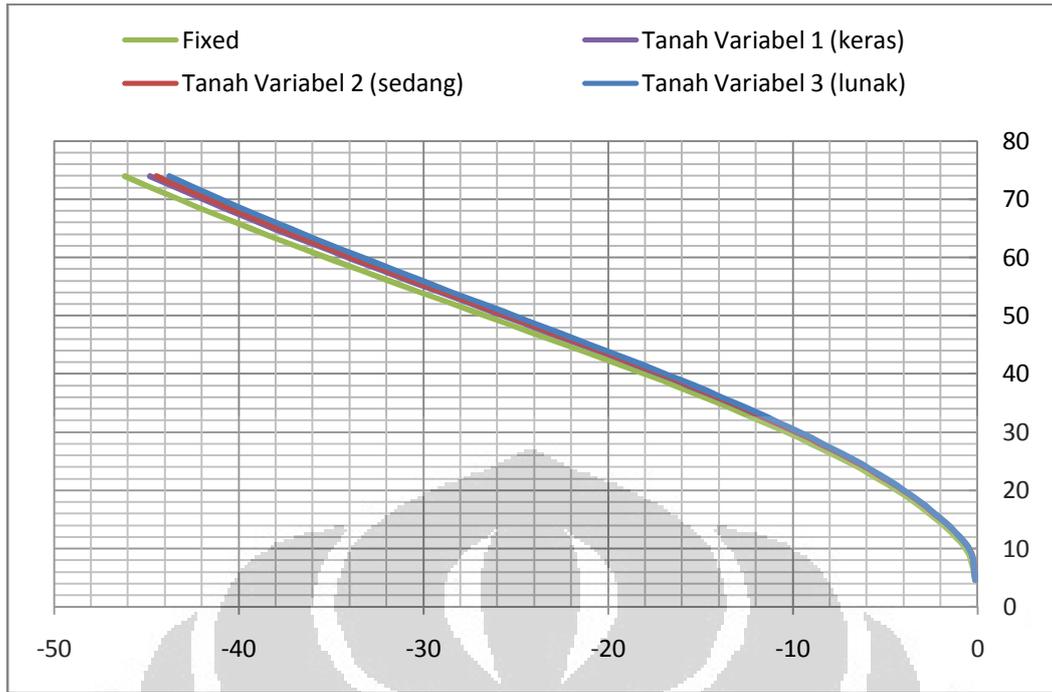
Grafik 3. Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



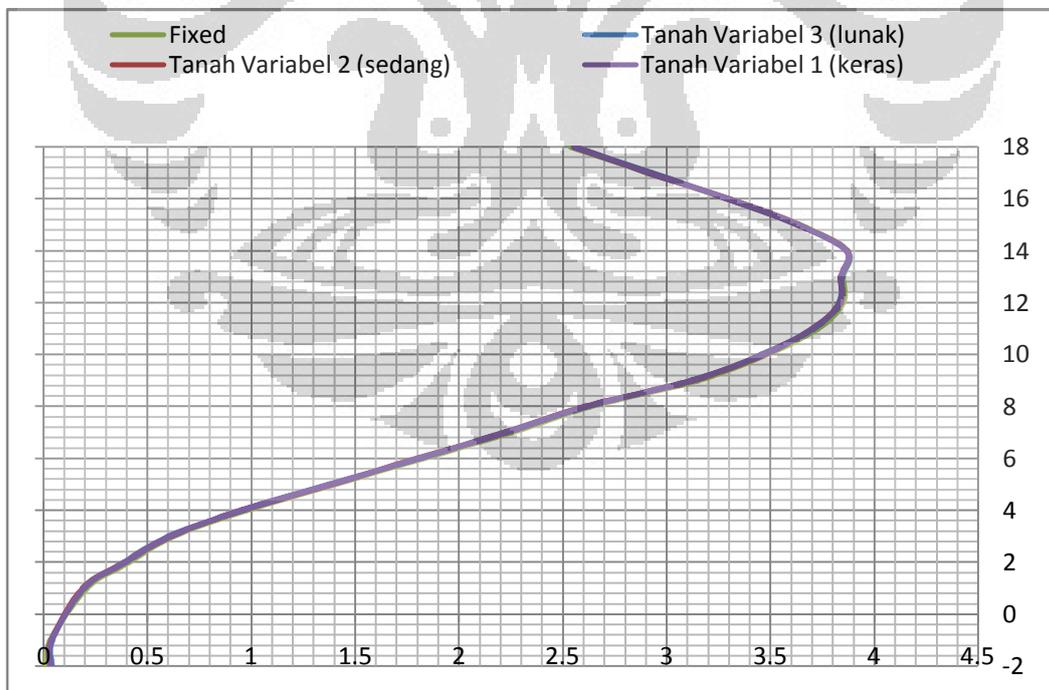
Grafik 4. Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



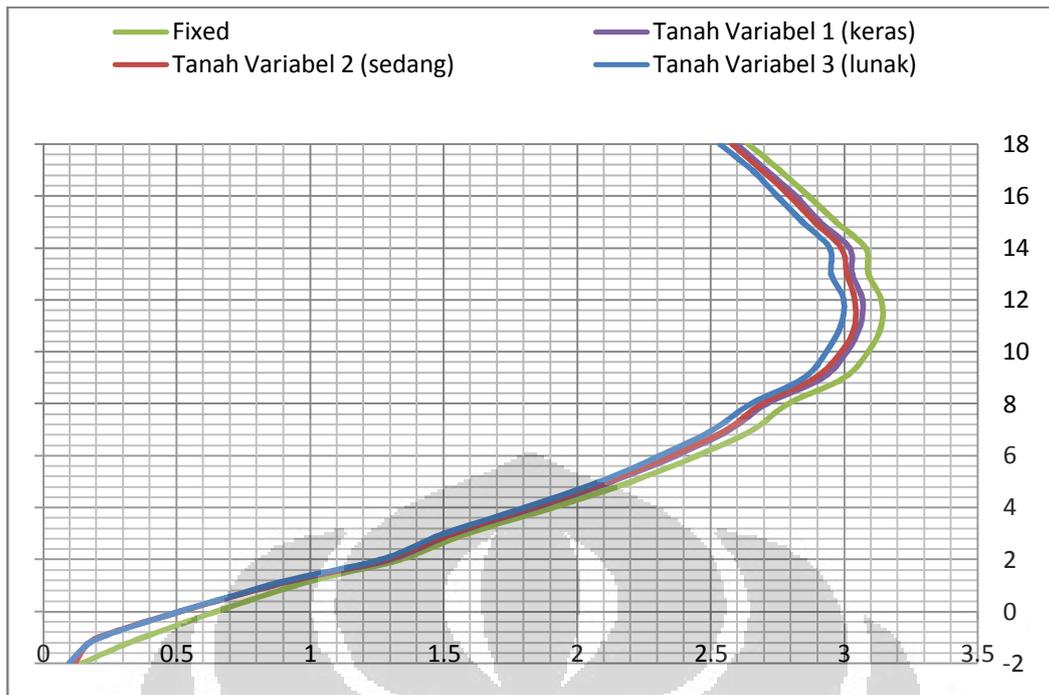
Grafik 5. Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



Grafik 6. Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap. Nilai simpangan



Grafik 7. Story Drift Arah Memanjang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Pada Struktur 18 Lantai



Grafik 8. *Story Drift* Arah Melintang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Pada Struktur 18 Lantai

LAMPIRAN 3

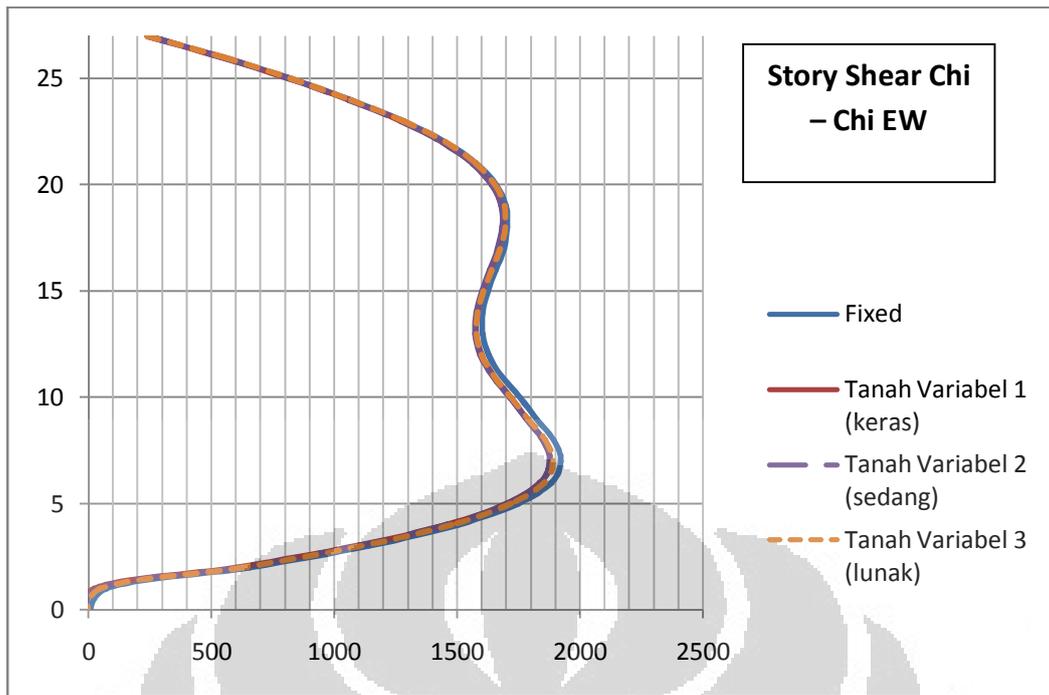
Lampiran 3. nilai story shear pada struktur 27 lantai

Tabel 1. Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 27 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.

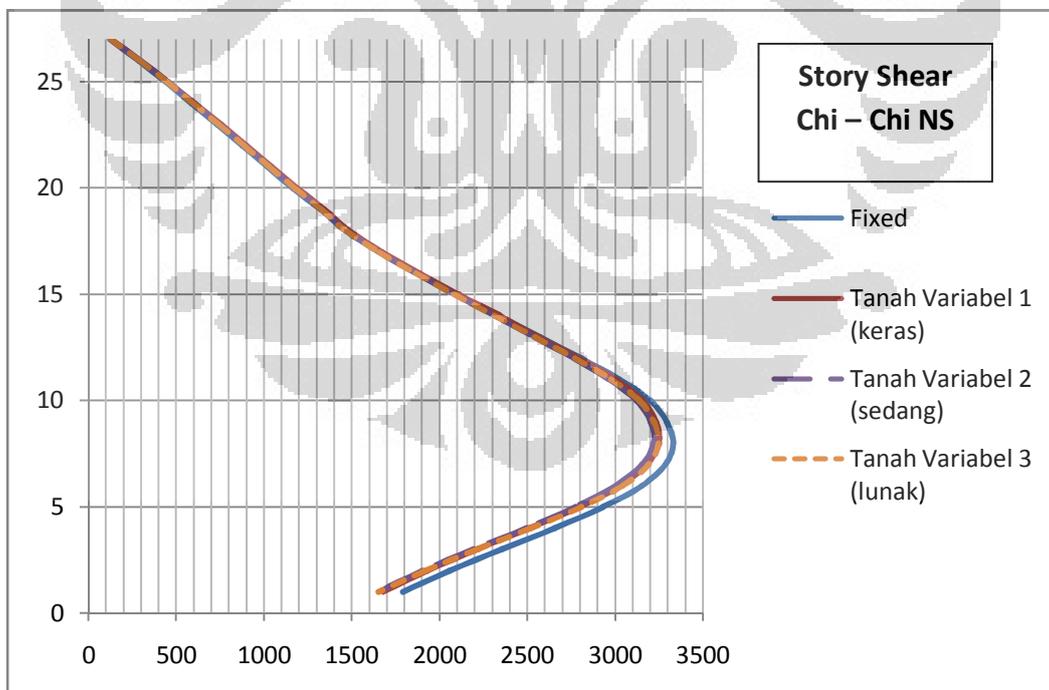
Seismic Force Chi – Chi EW (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
27	243.27	27	239.5757	27	240.63	27	241.379
26	303.795	26	302.0643	26	302.225	26	310.766
25	275.17	25	272.304	25	272.7	25	269.7564
24	244.1107	24	247.738	24	244.3667	24	246.1751
23	215.0713	23	210.028	23	211.5523	23	215.1245
22	170.213	22	168.306	22	167.935	22	170.2333
21	126.15	21	122.561	21	122.881	21	122.2333
20	80.952	20	78.926	20	78.1488	20	78.5698
19	39.751	19	38.231	19	38.2026	19	37.3911
18	5.204	18	4.903	18	4.5586	18	2.8402
17	-13.697	17	-18.013	17	-18.284	17	-19.6557
16	-33.229	16	-31.292	16	-31.668	16	-33.8735
15	-30.656	15	-32.168	15	-33.145	15	-33.8343
14	-21.12	14	-23.096	14	-23.455	14	-24.7114
13	-1.935	13	-4.0579	13	-4.565	13	-5.0723
12	23.5	12	22.1305	12	21.534	12	20.3822
11	53.558	11	49.3824	11	49.682	11	50.6833
10	75.571	10	70.6946	10	70.681	10	71.2368
9	66.476	9	64.6524	9	65.447	9	68.7205
8	69.0581	8	65.3334	8	67.426	8	68.8757
7	29.6869	7	27.9811	7	29.331	7	32.5157
6	-37.6785	6	-39.1205	6	-37.314	6	-35.4013
5	-134.1545	5	-136.824	5	-134.0485	5	-136.1027
4	-244.417	4	-244.215	4	-244.4582	4	-240.0565
3	-363.0811	3	-367.162	3	-362.5017	3	-365.2521
2	-486.1054	2	-487.0062	2	-479.2639	2	-485.2904
1	-582.7935	1	-579.4668	1	-582.9709	1	-578.8027

Tabel 2. Distribusi Gaya Gempa Pada Struktur 27 Lantai Untuk Rekaman Chi – Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.

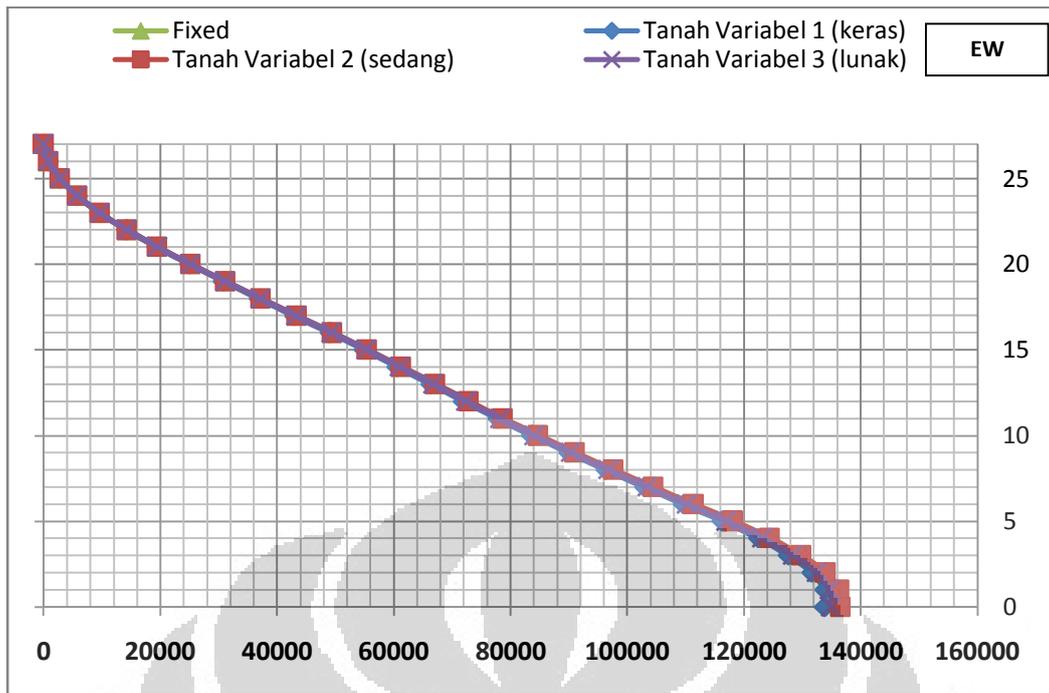
Seismic Force Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1		Tanah Variabel 2		Tanah Variabel 3	
		(keras)		(sedang)		(lunak)	
27	124.031	27	130.76	27	128.777	27	127.6177
26	160.929	26	166.83	26	165.823	26	165.0893
25	152.4	25	157.598	25	155.46	25	155.02
24	148.8399	24	152.234	24	151.4019	24	148.627
23	145.2501	23	148.828	23	146.4781	23	148.345
22	144.485	22	144.127	22	142.394	22	142.288
21	142.305	21	142.9169	21	140.576	21	141.249
20	146.65	20	147.5728	20	146.04	20	145.428
19	158.809	19	153.5503	19	152.316	19	152.1558
18	137.878	18	138.6866	18	137.711	18	137.4582
17	196.256	17	191.1887	17	189.121	17	191.302
16	213.201	16	211.0627	16	208.022	16	209.47
15	225.111	15	222.38	15	219.44	15	218.158
14	234.875	14	231.825	14	225.512	14	228.1286
13	237.11	13	224.707	13	228.678	13	230.6234
12	235.771	12	227.557	12	223.9167	12	227.67
11	219.7934	11	207.243	11	202.4333	11	205.6844
10	174.4856	10	155.378	10	157	10	163.1556
9	94.3	9	76.965	9	79.4694	9	82.983
8	38.111	8	16.708	8	17.7176	8	24.973
7	-45.043	7	-66.56	7	-63.167	7	-56.376
6	-133.188	6	-154.669	6	-153.08	6	-147.827
5	-221.06	5	-232.984	5	-228.2823	5	-233.463
4	-275.3	4	-281.3205	4	-278.3877	4	-288.32
3	-298.8887	3	-297.389	3	-302.48	3	-302.3745
2	-301.0813	2	-287.9905	2	-291.807	2	-302.0155
1	-264.57	1	-247.7783	1	-253.903	1	-262.4



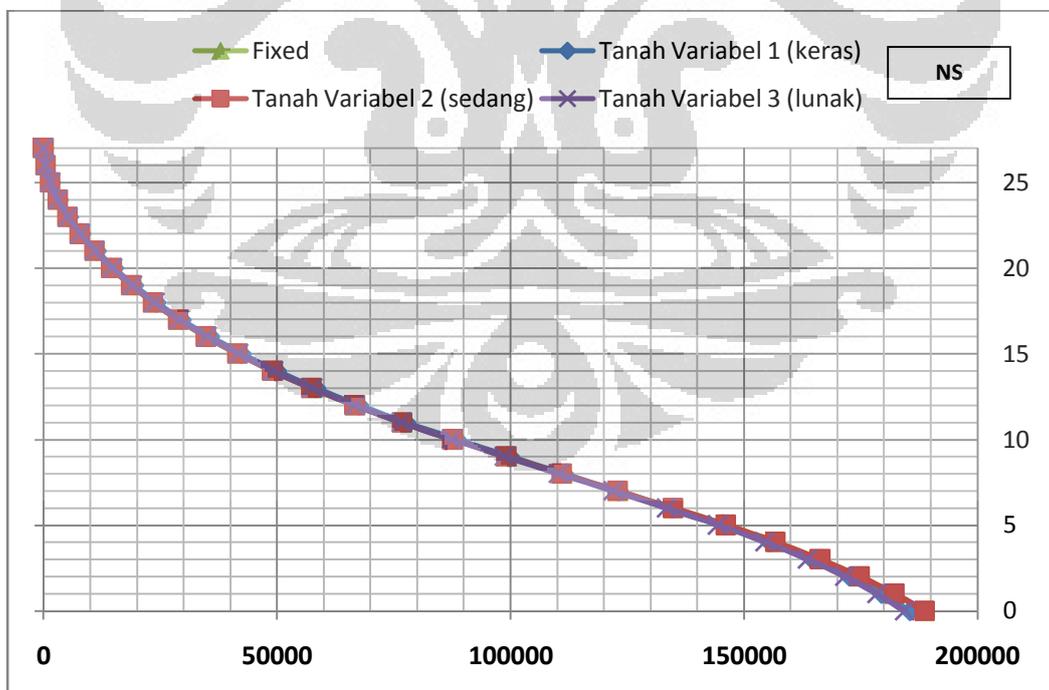
Grafik 1. *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



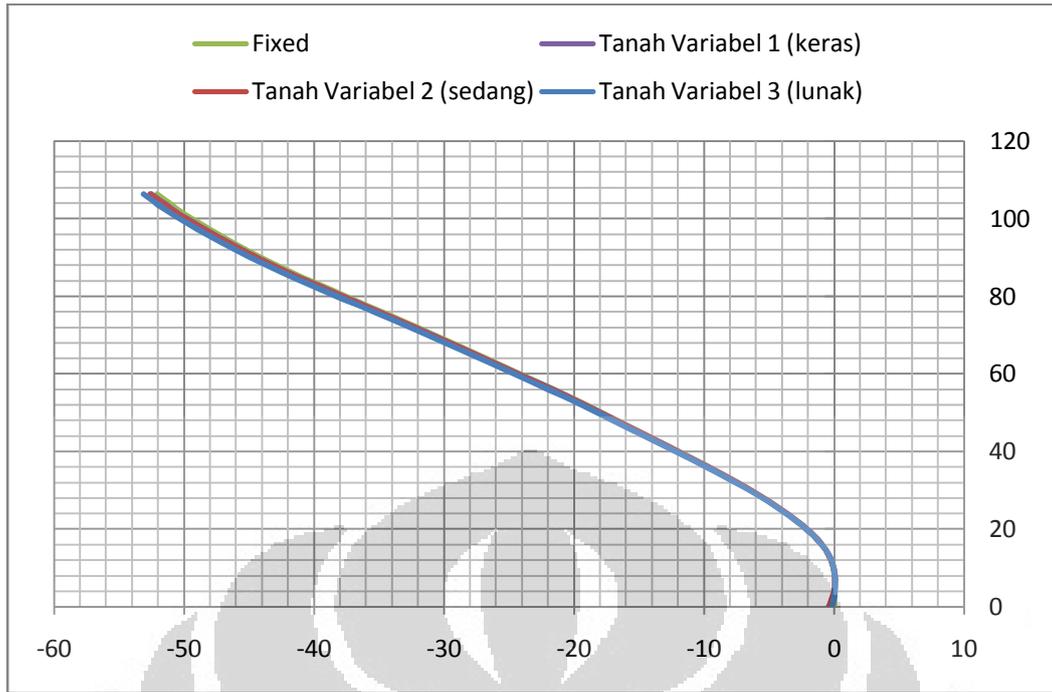
Grafik 2. *Story Shear* Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



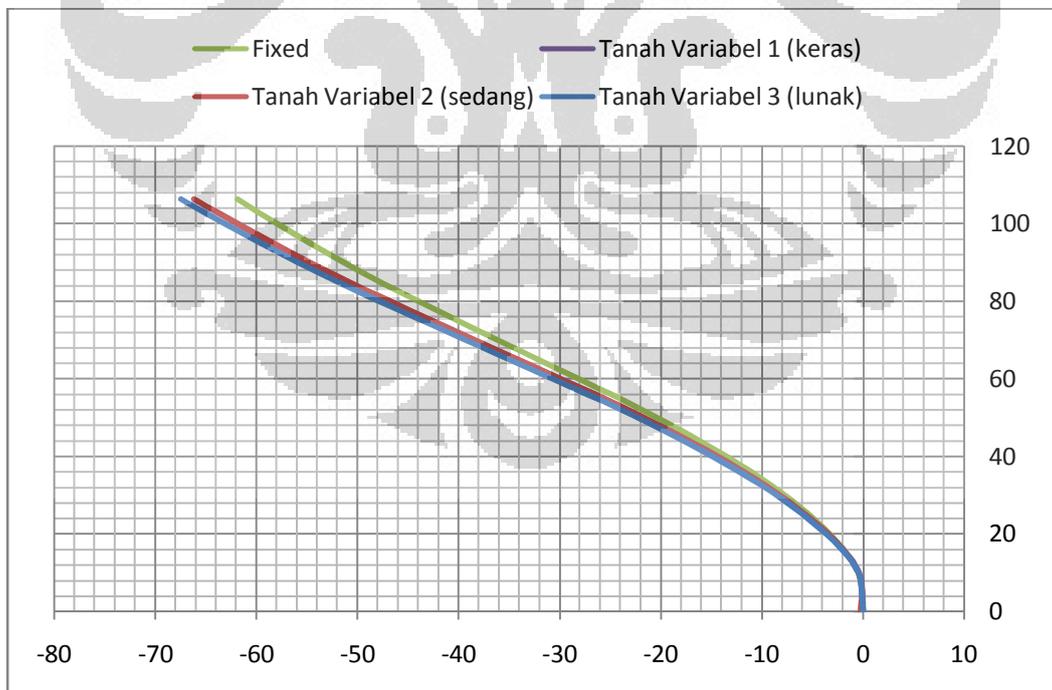
Grafik 3. Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



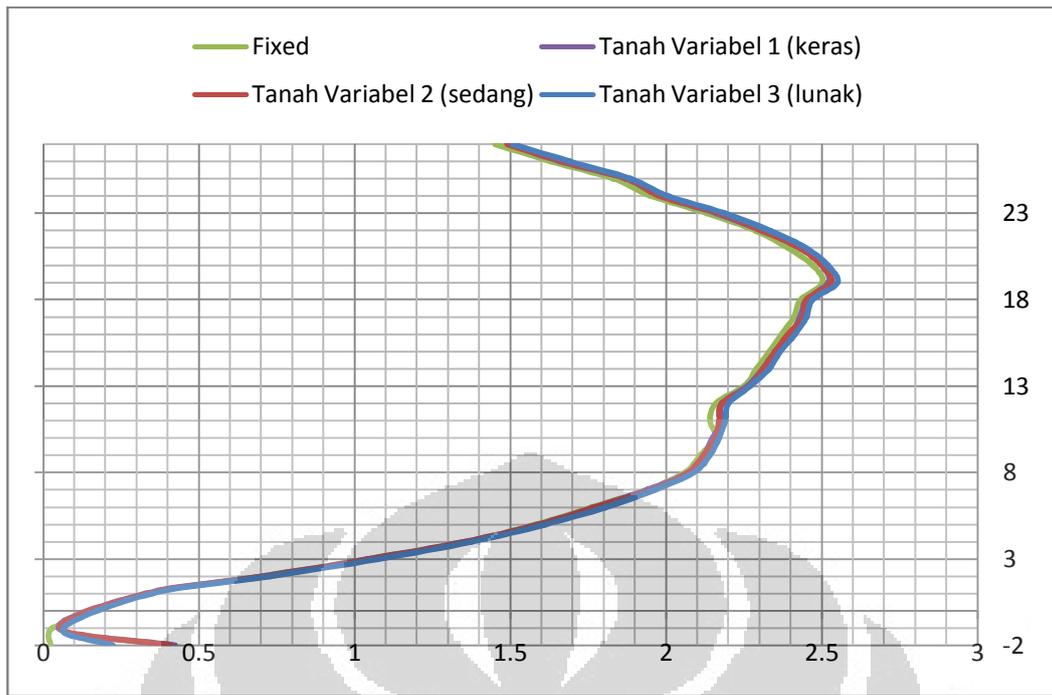
Grafik 4. Momen Guling Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



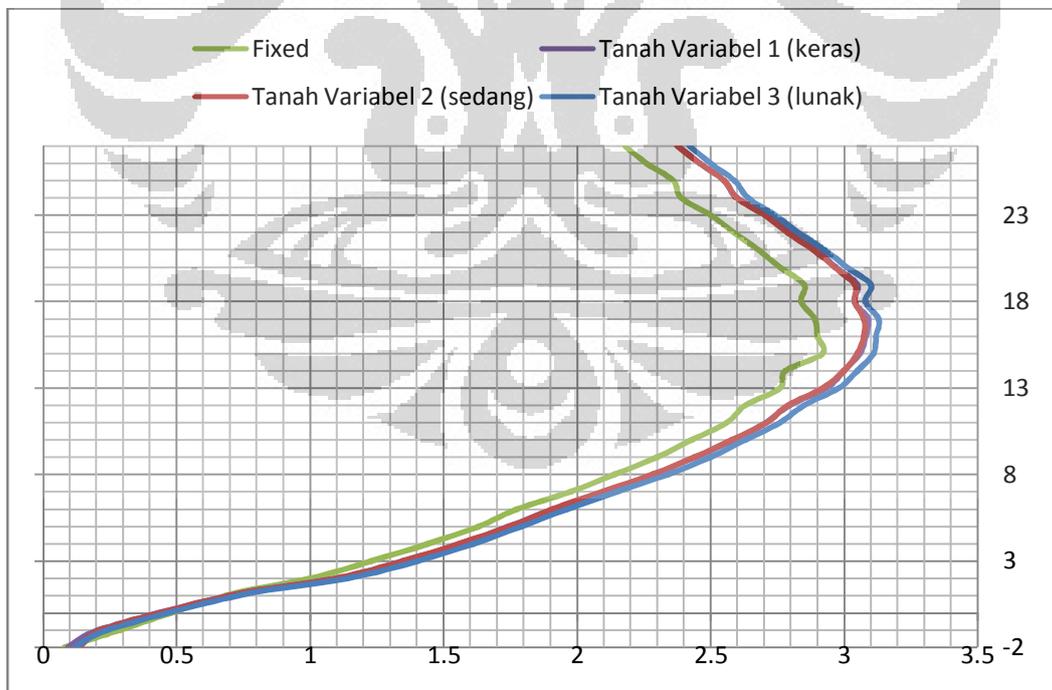
Grafik 5. Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap.



Grafik 6. Simpangan Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi Displacement Maksimum Pada Atap. Nilai simpangan



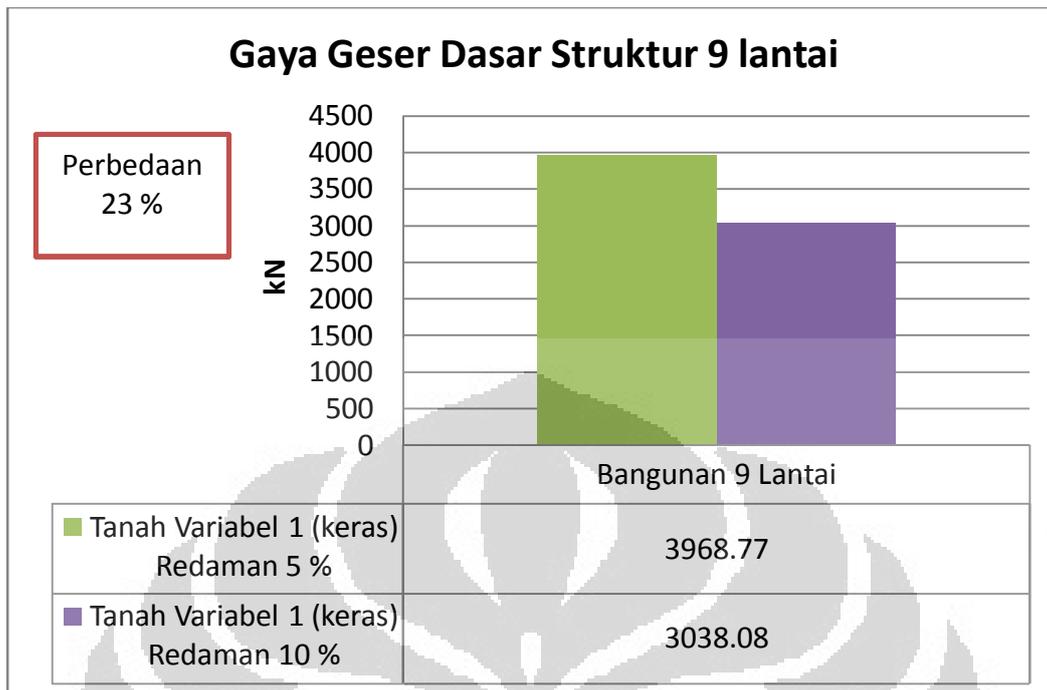
Grafik 7. *Story Drift* Arah Memanjang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi EW Pada Struktur 18 Lantai



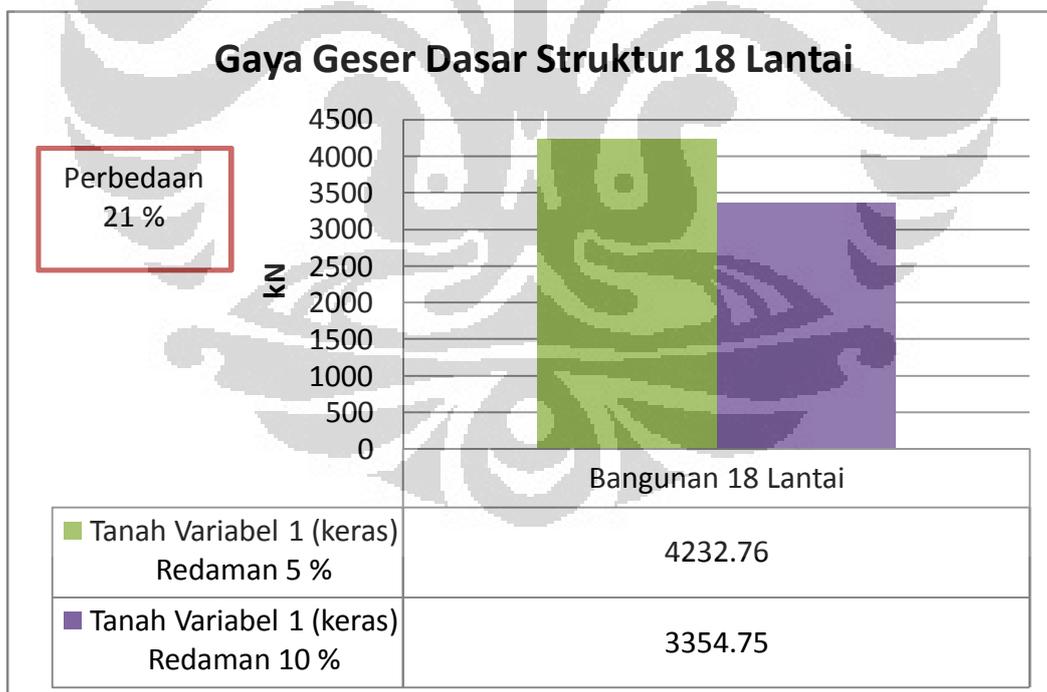
Grafik 8. *Story Drift* Arah Melintang Struktur Akibat Gempa Chi-Chi NS Pada Struktur 18 Lantai

LAMPIRAN 4

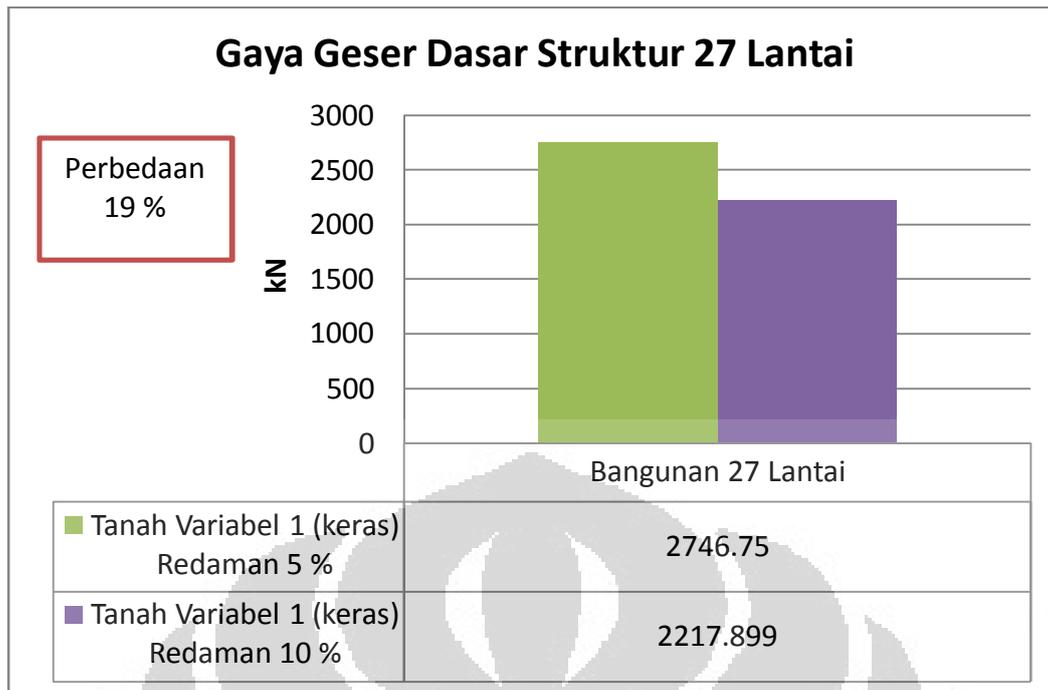
Lampiran 4. Perbandingan *base shear* struktur untuk redaman 5 % dan 10 %



Grafik 1. Nilai *Base Shear* Untuk Struktur dan Tanah Pada Redaman 5% dan 10%



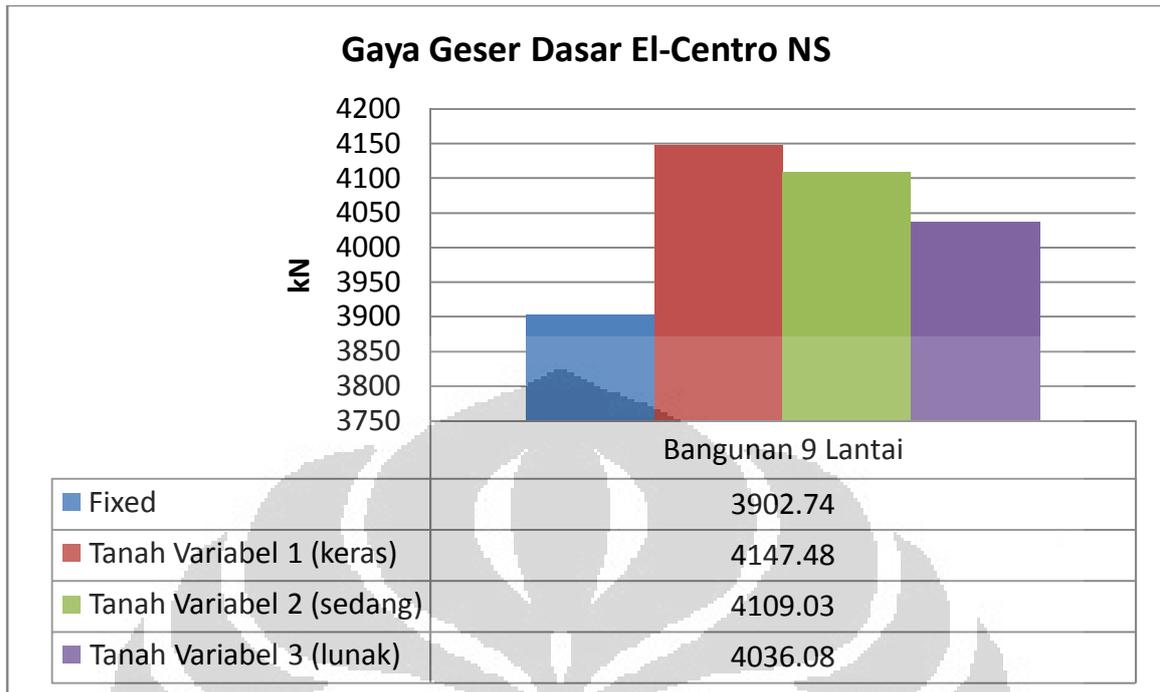
Grafik 2. Nilai *Base Shear* Untuk Struktur dan Tanah Pada Redaman 5% dan 10%



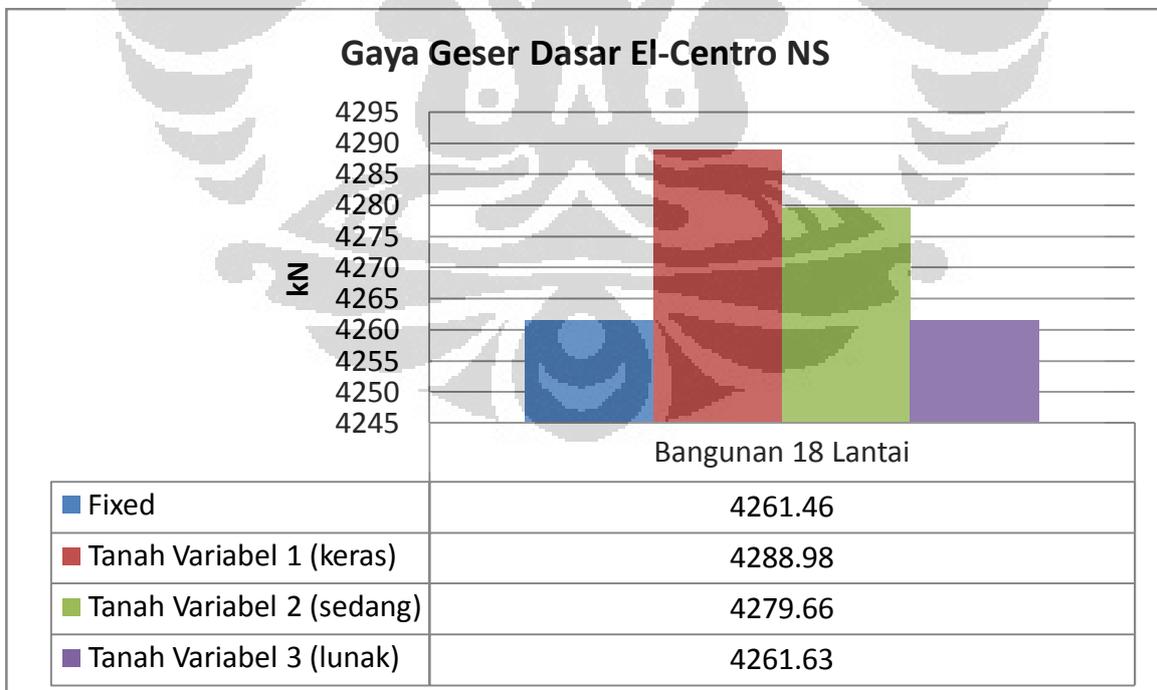
Grafik 3. Nilai *Base Shear* Untuk Struktur dan Tanah Pada Redaman 5% dan 10%

LAMPIRAN 5

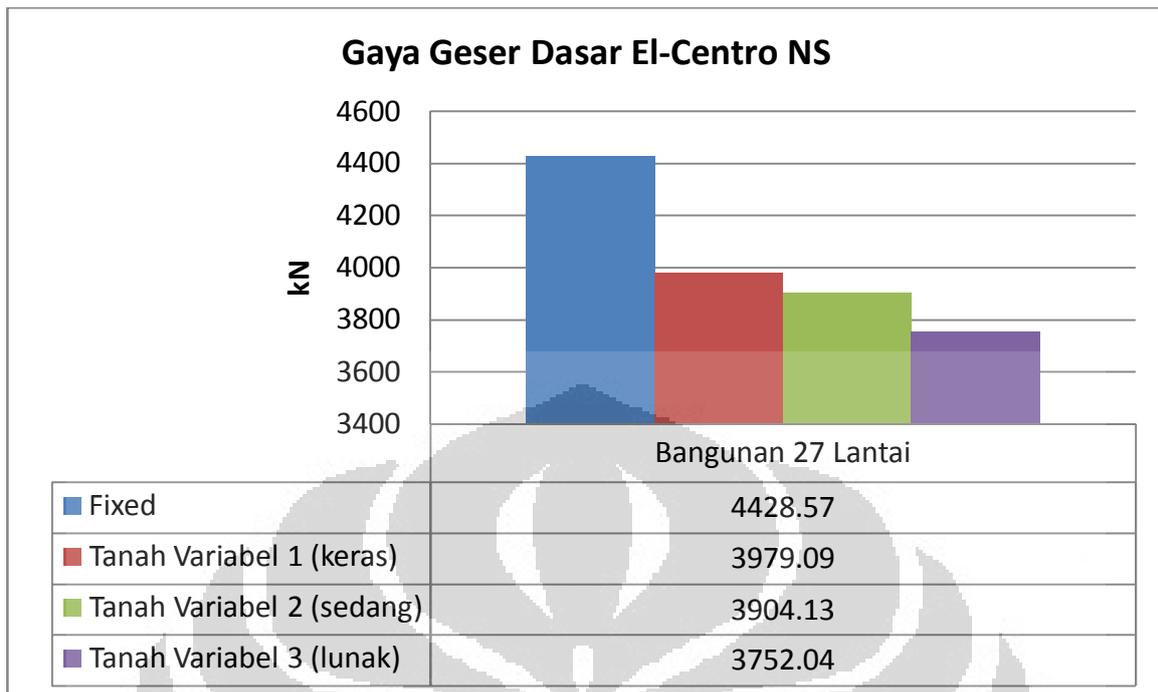
Lampiran 5. Nilai gaya geser dasar untuk rekaman El-Centro



Grafik 1. Nilai *Base Shear* Untuk Struktur 9 Lantai.



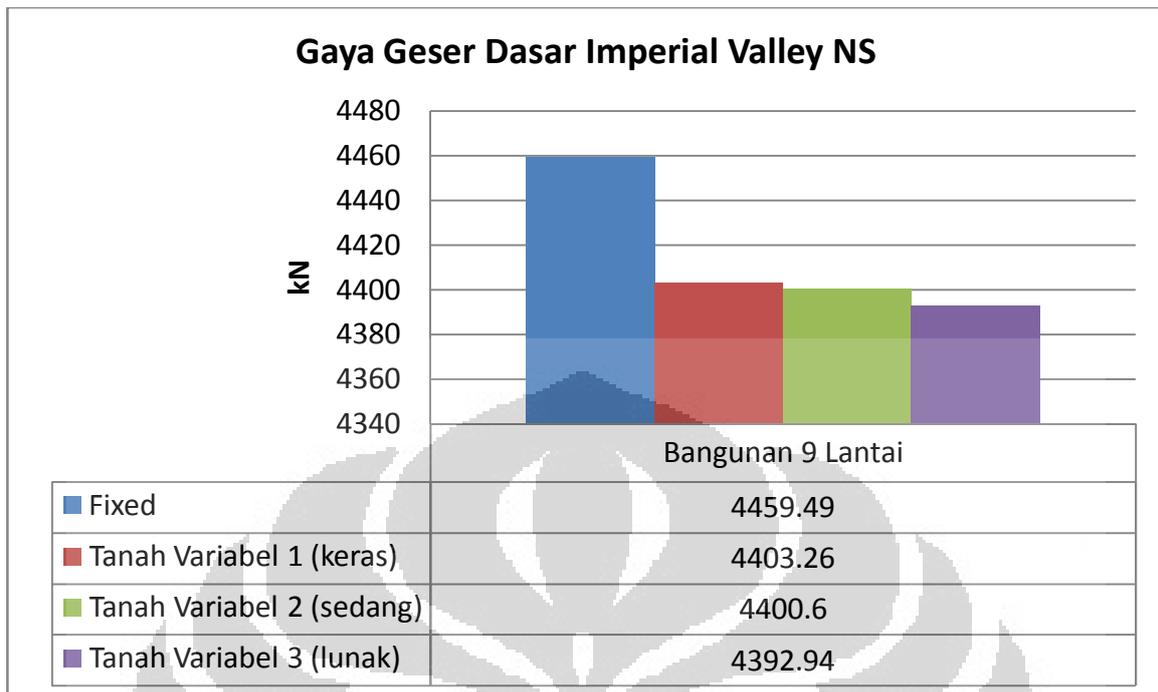
Grafik 2. Nilai *Base Shear* Untuk Struktur 18 Lantai.



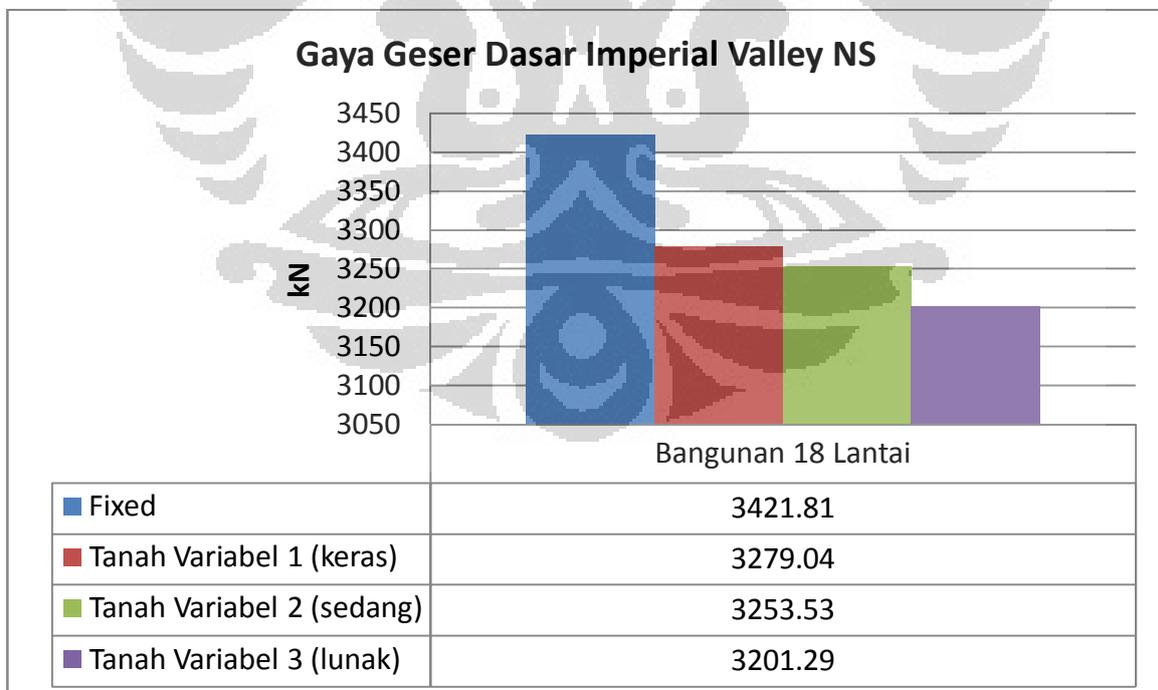
Grafik 3. Nilai *Base Shear* Untuk Struktur 27 Lantai.

LAMPIRAN 6

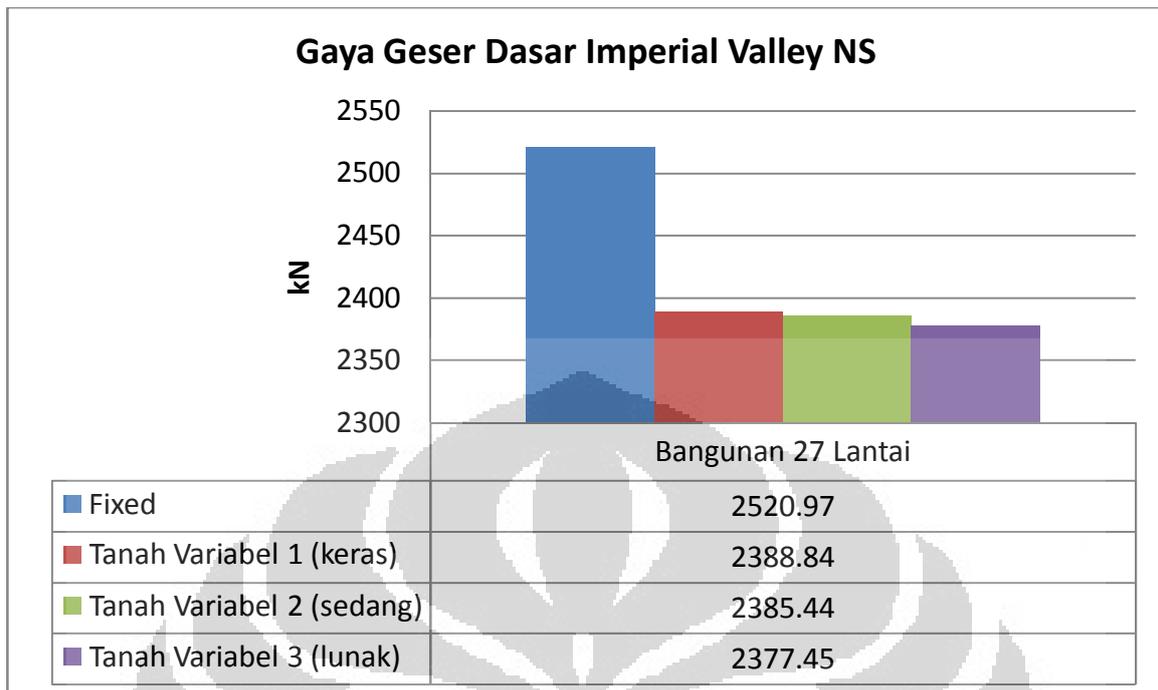
Lampiran 6. Nilai gaya geser dasar untuk rekaman Imperial Valley



Grafik 1. Nilai *Base Shear* Untuk Struktur 9 Lantai.



Grafik 2. Nilai *Base Shear* Untuk Struktur 18 Lantai.



Grafik 3. Nilai *Base Shear* Untuk Struktur 27 Lantai.

LAMPIRAN 7

Lampiran 7. nilai *story shear* dari rekaman gempa Chi - Chi

Story Shear Chi – Chi EW (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
9	87.17	9	92.35	9	94.813	9	98.593
8	62.45	8	71.436	8	76.54	8	84.32
7	-129.504	7	-124.021	7	-119.89	7	-108.2266
6	-527.516	6	-515.87	6	-512.21	6	-489.916
5	-1107.55	5	-1096.52	5	-1078.6	5	-1059.713
4	-1806.47	4	-1793.92	4	-1785.22	4	-1765.38
3	-2505.13	3	-2510.47	3	-2504.1	3	-2487.166
2	-3084.92	2	-3104.002	2	-3113.215	2	-3108.225
1	-3464.25	1	-3488.22	1	-3496.97	1	-3510.27

Tabel 1. *Story Shear* Pada Struktur 9 Lantai Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik
Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Story Shear Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
9	-676.456	9	-600.54	9	-602.453	9	-623.0322
8	-1454.85	8	-1313.41	8	-1325.078	8	-1346.787
7	-2081.626	7	-1912.23	7	-1926.803	7	-1966.965
6	-2590.077	6	-2411.386	6	-2426.58	6	-2462.416
5	-2993.15	5	-2822.44	5	-2845.398	5	-2875.165
4	-3317.1	4	-3174.81	4	-3188.43	4	-3212.63
3	-3601.5	3	-3492.26	3	-3501.71	3	-3520.15
2	-3866.35	2	-3771.72	2	-3779.4	2	-3798.6
1	-4086.46	1	-3969.21	1	-3957.78	1	-4012.26

Tabel 2. *Story Shear* Pada Struktur 9 Lantai Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik
Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Story Shear Chi – Chi EW (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
18	-244.86	18	-243.22	18	-243.81	18	-241.94
17	-500.2437	17	-502.77	17	-501.83	17	-499.648
16	-677.327	16	-677.894	16	-677.188	16	-674.19
15	-766.394	15	-765.53	15	-764.47	15	-759.522
14	-772.32	14	-767.95	14	-765.63	14	-759.803
13	-705.35	13	-696.19	13	-693.73	13	-686.8188
12	-592.237	12	-574.56	12	-569.87	12	-563.57
11	-460.139	11	-435.566	11	-431.77	11	-421.6564
10	-343.55	10	-313.447	10	-306.902	10	-294.61
9	-294.18	9	-259.25	9	-252.11	9	-238.82
8	-322.81	8	-283.177	8	-273.7625	8	-257.623
7	-482.23	7	-436.84	7	-423.59	7	-407.687
6	-784.62	6	-734.62	6	-719.88	6	-703.03
5	-1221.67	5	-1169.64	5	-1155.63	5	-1131.1
4	-1754.99	4	-1702.46	4	-1690.39	4	-1671.757
3	-2315.703	3	-2292.705	3	-2277.891	3	-2270.416
2	-2860.42	2	-2839.53	2	-2842.5	2	-2841.622
1	-3287.14	1	-3275.5	1	-3284.01	1	-3296.41

Tabel 3. *Story Shear* Pada Struktur 18 Lantai Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik
Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Story Shear Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
18	170.77	18	174.26	18	170.299	18	165.116
17	355.296	17	362.83	17	354.58	17	341.555
16	495.7057	16	498.791	16	487.84	16	467.96
15	587.83	15	580.529	15	567.62	15	543.99
14	625.911	14	606.59	14	591.48	14	564.77
13	606.832	13	571.3	13	554.98	13	525.441
12	523.54	12	468.12	12	452.12	12	422.13
11	376.44	11	294.57	11	277.14	11	249.21
10	152.67	10	48.976	10	29.98	10	2.755
9	-83.552	9	-209.1535	9	-225.67	9	-253.04
8	-470.165	8	-619.56	8	-630.83	8	-658.265

Story Shear Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
7	-942.296	7	-1110.16	7	-1124.166	7	-1154.072
6	-1466.351	6	-1655.114	6	-1669.25	6	-1692.9
5	-2033.103	5	-2226.055	5	-2244.293	5	-2270.307
4	-2601.17	4	-2790.89	4	-2818.555	4	-2842.512
3	-3163.82	3	-3348.47	3	-3368.25	3	-3400.45
2	-3686.93	2	-3839.89	2	-3869.93	2	-3913.37
1	-4113.82	1	-4228.29	1	-4263.55	1	-4322.87

Tabel 4. *Story Shear* Pada Struktur 18 Lantai Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Story Shear Chi – Chi EW (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
27	195.687	27	197.4	27	197.13	27	200.802
26	447.38	26	445.445	26	443.07	26	448.05
25	665.786	25	669.273	25	660.43	25	673.3434
24	870.38	24	872.03	24	862.81	24	878.332
23	1054.64	23	1057.11	23	1049.24	23	1062.71
22	1215.58	22	1218.1603	22	1206.28	22	1222.644
21	1354.96	21	1358.63	21	1343.88	21	1364.71
20	1480.197	20	1483.157	20	1467.75	20	1487.11
19	1594.43	19	1597.3	19	1579.75	19	1599.2775
18	1683.84	18	1688.81	18	1669.5	18	1690.156
17	1799.69	17	1802.75	17	1783.51	17	1801.15
16	1914.99	16	1917.596	16	1895.89	16	1915.89
15	2025.98	15	2031.445	15	2006.08	15	2028.411
14	2131.99	14	2131.52	14	2108.88	14	2131.87
13	2216.86	13	2220.644	13	2194.46	13	2218.066
12	2268.79	12	2272.797	12	2248.01	12	2272.65
11	2268.595	11	2271.45	11	2247.495	11	2274.48
10	2190.05	10	2191.47	10	2168.78	10	2199.62
9	2037.0345	9	2040.46	9	2025.413	9	2051.04
8	1737.47	8	1735.41	8	1731.98	8	1757.07
7	1304.877	7	1302.84	7	1306.21	7	1327.48
6	730.72	6	724.46	6	723.16	6	756.27
5	23.718	5	-8.09	5	27.2	5	35.856
4	-741.85	4	-773	4	-750.74	4	-733.046

Story Shear Chi – Chi EW (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
3	-1504.92	3	-1532.86	3	-1515.93	3	-1514.28
2	-2182.15	2	-2225.37	2	-2217.446	2	-2222.698
1	-2743.765	1	-2813.57	1	-2802.747	1	-2820.182

Tabel 5. *Story Shear* Pada Struktur 27 Lantai Akibat Gempa Chi-Chi EW Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.

Story Shear Chi – Chi NS (kN)							
Fixed		Tanah Variabel 1 (keras)		Tanah Variabel 2 (sedang)		Tanah Variabel 3 (lunak)	
27	175.34	27	155.912	27	154.48	27	152.18
26	394.84	26	351.204	26	349.533	26	344.2233
25	601.1185	25	533.096	25	527.56	25	521.695
24	791.84	24	703.778	24	695.17	24	683.7925
23	967.297	23	860.25	23	850.16	23	835.76
22	1119.2928	22	994.389	22	981.8	22	964.51
21	1244.4947	21	1104.88	21	1089.23	21	1069.25
20	1341.299	20	1187.83	20	1170.08	20	1147.31
19	1408.49	19	1242.578	19	1222.57	19	1196.546
18	1437.222	18	1263.288	18	1242.22	18	1213.53
17	1443.3547	17	1260.45	17	1237.67	17	1205.535
16	1419.26	16	1230.71	16	1205.77	16	1170.337
15	1370.166	15	1176.388	15	1150.23	15	1110.27
14	1301.324	14	1104.948	14	1079.11	14	1034.615
13	1220.0245	13	1024.05	13	997.57	13	948.713
12	1133.4585	12	938.912	12	911.22	12	857.4
11	1052.8021	11	860.711	11	832.59	11	774.364
10	990.726	10	803.556	10	775.06	10	712.642
9	964.59	9	783.54	9	755.055	9	688.296
8	975.1218	8	803.195	8	773.55	8	702.165
7	1038.57	7	876.273	7	845.43	7	769.405
6	1168.19	6	1019.3125	6	987.787	6	906.345
5	1380.54	5	1243.45	5	1214.93	5	1126.19
4	1665.15	4	1542.05	4	1505.72	4	1420.277
3	2019.697	3	1904.388	3	1871.7	3	1776.56
2	2415.3	2	2318.59	2	2282.69	2	2187.56
1	2849.97	1	2746.71	1	2716.35	1	2626.876

Tabel 6. *Story Shear* Pada Struktur 27 Lantai Akibat Gempa Chi-Chi NS Saat Detik Dimana Terjadi *Base Shear* Maksimum.