

780/FT.01/SKRIP/01/2008

**EFEK PENJEPITAN PADA BANGUNAN TINGGI
DENGAN BESEMEN AKIBAT BEBAN GEMPA**

SKRIPSI

Oleh

Yudhistira Tarigan

04 03 01 707 5



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN SIPIL
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

EFEK PENJEPITAN PADA BANGUNAN TINGGI DENGAN BESEMEN AKIBAT BEBAN GEMPA

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 3 Januari 2008

Yudhistira Tarigan

04 03 01 707 5

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

EFEK PENJEPITAN PADA BANGUNAN TINGGI DENGAN BESEMEN AKIBAT BEBAN GEMPA

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 3 Januari 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 3 Januari 2008

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Yuskar Lase

NIP 131 668 155

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Dr. Ir. Yuskar Lase

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.

Yudhistira Tarigan
NPM 04 03 01 707 5
Departemen Teknik Sipil

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Yuskar Lase

EFEK PENJEPITAN PADA BANGUNAN TINGGI DENGAN BESEMEN AKIBAT BEBAN GEMPA

ABSTRAK

Tantangan yang dihadapi oleh insinyur teknik sipil dalam mendesain bangunan tinggi dengan besemen adalah menentukan taraf penjepitan struktur, sehingga didapatkan respon struktur yang mendekati kondisi sebenarnya. Untuk tantangan tersebut, maka para insinyur teknik sipil berusaha menemukan metode analisa yang tepat terkait dengan interaksi sistem struktur atas (frame dan dinding geser) dengan sistem struktur bawah (besemen dan tanah di sekeliling besemen).

Ada 2 metode yang sering digunakan dan dibandingkan antara lain, metode pertama dengan analisa terpisah sistem struktur atas dan sistem struktur bawah, dan metode kedua dengan analisa gabungan sistem struktur atas dan sistem struktur bawah. Dalam skripsi ini, penelitian dilakukan menggunakan bantuan program SAP dengan mengidealisasikan bangunan dalam bentuk pemodelan 2 dimensi. Struktur secara umum terdiri atas frame dan dinding geser yang dimodelkan sebagai elemen *shell*, dan dinding besemen yang dimodelkan sebagai kolom. Jumlah lantai struktur atas divariasikan mulai dari 10, 20, dan 30 lantai. Sedangkan variasi pemodelan tanah di sekeliling besemen, pertama dimodelkan sebagai sistem pegas-redaman, dan kedua dimodelkan dengan elemen *plane strain*. Level penjepitan divariasikan dengan cara menjepit struktur pada taraf lantai dasar, taraf besemen, dan batuan dasar (*bedrock*).

Data yang diperoleh berupa respon struktur akibat beban gempa berupa periode getar, *displacement* puncak, gaya geser dan momen guling dasar, serta gaya geser pada taraf lantai dasar. Hasil akhir yang dianalisa yaitu efek level penjepitan terhadap respon struktur, efek pemodelan tanah dalam menyerap gaya inersia gempa secara khusus dampaknya terhadap besemen, dan efek dari variasi pemodelan tanah terhadap besarnya gaya inersia gempa yang diserap oleh tanah.

Kata kunci : Struktur, Besemen, Tanah, Taraf, Respon, Gempa

Yudhistira Tarigan
NPM 04 03 01 707 5
Civil Department Engineering

Counsellor
Dr. Ir. Yuskar Lase

**EFEK PENJEPITAN PADA BANGUNAN TINGGI DENGAN BESEMEN
AKIBAT BEBAN GEMPA**

ABSTRACT

The challenge faced by civil engineers in designing high rise buildings with basements is how to determine the level of restraint structure so that structure responses that are nearest to the actual condition can be obtained. For that challenge, a lot of engineers have tried to find the most precise method of analysis with regard to the interaction between the upper structure (frame and shear wall) and lower structure systems (basement and the soil surrounding basement wall).

There are two methods of analysis that are often used and compared. The first is by using separate analysis of upper structure and lower structure systems, and the second is by using a combine analysis of both structure systems. In this thesis, the research was done using SAP software by idealizing building into two dimensional structure. Generally, the structure consists of frame, shear wall modeled as shell element, and basement wall modeled as column. The number of floors varies from 10, 20 , to 30 floors. Whereas, the variation of soil surrounding the basement wall is modeled, first as spring-dashpot system, second as plane strain element. The level of restraint is varied by restraining the structure on the ground level, the basement level, and the bedrock.

The output of this research is structure responses as a result of seismic load, which are, among others, vibration period, top displacement, base reactions (overturning moment and base shear), and story shear at ground level. The final results that are analyzed are the effect of restraint level on structure responses, the effect of soil modeling in absorbing earthquake inertia force, especially its impact on basement, and the effect of soil modeling variation on how much earthquake inertia force is absorbed by soil surrounding basement.

Keywords : Structure, Basement, Soil, Level, Respons, Earthquake

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|----------------|
| PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI..... | ii |
| PENGESAHAN..... | iii |
| UCAPAN TERIMA KASIH..... | iv |
| DAFTAR ISI..... | vii |
| DAFTAR GAMBAR..... | x |
| DAFTAR TABEL..... | xi |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xiv |
| DAFTAR SINGKATAN..... | xv |
| DAFTAR ISTILAH DAN SIMBOL..... | xvi |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1. LATAR BELAKANG MASALAH..... | 1 |
| 1.2. SISTEMATIKA PENULISAN..... | 2 |
| 1.3. TUJUAN PENULISAN..... | 3 |
| 1.4. PEMBATALAN MASALAH..... | 3 |
| 1.5. HIPOTESIS..... | 4 |
| 1.6. RUMUSAN PERMASALAHAN..... | 4 |
| BAB II MODELISASI TANAH..... | 5 |
| 2.1. KONSEP DASAR INTERAKSI STRUKTUR TANAH..... | 5 |
| 2.1.1. Sasaran dari Interaksi Struktur Tanah..... | 5 |
| 2.1.2. Efek Interaksi Struktur Tanah..... | 6 |
| 2.1.3. Substructure Method pada Interaksi Struktur Tanah..... | 9 |
| 2.1.4. Persamaan Gerak Dasar, Interaksi Kinematik Inersia..... | 10 |
| 2.1.4.1. Flexible Base..... | 10 |
| 2.1.4.1.1. Persamaan Gerak Dasar..... | 10 |
| 2.1.4.1.2. Interaksi Kinematik dan Inersia..... | 13 |
| 2.1.4.2. Rigid Base..... | 15 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.4.2.1. Persamaan Gerak Dasar | 15 |
| 2.1.4.2.2. Interaksi Kinematik dan Inersia | 18 |
| 2.1.5. Modifikasi Tanah dari Gerak Gempa Bumi..... | 20 |
| 2.2. PEMODELAN TANAH..... | 23 |
| 2.2.1. Modulus Geser | 23 |
| 2.2.2. Rasio Poisson | 26 |
| 2.2.3. Modulus Tegangan Regangan..... | 27 |
| 2.3. SIFAT ELASTISITAS TANAH..... | 28 |
| 2.3.1. Tanah Sebagai Elemen Pegas..... | 28 |
| 2.3.2. Tanah sebagai Elemen Plane Strain | 31 |
| 2.3.2.1. Hipotesa | 31 |
| 2.3.2.2. Formulasi Elemen Hingga | 31 |
| 2.3.3. Gempa sebagai Tekanan Tanah | 32 |
| BAB III MODELISASI STRUKTUR | 34 |
| 3.1. MODELISASI STRUKTUR ATAS DENGAN ELEMEN HINGGA.. | 34 |
| 3.1.1. Pembentukan Matrik Kekakuan..... | 35 |
| 3.1.2. Pembentukan Matrik Massa..... | 35 |
| 3.1.3. Pembentukan Matrik Redaman..... | 36 |
| 3.2. FORMULASI PERSAMAAN GERAK STRUKTUR ATAS..... | 37 |
| 3.3. ANALISA BEBAN DINAMIK PADA STRUKTUR ATAS | 39 |
| 3.3.1. Properti Modal | 39 |
| 3.3.2. Persamaan Modal..... | 40 |
| 3.3.3. Analisa Respons Spektrum | 41 |
| BAB IV METODOLOGI PENELITIAN | 43 |
| 4.1. INFORMASI UMUM PEMODELAN STRUKTUR ATAS..... | 43 |
| 4.1.1. Pemodelan Struktur..... | 43 |
| 4.1.2. Pemodelan Tanah..... | 45 |
| 4.1.3. Material dan Pembebanan Struktur..... | 47 |
| 4.2. VARIASI PEMODELAN..... | 49 |
| 4.2.1. Penjepitan Lateral Struktur atas pada Taraf Lantai Dasar | 49 |
| 4.2.2. Penjepitan Lateral Struktur atas pada Taraf Lantai Basement..... | 51 |
| 4.2.3. Pemodelan Sistem Tanah-Struktur Secara Utuh..... | 53 |

| | |
|--|----|
| 4.3. OUTPUT PEMODELAN | 55 |
| BAB V HASIL ANALISA RESPON DINAMIK STRUKTUR DAN DISKUSI | 58 |
| 5.1. ANALISA | 58 |
| 5.2. HASIL ANALISA | 59 |
| 5.2.1. Bangunan 10 Lantai | 60 |
| 5.2.1.1. Berat Total dan Berat Gempa..... | 60 |
| 5.2.1.2. Periode Getar Mode 1 dan Displacement Puncak..... | 60 |
| 5.2.1.3. Gaya Geser dan Momen Guling di Perletakan..... | 62 |
| 5.2.1.4. Gaya Geser di Taraf Lantai Dasar..... | 64 |
| 5.2.1.5. Gaya Dalam Geser Dinding Basement | 65 |
| 5.2.2. Bangunan 20 Lantai | 66 |
| 5.2.2.1. Berat Total dan Berat Gempa..... | 66 |
| 5.2.2.2. Periode Getar Mode 1 dan Displacement Puncak..... | 66 |
| 5.2.2.3. Gaya Geser dan Momen Guling di Perletakan..... | 67 |
| 5.2.2.4. Gaya Geser di Taraf Lantai Dasar..... | 69 |
| 5.2.2.5. Gaya Dalam Geser Dinding Basement | 70 |
| 5.2.3. Bangunan 30 Lantai | 71 |
| 5.2.3.1. Berat Total dan Berat Gempa..... | 71 |
| 5.2.3.2. Periode Getar Mode 1 dan Displacement Puncak..... | 72 |
| 5.2.3.3. Gaya Geser dan Momen Guling di Perletakan..... | 73 |
| 5.2.3.4. Gaya Geser di Taraf Lantai Dasar..... | 75 |
| 5.2.3.5. Gaya Dalam Geser Dinding Basement | 76 |
| 5.3. DISKUSI HASIL ANALISA..... | 77 |
| 5.3.1. Pengaruh Variasi Taraf Perletakan terhadap Respon Struktur..... | 77 |
| 5.3.2. Pengaruh Pemodelan Tanah terhadap Respon Struktur | 81 |
| BAB VI KESIMPULAN | 87 |
| DAFTAR PUSTAKA | 89 |

DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|--|----------------|
| Gambar 1.1. Struktur Bangunan Tinggi dengan Basement..... | 3 |
| Gambar 2.1. Sasaran dari Interaksi Struktur Tanah..... | 6 |
| Gambar 2.2. Proses interaksi struktur tanah..... | 7 |
| Gambar 2.3. Amplifikasi gerakan pada tanah lunak..... | 8 |
| Gambar 2.4. Interaksi Struktur Tanah akibat Gempa dengan <i>Substructure Method</i> | 10 |
| Gambar 2.6. Subsistem referensi..... | 10 |
| Gambar 2.7. Interpretasi fisik dari persamaan gerak dalam peralihan total | 13 |
| Gambar 2.8. Interpretasi fisik dari interaksi kinematik dan inersia..... | 15 |
| Gambar 2.9. Sistem tanah referensi dengan galian dan permukaan sentuh struktur tanah..... | 16 |
| Gambar 2.10. Interpretasi fisik dari persamaan gerak dalam peralihan total | 18 |
| Gambar 2.11. Gerak kinematik dan inersia..... | 19 |
| Gambar 2.12. Interpretasi fisik dari interaksi kinematik dan inersia..... | 20 |
| Gambar 4.1. Model umum struktur tanah..... | 44 |
| Gambar 4.2. Struktur atas dijepit lateral pada taraf lantai dasar..... | 50 |
| Gambar 4.3. Struktur jepit pada lantai basement 1..... | 53 |
| Gambar 4.4. Sistem struktur-tanah dengan pile..... | 54 |
| Gambar 5.1. Contoh Output Gaya Dalam Geser Mode ke-n..... | 59 |
| Gambar 5.1. Deskripsi D1 dan D2..... | 61 |

DAFTAR TABEL

| | Halaman |
|---|----------------|
| Tabel 2.1. Modulus Geser Tanah Kasus Dinamik | 25 |
| Tabel 2.2. Rasio Poisson Beberapa Jenis Tanah | 26 |
| Tabel 2.3. Nilai E berdasarkan SPT dan CPT | 27 |
| Tabel 2.4. Nilai E untuk beberapa jenis tanah | 28 |
| Tabel 2.5. <i>Fundamental of Earthquake Engineering</i> | 29 |
| Tabel 2.6. Novak dan Beredugo | 29 |
| Tabel 4.1. Dimensi balok, kolom, dan shear wall untuk masing-masing variasi jumlah lantai | 44 |
| Tabel 5.1. Berat Struktur 10 Lantai | 60 |
| Tabel 5.2. Rasio Gaya Geser Dasar Analisa Statik Ekuivalen | 63 |
| Tabel 5.3. Berat Struktur 20 Lantai | 66 |
| Tabel 5.4. Rasio Gaya Geser Dasar Analisa Statik Ekuivalen | 68 |
| Tabel 5.5. Berat Struktur 30 Lantai | 71 |
| Tabel 5.6. Rasio Gaya Geser Dasar Analisa Statik Ekuivalen | 74 |
| Grafik 4.5.a. Respon displacement untuk 10 lantai | 54 |
| Grafik 4.1.b. Respon displacement untuk 20 lantai | 55 |
| Grafik 5.1. Periode getar (T_1) pemodelan struktur 10 lantai | 60 |
| Grafik 5.2. Displacement puncak pemodelan struktur 10 lantai | 61 |
| Grafik 5.3. Gaya geser dasar | 62 |
| Grafik 5.4. Rasio gaya geser dasar | 62 |
| Grafik 5.5. Momen guling dasar | 63 |
| Grafik 5.6. Rasio momen guling dasar | 64 |
| Grafik 5.7. Gaya geser pada taraf lantai dasar | 64 |
| Grafik 5.8. Rasio gaya geser pada taraf lantai dasar | 65 |

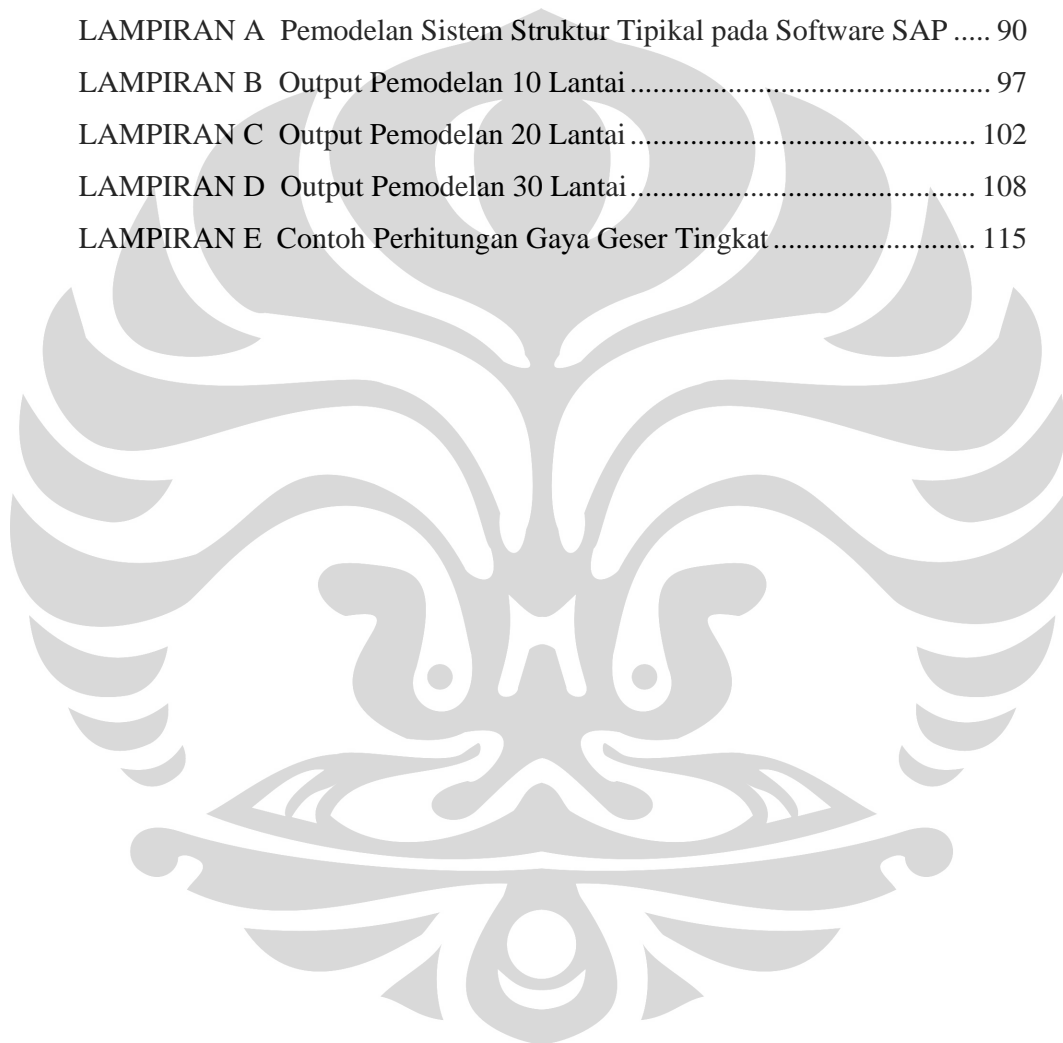
| | |
|--|----|
| Grafik 5.9. Gaya dalam geser sepanjang dinding basement | 65 |
| Grafik 5.10. Periode getar (T_1) | 66 |
| Grafik 5.11. Displacement puncak..... | 67 |
| Grafik 5.12. Gaya geser dasar | 67 |
| Grafik 5.13. Rasio gaya geser dasar..... | 68 |
| Grafik 5.14. Momen guling dasar | 69 |
| Grafik 5.15. Rasio momen guling dasar..... | 69 |
| Grafik 5.16. Gaya geser pada taraf lantai dasar | 70 |
| Grafik 5.17. Gaya geser pada taraf lantai dasar | 70 |
| Grafik 5.18. Gaya dalam geser dinding besemen | 71 |
| Grafik 5.19. Periode getar (T_1) | 72 |
| Grafik 5.20. Displacement puncak..... | 72 |
| Grafik 5.21. Gaya geser dasar | 73 |
| Grafik 5.22. Rasio gaya geser dasar..... | 73 |
| Grafik 5.23. Momen guling dasar | 74 |
| Grafik 5.24. Rasio momen guling dasar..... | 75 |
| Grafik 5.25. Gaya geser pada taraf lantai dasar | 75 |
| Grafik 5.26. Gaya geser pada taraf lantai dasar | 76 |
| Grafik 5.27. Gaya dalam geser dinding besemen | 76 |
| Grafik 5.28. Variasi taraf perletakan terhadap periode..... | 77 |
| Grafik 5.29. Variasi taraf perletakan terhadap displacement puncak | 78 |
| Grafik 5.30. Variasi taraf perletakan terhadap gaya geser dasar..... | 78 |
| Grafik 5.31. Variasi taraf perletakan terhadap momen guling dasar | 79 |
| Grafik 5.32. Variasi taraf perletakan terhadap rasio gaya geser dasar..... | 80 |
| Grafik 5.33. Variasi taraf perletakan terhadap rasio momen guling dasar..... | 80 |
| Grafik 5.34. Variasi taraf perletakan terhadap gaya geser taraf lantai dasar .. | 81 |
| Grafik 5.35. Variasi taraf perletakan terhadap rasio gaya geser taraf lantai dasar | 81 |
| Grafik 5.36. Pemodelan tanah terhadap periode getar | 82 |
| Grafik 5.37. Pemodelan tanah terhadap periode getar | 82 |
| Grafik 5.38. Pemodelan tanah terhadap gaya geser dasar..... | 83 |
| Grafik 5.39. Pemodelan tanah terhadap rasio gaya geser dasar | 84 |

| | |
|--|----|
| Grafik 5.40. Pemodelan tanah terhadap momen guling dasar | 84 |
| Grafik 5.41. Pemodelan tanah terhadap rasio momen guling dasar..... | 84 |
| Grafik 5.42. Pemodelan tanah terhadap gaya geser pada taraf dasar..... | 85 |
| Grafik 5.43. Pemodelan tanah terhadap rasio gaya geser pada taraf dasar | 85 |
| Grafik 5.44. Pemodelan tanah terhadap gaya geser maksimum dinding besemen | 86 |



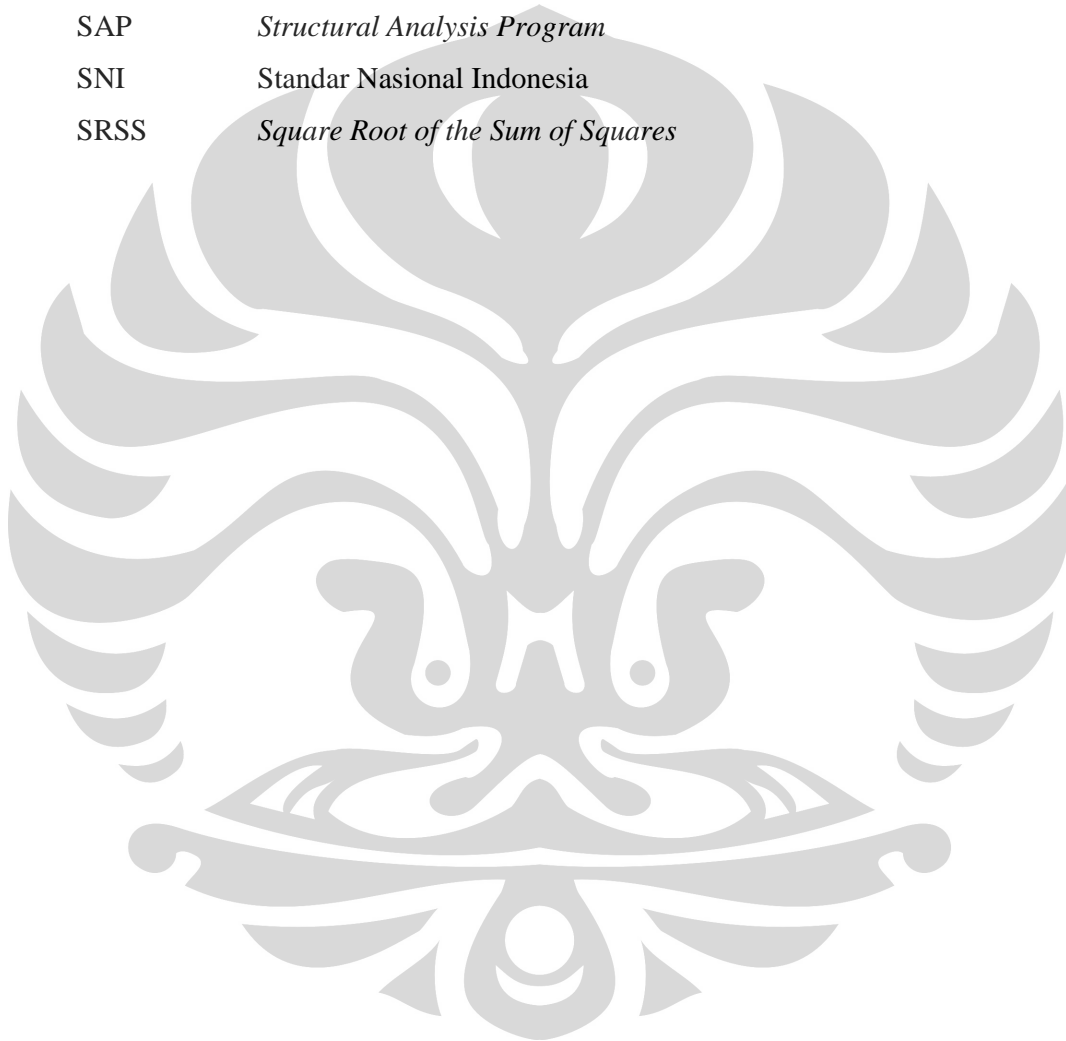
DAFTAR LAMPIRAN

| | Halaman |
|--|----------------|
| LAMPIRAN A Pemodelan Sistem Struktur Tipikal pada Software SAP | 90 |
| LAMPIRAN B Output Pemodelan 10 Lantai | 97 |
| LAMPIRAN C Output Pemodelan 20 Lantai | 102 |
| LAMPIRAN D Output Pemodelan 30 Lantai | 108 |
| LAMPIRAN E Contoh Perhitungan Gaya Geser Tingkat | 115 |



DAFTAR SINGKATAN

| | |
|------|--|
| SAP | <i>Structural Analysis Program</i> |
| SNI | Standar Nasional Indonesia |
| SRSS | <i>Square Root of the Sum of Squares</i> |



DAFTAR ISTILAH DAN SIMBOL

| Simbol | Keterangan | Dimensi |
|-------------|---|-----------|
| C | Percepatan gempa dari grafik respon spektrum | |
| C_x | Redaman tunggal tanah | kN-s/m |
| c_x | Redaman per meter | kN-s/m/m' |
| $D1$ | Peralihan puncak struktur | m |
| $D2$ | Peralihan taraf lantai dasar | m |
| E | Modulus elastisitas | MPa |
| G | Modulus geser | MPa |
| I | Faktor keutamaan gedung | |
| k_o | Koefisien tanah diam | |
| k_A | Koefisien tanah aktif | |
| K_x | Konstanta pegas tunggal tanah | kN/m |
| k_x | Konstanta pegas tanah per meter | kN/m/m' |
| P_{ER} | Gaya lateral terpusat gempa sebagai tekanan tanah | kN/m |
| R | Faktor reduksi gempa | |
| $T1$ | Periode getar struktur mode 1 | s |
| V_{base} | Gaya geser dasar | kN |
| V_c | Kecepatan kompresi tanah | |
| V_s | Kecepatan gelombang geser | |
| W_{gempa} | Berat yang diperhitungkan untuk gempa | kN |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Semakin terbatasnya lahan untuk mendirikan bangunan dan kebutuhan yang terus meningkat akan bangunan untuk kebutuhan publik karena jumlah penduduk yang terus meningkat menjadi tantangan bagi peradaban manusia pada masa sekarang ini. Pengembangan bangunan tidak bisa lagi dilakukan dalam arah horisontal, akan tetapi semakin diarahkan pembangunan dalam arah vertikal. Aplikasinya ada dua hal, yaitu pengembangan ke atas (bangunan bertingkat) dan ke bawah permukaan tanah (besemen). Saat ini, sudah banyak bangunan-bangunan yang merupakan gabungan keduanya, dan akan semakin bertambah.

Kebutuhan di atas menjadi suatu tantangan tersendiri bagi insinyur sipil untuk mendesain bangunan tinggi dengan besemen, secara khusus di Indonesia, yang merupakan wilayah rawan gempa karena merupakan tempat pertemuan 3 lempeng tektonik. Beban gempa, yang diterapkan pada analisa bangunan sebagai gaya lateral akibat percepatan tanah, merupakan gaya yang dominan pada struktur bangunan tinggi, dibandingkan pada struktur bangunan yang relatif rendah dimana beban-beban vertical lebih dominan mempengaruhi. Hal itu dikarenakan bangunan tinggi akan menerima gaya inersia yang cukup besar akibat percepatan tanah yang menyebabkan *displacement* yang relatif lebih besar dibandingkan bangunan rendah, karena kekakuan bangunan tinggi yang relatif lebih kecil, dan tentunya gaya-gaya dalam yang relatif lebih besar, khususnya gaya geser dan momen guling. Jika kita tinjau dari bangunan yang terbenam, seperti besemen, maka interaksi antara struktur terbenam dan tanah akan mempengaruhi respon dari struktur yang ada di atas tanah. Hubungan interaksi struktur dengan tanah adalah hubungan yang menggambarkan bagaimana tanah, dalam hal ini gelombang energi akibat gempa yang disalurkan oleh tanah kepada struktur,

mempengaruhi respon struktur, dan bagaimana respon struktur memberikan pengaruh balik pada tanah yang ada di sekitarnya akibat gerakan struktur dengan tanah yang tidak sefase.

Secara teoritis, interaksi struktur tanah akan sangat berpengaruh untuk kondisi tanah yang relative lunak dibandingkan struktur yang relatif massif. Hal itu disebabkan deformasi tanah baik akibat tanah terhadap struktur maupun akibat respon balik struktur terhadap tanah akan relatif lebih besar dibandingkan untuk kasus tanah yang relatif keras.

Diketahui ada dua metode yang digunakan untuk menganalisa. Pertama dengan menganggap struktur atas dan struktur bawah terpisah sehingga analisa gempanya juga dilakukan secara terpisah sesuai dengan gempa rencana, dimana struktur atas dianggap terjepit lateral pada taraf lantai dasar. Selanjutnya struktur bawah dapat dianggap sebagai struktur tersendiri yang berada di dalam tanah yang dibebani oleh kombinasi beban-beban gempa dan beban dari respon struktur atas. Kedua, dengan menggunakan metode interaksi struktur tanah. Metode ini menganalisa struktur secara keseluruhan bersama-sama dengan tanah dengan memodelkan tanah sebagai komponen struktur yang memiliki nilai kekakuan dan koefisien redaman, Dengan demikian pengaruh tanah terhadap struktur dan struktur terhadap tanah dapat dimodelkan.

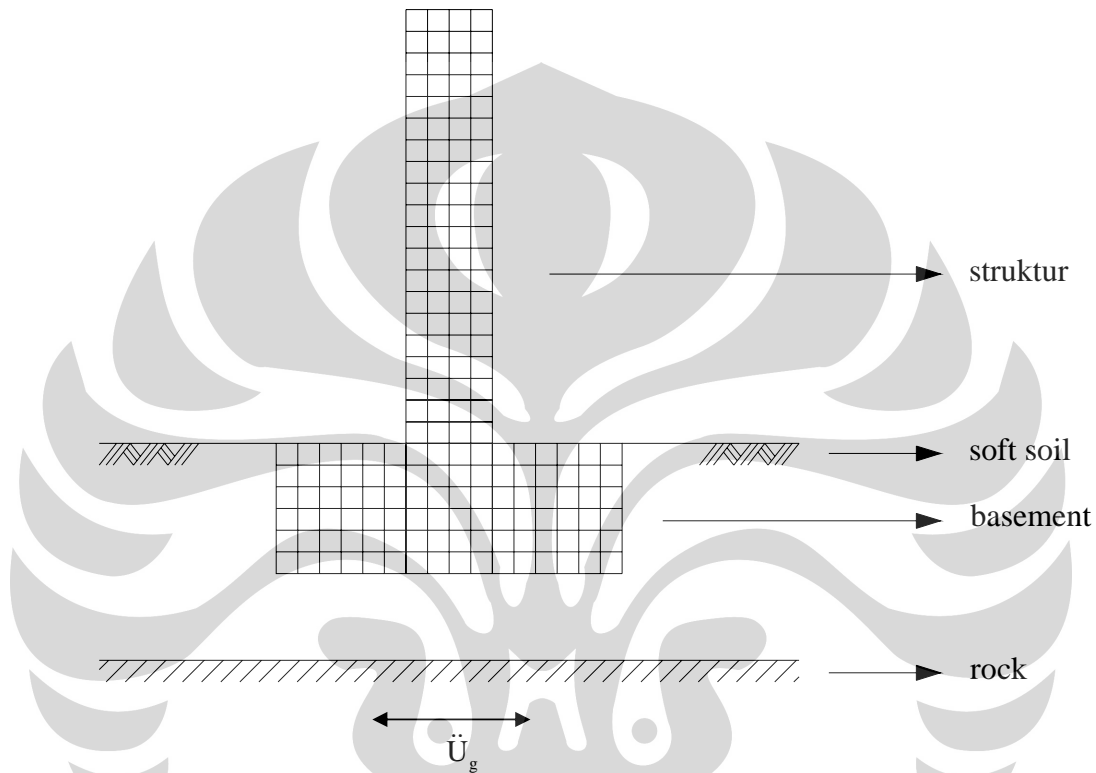
Standar Nasional Indonesia (SNI) menggunakan metode pertama dengan alasan kemudahan perhitungan. Akan tetapi, dengan melihat begitu berpengaruhnya interaksi struktur tanah terhadap respon struktur, maka dengan memodelkan struktur dan tanah sebagai suatu kesatuan, tentunya akan didapatkan hasil yang lebih akurat dibandingkan metode pertama. Secara khusus jika kita berbicara mengenai kondisi tanah di Jakarta yang tergolong tanah lunak, maka tentunya metode kedua akan lebih akurat untuk diterapkan.

1.2. SISTEMATIKA PENULISAN

Dalam pemodelan bangunan tinggi dengan besemen, maka ada 2 parameter yang perlu ditinjau untuk mengetahui respon strukturnya. Parameter pertama adalah level penjepitan lateral dan parameter kedua adalah pemodelan tanah. Kedua parameter divariasikan untuk mengetahui respon struktur.

1.3. TUJUAN PENULISAN

Tujuan penulisan ini adalah untuk mempelajari dan membandingkan hasil analisa dari kedua metode di atas, seberapa besar tanah akan memberikan pengaruh pada respon struktur akibat gempa.



Gambar 1.1. Struktur Bangunan Tinggi dengan Basement

1.4. PEMBATASAN MASALAH

Permasalahan yang akan dibahas dalam penulisan ini dibatasi pada analisa respon struktur dari suatu bangunan yang dimodelisasikan sebagai portal 2 dimensi akibat gaya gempa. Kemudian dinding besemen yang dimodelkan hanya pada arah tegak lurus portal, sedangkan dinding besemen yang sejajar portal tidak dimodelkan. Kekakuan dinding besemen sejajar portal tidak dimasukkan dalam pemodelan. Modelisasi tanah dilakukan dengan mengasumsikan struktur berdiri pada tanah homogen sehingga nilai kekakuan dan koefisien redamannya untuk setiap kedalaman bernilai sama. Tanah dianggap sebagai material elastis, sehingga

deformasi tanah yang terjadi bersifat linear. Kemudian ruang lingkup tanah yang masih terpengaruh oleh interaksi struktur tanah dibatasi pada dimensi tertentu.

1.5. HIPOTESIS

Kehadiran tanah dalam model dengan elastisitasnya mengakibatkan struktur menjadi lebih fleksibel, dan akan menurunkan frekuensi gerak struktur jika dibandingkan dengan struktur yang diasumsikan terjepit di permukaan tanah. Dampak lainnya adalah perubahan peralihan struktur atas sehingga mempengaruhi respon struktur. Penurunan nilai gaya geser tingkat akan terjadi pada struktur besemen, karena sebagian gaya akan diserap oleh tanah.

1.6. RUMUSAN PERMASALAHAN

Keseluruhan penulisan skripsi ini terdiri dari 6 bab, yaitu :

- **BAB I. PENDAHULUAN**
- **BAB II. MODELISASI TANAH**
- **BAB III. MODELISASI STRUKTUR**
- **BAB IV. METODELOGI PENELITIAN**
- **BAB V. ANALISA RESPON DINAMIK STRUKTUR**
- **BAB VI. KESIMPULAN**

BAB II

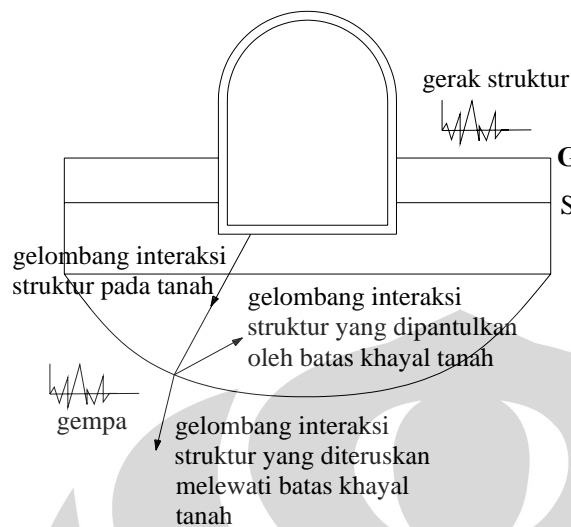
MODELISASI TANAH

2.1. KONSEP DASAR INTERAKSI STRUKTUR TANAH

2.1.1. Sasaran dari Interaksi Struktur Tanah [8]

Dalam banyak kasus dinamik, tanah juga mengalami pembebanan dinamik yang mengakibatkan deformasi, yang tentunya dalam pemodelan harus diperhitungkan karena mempengaruhi kekakuan struktur. Oleh karena itu, untuk beberapa jenis bangunan tertentu interaksi struktur tanah harus diperhitungkan untuk memberikan hasil yang akurat.

Dalam kasus dinamik tanah dimodelkan sebagai *semi-infinite medium* dengan domain yang tidak terbatas. Berbeda dengan kasus statis dimana perkiraan batasan tanah yang masih dipengaruhi oleh pembebanan pada struktur dapat digambarkan, sehingga tanah dapat dimodelkan sama seperti struktur, maka cara yang sama tidak dapat diterapkan. Batasan khayalan tanah pada kasus dinamik akan memantulkan kembali gelombang dari struktur yang bergetar kepada tanah atau bisa juga meneruskan gelombang dari struktur ke suatu medium yang tidak terbatas. Oleh karena itu perlu untuk memodelkan tanah sebagai medium yang semi tidak terbatas secara tepat untuk membedakan antara dinamika tanah dengan dinamika struktur.



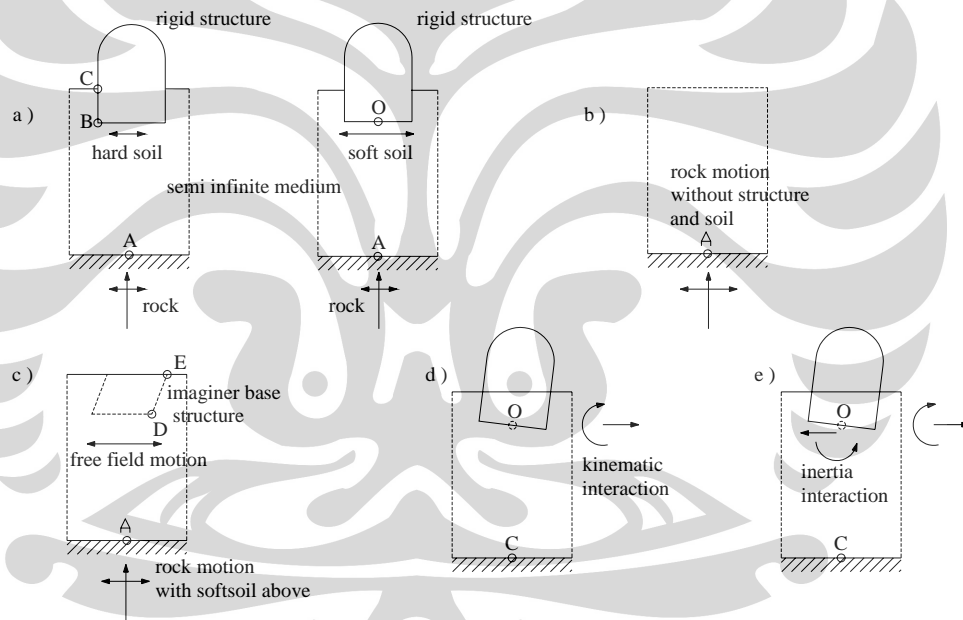
Gambar 2.1.
Sasaran dari Interaksi Struktur Tanah

Untuk beban gempa, analisa interaksi struktur tanah terdiri dari dua bagian, yaitu pertama respon dari tanah bebas (*free field*) dan kedua adalah menghitung gerak seismik yang termodifikasi akibat adanya struktur (interaksi aktualnya struktur tanah). Untuk kedua hal di atas, ada dua hal yang berkaitan dengan tanah yang perlu kita ketahui. Yang pertama adalah suatu titik acuan gerak seismik (*control point*), dimana gerak seismiknya pernah tercatat sebelumnya, menjadi acuan bagi tempat lain yang memiliki karakter tanah atau geologi yang sama. Control point sendiri adalah suatu titik di lapisan batuan yang mengalami pergerakan seismik, yang pernah diketahui oleh karena pernah terjadi gempa sebelumnya di tempat itu. Gerak dari control point ini akan merambat ke tanah bebas (permukaan tanah lunak di atasnya) dalam bentuk gelombang energi (*wave propagation*) yang tercatat oleh seismogram dalam bentuk seismograf. Yang kedua adalah gerak seismik yang termodifikasi yang dipengaruhi galian tanah di sekitar bangunan yang menyebabkan sistem interaksi struktur tanah menjadi berubah, mengingat interaksi struktur tanah terjadi pada bagian struktur yang bersentuhan dengan tanah.

2.1.2. Efek Interaksi Struktur Tanah [8]

Untuk mengetahui efek dari interaksi struktur tanah, dipilih dua buah struktur pejal dengan besemen yang identik namun berdiri di atas dua jenis tanah

yang berbeda, yang pertama berdiri langsung di tanah keras (batuan), dan yang kedua berdiri di atas tanah yang relatif lebih lunak yang berada di atas batuan. Untuk struktur yang berada langsung di atas batuan, gerak horisontal dari tanah dapat langsung diterapkan pada bagian bangunan yang berinteraksi langsung dengan tanah. Input percepatan akibat gaya inersia horisontal akan konstan sepanjang tinggi struktur. Kemudian struktur akan memberikan respon berupa gaya geser dan momen guling. Akan tetapi karena batuan sangat keras, maka kedua respon struktur tadi tidak mengakibatkan deformasi pada batuan. Tidak ada perbedaan antara gerak pada control point (titik A) dengan gerak pada dasar bangunan (titik B), sehingga respon seismik dari struktur benar-benar hanya dipengaruhi oleh properti dari struktur.

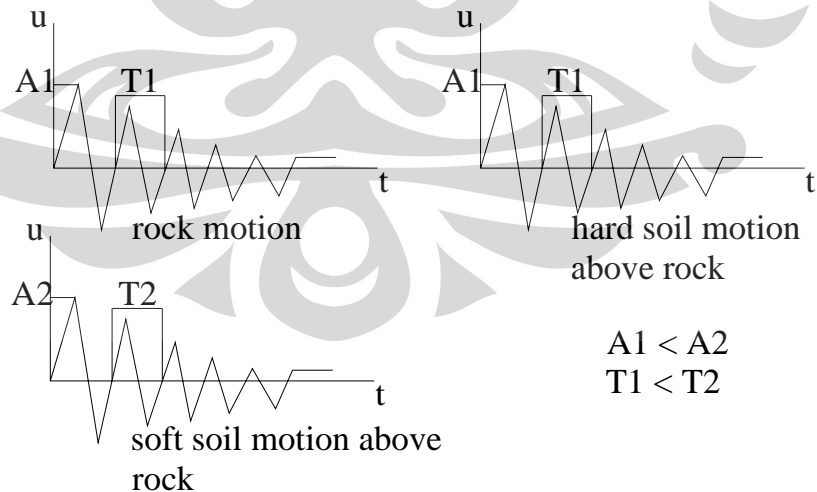


Gambar 2.2. Proses interaksi struktur tanah : a) dua struktur identik berada di atas lapisan tanah berbeda; b) gerak batuan tanpa struktur dan tanah di atasnya; c) gerak tanah bebas (free field); d) interaksi kinematik; e) interaksi inersia

Untuk struktur yang berdiri di atas tanah lunak, gerak dari suatu titik O (seperti terlihat pada gambar) pada dasar struktur akan berbeda dari gerak control point (titik A) pada lapisan batuan. Untuk mengerti proses interaksinya, maka dibuat atau dipecah proses perambatan energinya terlebih dahulu menjadi 3 bagian. Pertama adalah efek pergerakan seismik batuan (gambar b) pada tanah

lunak di atasnya tanpa bangunan dan galian yang disebut dengan *free field response* (gambar c) . Kehadiran tanah lunak akan mengurangi amplitudo gerakan dari titik A. Titik D dan E (*free field motion*) yang merupakan titik dimana bangunan akan didirikan akan mengalami perbedaan gerakan dengan batuan. Pada umumnya terjadi amplifikasi amplitudo gerakan pada titik D dan E. Kedua adalah dengan memasukkan bangunan ke dalam model, maka akan memodifikasi gerakan pada *free field*. Bangunan akan mengalami pergerakan horisontal, yang menghasilkan percepatan yang bervariasi sepanjang tinggi struktur. Pergerakan bangunan ini merupakan bagian dari analisa interaksi kinematik (gambar d). Yang ketiga adalah respon yang diberikan struktur pada tanah akan menyebabkan deformasi pada tanah yang akan mempengaruhi kembali gerakan pada dasar struktur, disebut sebagai interaksi inersia (gambar e).

Ada beberapa efek utama jika kita menggunakan metode interaksi struktur tanah. Pertama adalah perubahan gerak dari input seismik, yang pada aplikasinya menimbulkan penambahan efek horisontal yang lebih besar pada struktur terbenam daripada di titik control gerak A. Hal ini yang menyebabkan struktur terbenam, pada kasus gempa yang sebenarnya, akan mengalami kerusakan yang sangat besar.



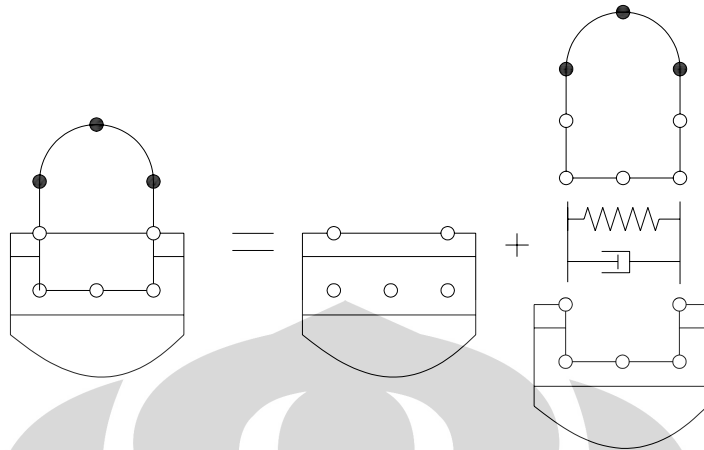
Gambar 2.3. Amplifikasi gerakan pada tanah lunak

Kedua, kehadiran tanah dalam model dengan elastisitasnya mengakibatkan struktur menjadi lebih fleksibel, dan akan menurunkan frekuensi gerak struktur jika dibandingkan dengan struktur yang diasumsikan terjepit di permukaan tanah. Ketiga, radiasi energi akibat respon struktur pada tanah memberikan manfaat sebagai faktor peredam untuk sistem dinamik akhirnya, yang akan menjadi faktor pengurang yang besar pada respon tanah terhadap struktur.

2.1.3. Substructure Method pada Interaksi Struktur Tanah

Secara konseptual, cara yang paling sederhana untuk menganalisa interaksi struktur tanah untuk beban gempa adalah memodelkan secara keseluruhan struktur dan tanah menjadi satu kesatuan, kemudian memberikan gerak tanah bebas pada batas khayal yang telah dibuat, seperti pada gambar 1. Akan tetapi, cara ini, karena melibatkan banyak sekali derajat kebebasan dari tanah di sekitar struktur, maka akan memakan waktu yang sangat lama untuk komputer memprosesnya.

Sebagai solusi dari permasalahan di atas, maka muncul ide dengan menggunakan prinsip superposisi dari komponen struktur dan komponen tanah. Pertama-tama dicari terlebih dahulu persamaan gerak tanah bebas, secara khusus untuk nodal-nodal dimana nantinya akan berinteraksi dengan struktur terbenam. Bagian yang berinteraksi kemudian dimodelkan. Pertama tanah yang tak terbatas sebagai subsistem dinamik, hubungan antara *displacement* dan gaya dari nodal-nodal yang berinteraksi ditentukan, yang dalam bentuk fisiknya bisa berupa koefisien kekakuan dinamik tanah berupa konstanta pegas dan redaman. Kemudian meletakkan struktur pada koefisien kekakuan dinamik tanah yang dianalisa sebagai kasus pembebanan yang tergantung dari gerak tanah bebas. Karena prinsip superposisi mengizinkan kita untuk memecah sistem struktur tanah dengan bentuk yang rumit menjadi bagian-bagian yang sederhana, maka kita bisa memodelkan sistem tersebut dengan lebih sederhana tetapi dengan hasil yang lebih halus, karena model yang lebih detail bisa dikerjakan dengan cara yang lebih sederhana.

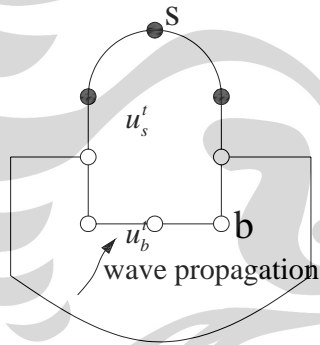


Gambar 2.4. Interaksi Struktur Tanah akibat Gempa dengan *Substructure Method*

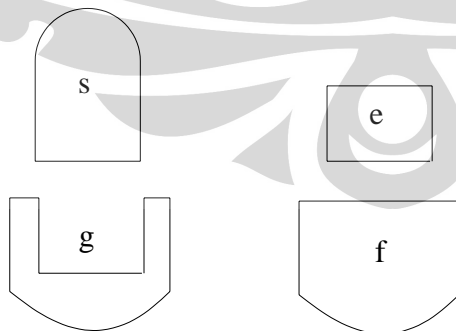
2.1.4. Persamaan Gerak Dasar, Interaksi Kinematik Inersia

2.1.4.1. Flexible Base

2.1.4.1.1. Persamaan Gerak Dasar



Gambar 2.5. Sistem Interaksi struktur tanah



Gambar 2.6. Subsistem referensi

Pertama akan dibahas persamaan gerak untuk struktur terbenam yang relatif fleksibel. Kita asumsikan sebuah struktur terbenam dengan dinding

besemen. Kita gunakan subscript b untuk menandakan bagian dinding terbenam yang berinteraksi dengan tanah, dan subscript s untuk bagian struktur yang tidak berinteraksi dengan tanah (gambar 2.4). Sistem dinamikanya terdiri dari dua substruktur (gambar 2.5), struktur bangunan dan tanah dengan galian. Struktur diindikasikan dengan s , tanah dengan bagian yang ter gali dengan g , tanah tanpa galian dengan f dan galian tanah dengan e . Persamaan dinyatakan dalam domain frekuensi (ω), dan peralihan total dinyatakan sebagai $\{u^t\}$ yang merupakan fungsi frekuensi. Vector $\{u^t\}$ dapat diuraikan menjadi subvektor $\{u_s^t\}$ dan $\{u_b^t\}$.

Matrik kekakuan dinamik dari struktur, yang terbatas, dapat dikalkulasi sebagai berikut

$$[S] = [K](1 + 2\zeta i) - \omega^2 [M] \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana $[K]$ dan $[M]$ adalah matrik kekakuan statik dan massa. Konstanta redaman ζ , yang bebas dari domain frekuensi, diasumsikan konstan di seluruh struktur. Matrik $[S]$ dapat diuraikan menjadi submatrik $[S_{ss}]$, $[S_{sb}]$, dan $[S_{bb}^s]$.

Sehingga persamaan gerak untuk struktur diformulasikan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{sb}] \\ [S_{bs}] & [S_{bb}^s] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^t\} \\ \{u_b^t\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_s\} \\ \{P_b\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana $\{P_s\}$ dan $\{P_b\}$ adalah amplitudo dari pembebanan dan gaya interaksi dengan tanah.

Matrik kekakuan dinamik untuk tanah $[S_{bb}^g]$ tidak mudah untuk ditentukan mengingat tanah adalah domain yang tidak terbatas. Secara konsep, $[S_{bb}^g]$ dapat ditentukan dengan mengeliminasi semua derajat kebebasan yang tidak berada pada permukaan tanah-struktur yang berinteraksi (bersentuhan). Vector dari $[u_b^g]$ menandakan amplitudo peralihan untuk tanah dengan galian untuk eksitasi gempa. Sebagai referensi, maka sistem dari tanah bebas, $[S_{bb}^f]$ dan $[u_b^f]$ merupakan matrik kekakuan dinamik dan vector amplitudo peralihan. Matrik kekakuan untuk galian tanah adalah $[S_{bb}^e]$, merupakan domain terbatas,

mengikuti persamaan kekakuan yang sama dengan struktur dengan parameter tanah.

Untuk beban gempa, nodal yang tidak kontak dengan tanah (misalnya nodal s) tidak dibebani. Maka kita bisa tulis $\{P_s\} = \{0\}$ sehingga

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{sb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^t\} \\ \{u_b^t\} \end{Bmatrix} = \{0\} \dots\dots\dots (2.3)$$

Kedua substruktur memberikan kontribusi pada persamaan dinamik di nodal b . kontribusi dari tanah akan kita diskusikan terlebih dahulu. Untuk amplitudo peralihan $\{u_b^g\}$, gaya interaksi yang bekerja pada nodal b adalah $[S_{bb}^g](\{u_b^t\} - \{u_b^g\})$, termasuk di dalamnya pengaruh dari $\{P_b\}$, sehingga persamaan gerak untuk nodal yang kontak dengan tanah adalah

$$[S_{bs}]\{u_s^t\} + [S_{bb}^s]\{u_b^t\} + [S_{bb}^g](\{u_b^t\} - \{u_b^g\}) = \{0\} \dots\dots\dots (2.4)$$

Maka persamaan gerak total untuk struktur dan tanah adalah

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{sb}] \\ [S_{bs}] & [S_{bb}^s] + [S_{bb}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^t\} \\ \{u_b^t\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0_s\} \\ [S_{bb}^g]\{u_b^g\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2.5)$$

Pada formulasi ini, eksitasi gempa disimbolkan oleh $\{u_b^g\}$ yang merupakan nodal pada tanah dengan galian. Karena $\{u_b^g\}$ sulit untuk ditentukan, maka ada ide untuk menggantikan $\{u_b^g\}$ menjadi $\{u_b^f\}$, karena lebih mudah untuk ditentukan karena tidak tergantung pada galian di lokasi.

Sistem tanah bebas terjadi jika kita tambahkan bagian galian ke tanah dengan galian, sehingga matrik kekakuan dinamikya

$$[S_{bb}^e] + [S_{bb}^g] = [S_{bb}^f] \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan menetapkan bahwa struktur terdiri atas tanah galian saja, maka persamaan di atas dapat diformulasikan untuk kasus khusus, dengan $[S_{bs}] = [0]$, $[S_{bb}^s] = [S_{bb}^e]$, dan $\{u_b^t\} = \{u_b^f\}$, maka

$$([S_{bb}^e] + [S_{bb}^g])\{u_b^f\} = [S_{bb}^g]\{u_b^g\} \dots\dots\dots (2.7)$$

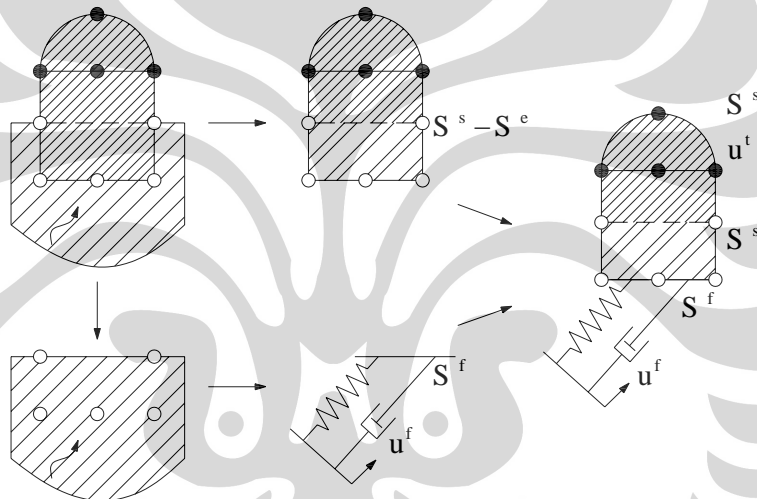
Dengan menyatukan antara persamaan (2.6) dan (2.7) maka kita dapatkan

$$[S_{bb}^f]\{u_b^f\} = [S_{bb}^g]\{u_b^g\} \dots\dots\dots(2.8)$$

Kemudian dengan memasukkan persamaan (2.8) ke dalam persamaan (2.5) maka kita dapatkan persamaan gerak diskrit

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{sb}] \\ [S_{bs}] & [S_{bb}^s] + [S_{bb}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^t\} \\ \{u_b^t\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0_s\} \\ [S_{bb}^f]\{u_b^f\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.9)$$

Persamaan di atas menyajikan formulasi peralihan total yang diekspresikan dengan matrik kekakuan dinamik tanah bebas $[S_{bb}^f]$ dan gerak tanah bebas pada nodal yang sama $\{u_b^f\}$. Terjemahan fisiknya dapat dilihat seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.7. Interpretasi fisik dari persamaan gerak dalam peralihan total

2.1.4.1.2. *Interaksi Kinematik dan Inersia*

Pada persamaan gerak total (9), beban gempa hanya dikenakan pada nodal yang berada di bagian struktur yang kontak dengan tanah. Akan tetapi para insinyur teknik sipil terbiasa bekerja dengan beban inersia gempa yang dikenakan pada setiap nodal pada struktur. Eksitasi ini tidak sama dengan gerak tanah bebas, tapi harus ditentukan utamanya untuk analisa dinamik. Analisanya terdiri atas 2 tahap, yaitu total peralihan dapat dibedakan menjadi peralihan akibat interaksi kinematik (superscrip *k*) dan interaksi inersia (superscrip *i*).

Maka secara matrik, persamaan geraknya dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \{u_s^t\} &= \{u_s^k\} + \{u_s^i\} \\ \{u_b^t\} &= \{u_b^k\} + \{u_b^i\} \end{aligned} \dots\dots\dots(2.10)$$

Pada bagian kinematik, massa dari struktur diset sama dengan 0, maka persamaan yang dihasilkan

$$\begin{bmatrix} (1+2\zeta i)[K_{ss}] & (1+2\zeta i)[K_{sb}] \\ (1+2\zeta i)[K_{bs}] & (1+2\zeta i)[K_{bb}^s] + [S_{bb}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^k\} \\ \{u_b^k\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_{bb}^g]\{u_b^g\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.11)$$

$[S_{bb}^g]\{u_b^g\}$ bisa digantikan dengan $[S_{bb}^f]\{u_b^f\}$, sesuai pada persamaan gerak dasar.

Dengan persamaan yang telah diset, yang berkenaan dengan nodal s , maka matriknya

$$\{u_s^k\} = -[K_{ss}]^{-1}[K_{sb}]\{u_b^k\} = [T_{sb}]\{u_b^k\} \dots\dots\dots(2.12)$$

Matrik $[T_{sb}]$ merepresentasikan transformasi kuasi statik, yang merupakan fungsi dari matrik kekakuan statik dari struktur. Tiap kolom dari matrik $[T_{sb}]$ dapat divisualisasikan sebagai perpindahan statik dari nodal s struktur ketika unit peralihan dikenakan pada nodal b yang spesifik. Perpindahan lainnya di nodal b adalah nol, dan tidak ada beban dikenakan pada nodal s .

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.12) ke persamaan (2.11), hasilnya

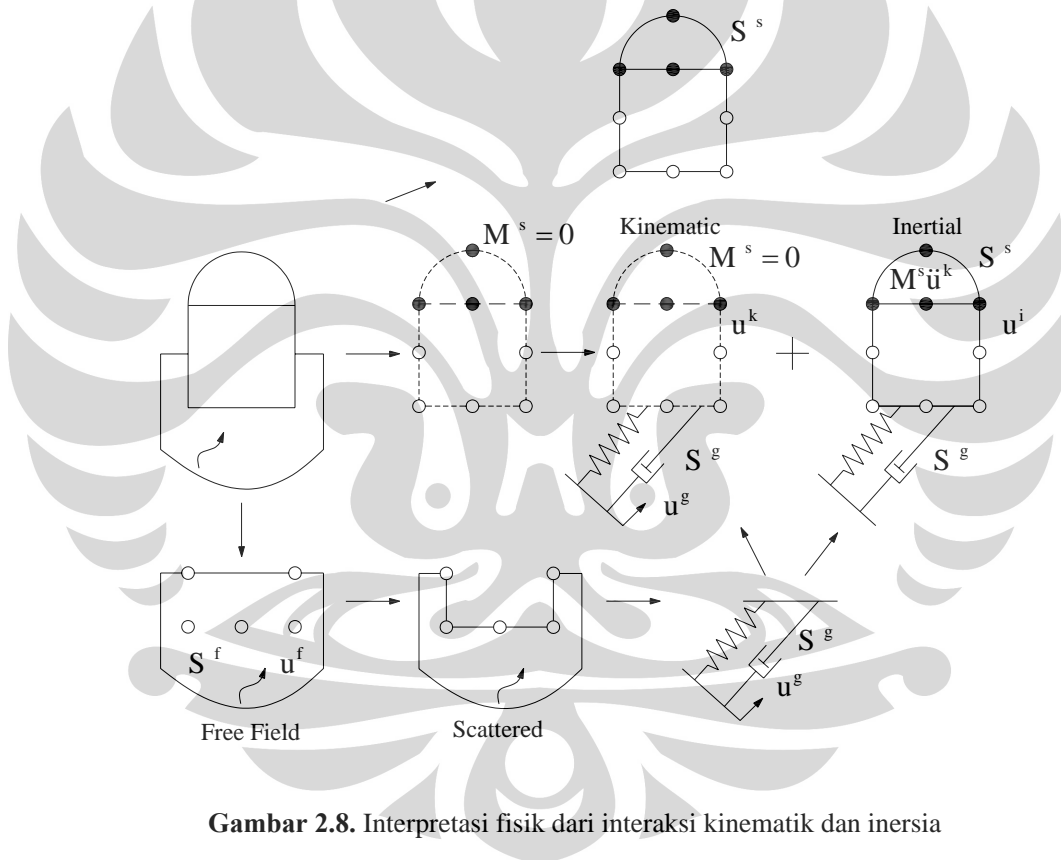
$$\begin{aligned} & \left((1+2\zeta i) \left([K_{bb}^s] - [K_{bs}][K_{ss}]^{-1}[K_{sb}] \right) + [S_{bb}^g] \right) \{u_b^k\} \\ & = [S_{bb}^g]\{u_b^g\} = [S_{bb}^f]\{u_b^f\} \end{aligned} \dots\dots\dots(2.13)$$

Untuk konfigurasi umum, amplitudo peralihan untuk interaksi kinematik pada nodal permukaan struktur tanah $\{u_b^k\}$ berbeda dengan $\{u_b^g\}$ dan $\{u_b^f\}$. Untuk gelombang gempa yang datang dalam arah horisontal dan vertikal, maka $\{u_b^f\}$ terdiri atas amplitudo konstan ditandai dengan u^h dan u^v , seperti yang ditunjukkan pada gambar, kemudian kita kalikan dengan $[K_{bb}^s] - [K_{bs}][K_{ss}]^{-1}[K_{sb}]$ menghasilkan resultan gaya nol, sebagaimana struktur bergerak seperti benda pejal. Untuk permukaan struktur yang dikenai gelombang dalam arah vertikal, maka $\{u_b^k\}$ sama dengan $\{u_b^f\}$. Dalam kasus ini $[T_{sb}]$ dapat ditentukan dari kinematik benda pejal (translasi horisontal dan vertikal u^h dan u^v). Dengan

memasukkan persamaan (2.10) ke persamaan (2.5) dan menggunakan persamaan (2.11), maka kita dapatkan persamaan gerak untuk interaksi inersia

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{sb}] \\ [S_{bs}] & [S_{bb}^s] + [S_{bb}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^i\} \\ \{u_b^i\} \end{Bmatrix} = \omega^2 \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}^s] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^k\} \\ \{u_b^k\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.14)$$

Term $\omega^2 \{u^k\}$ merepresentasikan amplitudo percepatan negatif untuk gerak kinematik. untuk bagian interaksi inersia dari respon dinamik, vektor beban terdiri atas beban inersia negatif yang ditentukan dari $\{u^k\}$.



Gambar 2.8. Interpretasi fisik dari interaksi kinematik dan inersia

2.1.4.2. *Rigid Base*

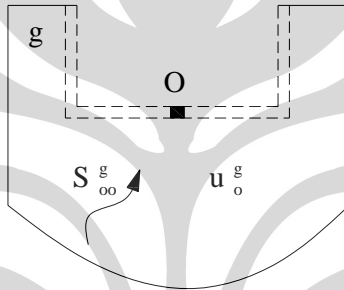
2.1.4.2.1. *Persamaan Gerak Dasar*

Pada kasus besemen pejal, gerak total di besemen $\{u_b^i\}$ dapat diekspresikan dengan gerak total benda pejal di titik O $\{u_o^i\}$ sebagai berikut

$$\{u'_b\} = [A]\{u'_o\} \dots\dots\dots(2.15)$$

Untuk besemen 3 dimensi, maka $\{u'_o\}$ terdiri dari 3 peralihan dan 3 rotasi. Matrik $[A]$ merepresentasikan transformasi kinematik dengan besaran geometris.

Pada besemen pejal, gerak dari permukaan struktur-tanah hanya tergantung pada $\{u'_o\}$ sehingga terjadi reduksi derajat kebebasan jika dibandingkan dengan besemen fleksibel. Kemudian pada tanah dengan galian, batasan yang kompatibel dari besemen pejal diberikan, pada gambar berupa garis putus-putus, dan dianggap tidak bermassa.



Gambar 2.9. sistem tanah referensi dengan galian dan permukaan sentuh struktur tanah

Memperkenalkan transformasi variabel

$$\begin{Bmatrix} \{u'_s\} \\ \{u'_b\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [I] & \\ & [A] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u'_s\} \\ \{u'_o\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.16)$$

Persamaan (2.9) mengalikannya dengan matrik transformasi didefinisikan oleh persamaan (2.16) menjadi

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{so}] \\ [S_{os}] & [S_{oo}] + [S_{oo}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u'_s\} \\ \{u'_o\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [A]^T [S_{bb}^f] \{u'_b\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana

$$\begin{aligned} [S_{so}] &= [S_{sb}][A] \\ [S_{oo}^s] &= [A]^T [S_{bb}^s][A] \dots\dots\dots(2.18) \\ [S_{oo}^g] &= [A]^T [S_{bb}^g][A] \end{aligned}$$

$[I]$ adalah matrik unit; $[S_{oo}^s]$, $[S_{so}]$, dan $[S_{os}] = [S_{so}]^T$ adalah submatrik kekakuan dinamik dari struktur dengan besemen pejal. $[S_{oo}^g]$ merupakan matrik kekakuan dinamik dari tanah dengan galian pada permukaan struktur-tanah, yang dalam kasus dinamik menggambarkan amplitudo gaya dan peralihan, baik untuk translasi maupun rotasi. Persamaan (15) adalah ekspresi total dari persamaan gerak, dimana vektor bebannya $[A]^T [S_{bb}^f] \{u_b^f\}$ tergantung pada gerak tanah bebas $\{u_b^f\}$ dan terdiri dari 3 gaya dan tiga momen.

Untuk masuk lebih dalam pada signifikansi fisik dari vektor beban, maka perlu untuk menghitung gerak seismik dari sistem tanah dengan batasan untuk besemen pejal yang kompatibel. Gerak seismiknya, pada subsistem referensi seperti pada gambar (2.8) dinotasikan dengan $\{u_o^g\}$ dan merepresentasikan arah gelombang yang menyebar. Batasan kompatibilitas dari besemen pejal diformulasikan sebagai berikut

$$\{u_b^g\} = [A] \{u_o^g\} \dots \dots \dots (2.19)$$

Dengan mensubstitusikannya pada persamaan (2.8) dan mengalikan dengan $[A]^T$, dan dengan menggunakan persamaan (2.18) kita dapatkan

$$[S_{oo}^g] \{u_o^g\} = [A]^T [S_{bb}^f] \{u_b^f\} \dots \dots \dots (2.20)$$

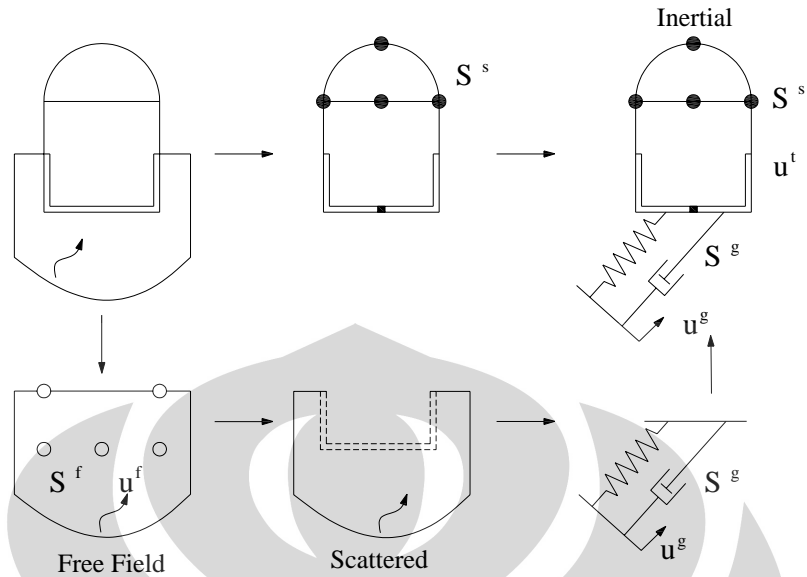
Atau

$$\{u_o^g\} = [S_{oo}^g]^{-1} [A]^T [S_{bb}^f] \{u_b^f\} \dots \dots \dots (2.21)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.20) ke persamaan (2.17), kita dapatkan

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{so}] \\ [S_{os}] & [S_{oo}^s] + [S_{oo}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^t\} \\ \{u_o^t\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_{oo}^g] \{u_o^g\} \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (2.22)$$

Secara visual persamaan di atas dapat diinterpretasikan sebagai berikut



Gambar 2.10. interpretasi fisik dari persamaan gerak dalam peralihan total

2.1.4.2.2. *Interaksi Kinematik dan Inersia*

Analog dengan besemen fleksibel, maka kita dapat formulasikan

$$\begin{aligned} \{u_s^t\} &= \{u_s^k\} + \{u_s^i\} \\ \{u_o^t\} &= \{u_o^k\} + \{u_o^i\} \end{aligned} \dots\dots\dots (2.23)$$

Kemudian dengan menset massa struktur untuk interaksi kinematik sama dengan nol, kita dapatkan

$$\begin{bmatrix} (1+2\zeta i)[K_{ss}] & (1+2\zeta i)[K_{so}] \\ (1+2\zeta i)[K_{os}] & (1+2\zeta i)[K_{oo}^s] + [S_{oo}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^k\} \\ \{u_o^k\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_{oo}^g]\{u_o^g\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dengan memecahkan persamaan ini maka kita dapatkan

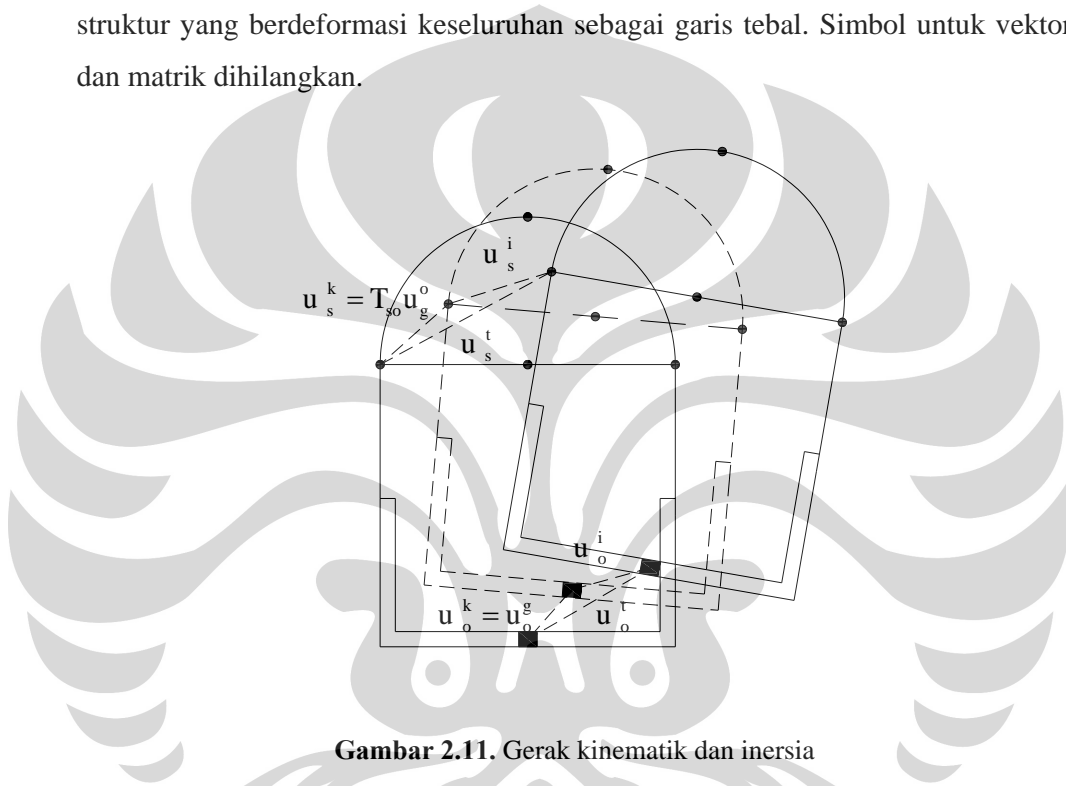
$$\begin{aligned} \{u_s^k\} &= [T_{so}] \{u_o^k\} \\ \{u_o^k\} &= \{u_o^g\} \end{aligned} \dots\dots\dots (2.25)$$

dengan

$$[T_{so}] = -[K_{ss}]^{-1} [K_{so}] \dots\dots\dots (2.26)$$

Matrik transformasi kuasi static $[T_{so}]$ ditentukan dari persamaan keseimbangan dari bagian static dari nodal s . Matrik ini tidak dihitung secara langsung dengan

menggunakan persamaan (2.26), tetapi mengikuti secara langsung dari kinematika benda pejal, analog dengan matrik $[A]$. Matrik $[T_{so}]$ tergantung pada besaran geometri dan tidak tergantung pada properti kekakuan dari struktur. Hal ini diilustrasikan melalui gambar (2.10), dimana bagian dalam dari besemen dihapuskan. Struktur yang tidak berdeformasi ditunjukkan dengan garis tipis, struktur yang pindah untuk interaksi kinematik dengan garis putus-putus, dan struktur yang berdeformasi keseluruhan sebagai garis tebal. Simbol untuk vektor dan matrik dihilangkan.



Gambar 2.11. Gerak kinematik dan inersia

Dalam menurunkan persamaan (2.25), kita menggunakan persamaan

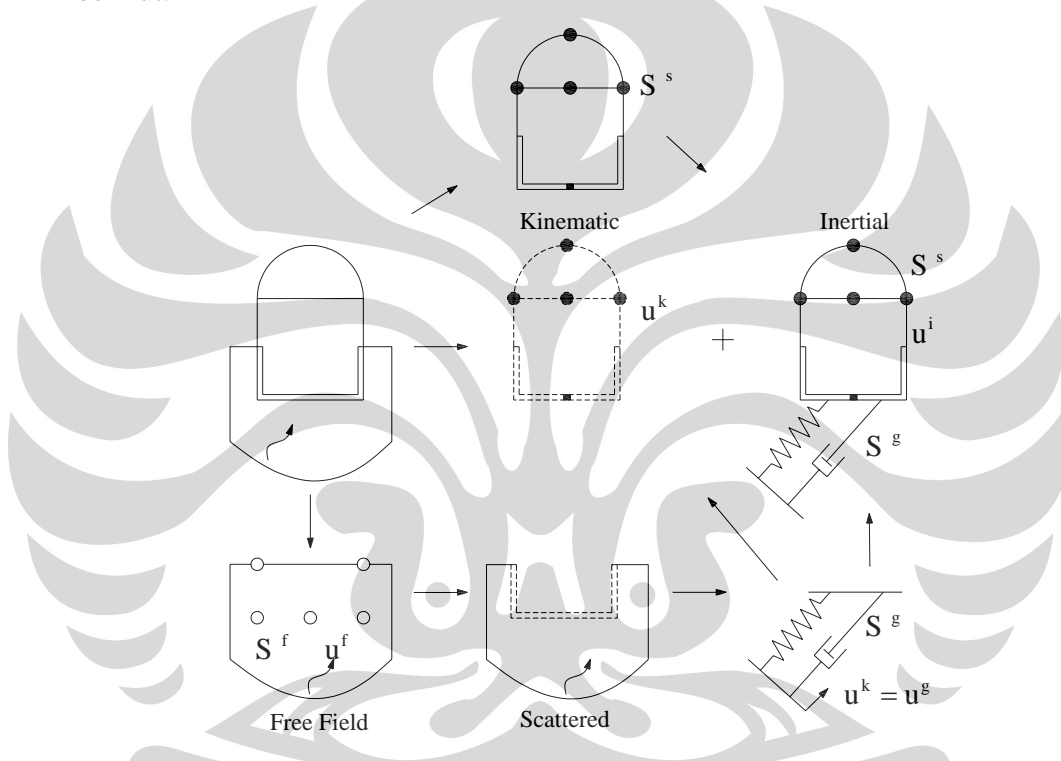
$$[K_{oo}^s] - [K_{os}] [K_{ss}]^{-1} [K_{so}] = [0] \dots\dots\dots (2.27)$$

Yang mengekspresikan keseimbangan statik dari struktur.

Dengan melihat pada persamaan (2.25) bahwa gerak dari besemen yang pejal dalam interaksi kinematik sama dengan kinematika struktur pejal sepanjang besemen. Ini jelas bahwa kehadiran dari struktur tak bermassa tidak merubah respon dari besemen. Dengan mensubstitusikan persamaan (2.23) ke persamaan (2.24), dan dengan menggunakan persamaan (2.24), maka kita dapatkan interaksi inersianya

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{so}] \\ [S_{os}] & [S_{oo}] + [S_{oo}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^i\} \\ \{u_o^i\} \end{Bmatrix} = \omega^2 \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{so}] \\ [M_{os}] & [M_{oo}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^k\} \\ \{u_o^k\} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2.28)$$

Vektor beban sama dengan produk negatif dari massa struktur dan amplitudo percepatan gempa yang kemudian ditentukan dengan mengenakan amplitudo percepatan $\{\ddot{u}_o^g\} (= -\omega^2 \{u_o^g\})$ pada titik O di besemen dan mengenakan kinematika benda pejal. Gerak kinematik dan inersia dapat diilustrasikan sebagai berikut:



Gambar 2.12. Interpretasi fisik dari interaksi kinematik dan inersia

2.1.5. Modifikasi Tanah dari Gerak Gempa Bumi [3]

Pada penjelasan sebelumnya dijelaskan bahwa salah satu input data yang penting adalah percepatan gempa dari batuan dasar atau percepatan gempa pada tanah bebas. Kedua percepatan ini berbeda besarnya tetapi saling terkait, dimana percepatan gempa pada tanah bebas merupakan hasil dari perambatan gelombang dari batuan dasar yang telah mengalami reduksi. Penggunaan dari kedua percepatan ini tergantung pada data gerak seismik berupa akselerogram yang mencerminkan percepatan tanah bebas, sehingga data dari akselerogram dapat

langsung dimasukkan sebagai input. Akan tetapi tidak di semua tempat memiliki catatan gempa. Metode yang digunakan sebagai solusi adalah dengan menentukan percepatan batuan dasar berdasarkan data akselerogram, dari atas ke bawah. Setelah mendapatkannya melalui perhitungan perambatan gelombang (*wave propagation*), maka dengan cara yang sama kita bisa menghitung pula percepatan tanah bebas dari bawah ke atas. Akan tetapi, akan lebih efisien jika memasukkan tanah dan struktur dalam suatu idealisasi tunggal dan memperhitungkan interaksi struktur tanah secara langsung.

Respon $y(t)$ dari sistem yang bergetar linear terhadap eksitasi sembarang $x(t)$ dapat diperoleh dari respon frekuensi kompleks sistem $H(\bar{\omega})$ dengan menggunakan transformasi Fourier invers sebagai berikut

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\bar{\omega})X(\bar{\omega})\exp(i\bar{\omega}t) d\bar{\omega} \dots\dots\dots(2.29)$$

Dimana $X(\bar{\omega})$ adalah transformasi Fourier fungsi pemaksa $x(t)$ yaitu

$$X(\bar{\omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\exp(-i\bar{\omega}t) dt \dots\dots\dots(2.30)$$

Dalam keadaan ini, fungsi pemaksa adalah percepatan batuan dasar yang akan diberi simbol $\ddot{u}_b(t)$, transformasi Fourier-nya akan berbentuk

$$B(\bar{\omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{u}_b(t)\exp(-i\bar{\omega}t) dt \dots\dots\dots(2.31)$$

Respon yang diinginkan adalah percepatan pada permukaan lapisan tanah $\ddot{u}_g(t)$ dan respon frekuensi kompleks adalah fungsi transfer yang menyatakan amplitude gerak harmonik pada permukaan tanah yang disebabkan oleh masukan percepatan harmonik batuan dasar. Fungsi transfer ini akan diberi simbol $Q(\bar{\omega})$, dan dengan mengasumsikan bahwa sifat-sifat permukaan tanah sedemikian rupa sehingga tidak ada peredaman yang saling tergantung, fungsi ini dapat dengan mudah diperoleh melalui prosedur superposisi modus.

Jadi jika derajat kebebasan koordinat diskrit \mathbf{u}_c dari medium tanah dinyatakan dalam bentuk-bentuk modus getaran bebas ϕ sebagai

$$\mathbf{u}_c = \Phi\mathbf{q} \dots\dots\dots(2.32)$$

persamaan gerak tanah yang diidealisasikan dapat ditransformasikan menjadi sekumpulan persamaan bebas yang masing-masing mempunyai bentuk

$$\ddot{Y}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{Y}_n + \omega_n^2 Y_n = -\Gamma_n \ddot{u}_b \dots\dots\dots(2.33)$$

Dimana Y_n adalah amplitude respon mode n , masing-masing mode telah dinormalisasi untuk memberikan satu satuan massa tergeneralisasi $M_n = \phi_n^T \mathbf{m} \phi_n = 1$, dan faktor eksitasi gempa bumi mode diberikan oleh

$$\Gamma_n = \phi_n^T \mathbf{m} \mathbf{s} \dots\dots\dots(2.34)$$

Fungsi respon perpindahan kompleks untuk koordinat modus ini adalah $-\Gamma_n H_n(\bar{\omega})$ dimana

$$H_n(\bar{\omega}) = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{1}{1 - \beta_n^2 + 2i\xi_n \beta_n} \dots\dots\dots(2.35)$$

Karena itu fungsi respon percepatan kompleks adalah $\Gamma_n H_n(\bar{\omega}) \bar{\omega}^2$. Dengan demikian fungsi transfer mode yang menyatakan percepatan mode n pada permukaan yang disebabkan oleh satu satuan percepatan dasar adalah

$$Q_n(\bar{\omega}) = \phi_{gn} \Gamma_n H_n(\bar{\omega}) \bar{\omega}^2 \dots\dots\dots(2.36)$$

Dimana ϕ_{gn} adalah perpindahan permukaan pada modus n . Kemudian fungsi perpindahan total diperoleh dengan mensuperposisikan fungsi perpindahan mode, yaitu

$$Q(\bar{\omega}) = \sum_{n=1}^N Q_n(\bar{\omega}) \dots\dots\dots(2.37)$$

percepatan permukaan relative

$$\ddot{u}_g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\bar{\omega}) B(\bar{\omega}) \exp(i\bar{\omega}t) d\bar{\omega} \dots\dots\dots(2.38)$$

Akan tetapi, gerak tanah bebas yang diinginkan adalah percepatan permukaan total, yang mencakup percepatan relative tambah kontribusi statik semu

$$\ddot{u}_g(t) = \ddot{u}_g(t) + r_g \ddot{u}_b(t) \dots\dots\dots(2.39)$$

dalam pernyataan ini r_g adalah perpindahan pada permukaan disebabkan oleh satu satuan perpindahan statik dari batuan dasar. Pernyataan terakhir untuk percepatan permukaan dengan demikian menjadi

$$\ddot{u}_g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [Q(\bar{\omega}) + r_g] B(\bar{\omega}) \exp(i\bar{\omega}t) d\bar{\omega} \dots\dots\dots(2.40)$$

Persamaan di atas menyatakan analisis gerak tanah bebas pada permukaan tanah disebabkan oleh suatu gerak batuan dasar tertentu $\ddot{u}_b(t)$. Dari sifat-sifat pasangan transformasi Fourier, fungsi-fungsi frekuensi dapat dituliskan dalam bentuk integral waktu

$$[Q(\bar{\omega}) + r_g] B(\bar{\omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} \ddot{u}_g(t) \exp(-i\bar{\omega}t) dt \equiv G(\bar{\omega}) \dots\dots\dots(2.41)$$

dimana transformasi Fourier dan riwayat percepatan permukaan diberi notasi $G(\bar{\omega})$. Bentuk akhir dari persamaan di atas adalah

$$B(\bar{\omega}) = [Q(\bar{\omega}) + r_g]^{-1} G(\bar{\omega}) \dots\dots\dots(2.42)$$

Akhirnya dengan mengambil transformasi invers dari $B(\bar{\omega})$, diperoleh

$$\ddot{u}_b(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [Q(\bar{\omega}) + r_g]^{-1} G(\bar{\omega}) \exp(i\bar{\omega}t) d\bar{\omega} \dots\dots\dots(2.43)$$

yang menyatakan gerak batuan dasar dalam bentuk transformasi Fourier gerak tanah bebas

2.2. PEMODELAN TANAH [1]

2.2.1. Modulus Geser (G)

Modulus geser umumnya dipakai pada masalah getaran untuk memperkirakan amplitudo perpindahan dan frekuensi pondasi. Modulus geser didefinisikan sebagai perbandingan tegangan geser terhadap regangan geser. Modulus geser berhubungan dengan E dan ν sebagai berikut :

$$G = \frac{s}{\varepsilon} = \frac{E_s}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots(2.44)$$

Untuk penentuan modulus geser dinamis ada dua cara, yaitu penentuan G di laboratorium dan penentuan langsung di tempat. Penentuan modulus geser di laboratorium diperkirakan dengan pengujian resonan-kolom. Hal ini membutuhkan perlengkapan laboratorium khusus yang terdiri atas sel-sel triaksial yang dibuat khusus untuk menghasilkan getaran beramplitudo sangat kecil terhadap tanah percobaan. Nilai modulus geser dinamis bisa dikira-kira dengan

menggunakan persamaan empiris yang disajikan oleh Hardin dan Black (1968) untuk pasir berbutir bundar $e < 0,8$,sebagai

$$G = \frac{6900(2,17 - e)^2}{1 + e} \sigma_o^{0,5} \text{ kPa} \dots\dots\dots(2.45)$$

Untuk bahan-bahan butiran sudut dengan $e > 0,6$, dan lempung dengan aktivitas sedang, maka perkiraan G adalah

$$G = \frac{3230(2,97 - e)^2}{1 + e} \sigma_o^{0,5} \text{ kPa} \dots\dots\dots(2.46)$$

Dimana $\sigma_o = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}$.

Cara yang kedua adalah penentuan modulus geser dinamis langsung di tempat. Pada massa tanah homogen dan elastis yang diberi tegangan dinamis pada satu titik dekat permukaan, akan terjadi tiga gelombang elastis yang merambat keluar dengan kecepatan yang berbeda-beda. Gelombang tersebut adalah gelombang kompresi (P), gelombang geser (S), dan gelombang permukaan (atau Rayleigh). Yang didapatkan dari pengujian lapangan ini adalah kecepatan kompresi dan kecepatan gelombang geser, yang berhubungan dengan konstanta elastis tanah menurut teori elastisitas tanah sebagai berikut :

$$\text{Kecepatan kompresi (} V_c \text{)} = \sqrt{\frac{E_s (1 - \nu)}{\rho (1 + \pi) (1 - 2\nu)}} \dots\dots\dots(2.47)$$

$$\text{Kecepatan gelombang geser (} V_s \text{)} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \dots\dots\dots(2.48)$$

Dari kedua persamaan di atas,maka kita dapatkan persamaan di bawah ini

$$\left(\frac{V_s}{V_c} \right)^2 = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)} \dots\dots\dots(2.49)$$

yang dapat diinterpretasikan bahwa gelombang geser berkisar antara

$$0 \leq V_s \leq 0,707 V_c$$

Dari persamaan di atas dapat disimpulkan bahwa gelombang kompresi akan sampai lebih dahulu pada unit deteksi beberapa saat sebelum gelombang geser dan gelombang permukaan. Modulus geser bisa diperoleh dengan cara

mencari ukuran-ukuran di lapangan kecepatan gelombang geser V_s dengan memakai persamaan $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$.

Kecepatan gelombang geser langsung di tempat bisa diperoleh dengan menggunakan metode-metode lubang silang dan lubang bawah. Pada metode lubang silang dua lubang bor terpisah dengan jarak yang diketahui dibor sampai pada kedalaman tertentu. Satu lubang diisi dengan alat pemicu, dan lubang yang lain dengan sensor penerima, maka kecepatannya dapat diukur dengan membagi jarak antar lubang dengan waktu rambat gelombang. Metode lubang bawah sama saja hanya dibutuhkan satu lubang saja untuk perhitungan, sehingga jarak antara transmitter dan resiper berbentuk diagonal.

Schmertmann (1978) menyarankan bahwa V_s mungkin bisa dihubungkan dengan nilai SPT N atau CPT q_o . Dari pengelompokan sejumlah besar nilai-nilai N pada pengujian tempat proyek dalam tanah, tampak bahwa V_s tempat proyek $\cong 50N_{70}$. Karena tidak adanya data-data yang lebih baik untuk pasir, seseorang bisa memakai $V_s = 40$ hingga $60 N_{70}$.

Tabel berikut menunjukkan nilai-nilai representative modulus geser, khususnya untuk kasus dinamik :

Tabel 2.1. Modulus Geser Tanah Kasus Dinamik [1]

| Bahan | G (MPa) |
|--------------------------------|-------------|
| Pasir kuarsa padat bersih | 12 – 20 |
| Pasir halus seperti mika | 16 |
| Pasir berlin ($e = 0,53$) | 17 – 24 |
| Pasir tanah liat | 10 |
| Pasir kerikil padat | 70 |
| Lempung berlumpur lunak basah | 9 – 15 |
| Lempung berlumpur lunak kering | 17 – 21 |
| Lumpur berlumpur kering | 25 – 35 |
| Lempung sedang | 12 – 30 |
| Lempung berpasir | 12 - 30 |

2.2.2. Rasio Poisson (ν)

Rasio Poisson dipakai untuk mengkaji penurunan dan getaran. Hal itu ditentukan sebagai rasio kompresi poros terhadap regangan pemuai lateral sebagai

$$\nu = \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \dots\dots\dots(2.50)$$

Pada kasus umum ada tiga nilai untuk tanah anisotropic yang mengambil ketiga arah koordinat, sehingga memiliki 3 nilai ν . Pada kebanyakan tanah, kondisi isotropic itu diasumsikan sehingga hanya ada satu nilai ν .

Bukti eksperimental menunjukkan bahwa ν mungkin lebih besar dari 0,5 (yang menunjukkan pemuai volume yang besar, atau terdapat regangan lateral yang besar), yang menunjukkan keadaan tanah yang plastis dimana teori plastisitas tak adapt diterapkan lagi. Tetapi telah dicatat bahwa tanah itu bersifat elastis semu pada hampir seluruh rentang tegangan untuk hampir semua terapan perekayasaan, akan tetapi tetap digunakan sebagai kemudahan dalam analisa perhitungan dengan teori elastisitas.

Jangkauan nilai ν yang khas untuk beberapa tanah diberikan pada tabel sebagai berikut.

Tabel 2.2. Rasio Poisson Beberapa Jenis Tanah [1]

| Jenis Tanah | ν |
|-------------------|------------|
| Lempung jenuh | 0,4 – 0,5 |
| Lempung tak jenuh | 0,1 – 0,3 |
| Lempung berpasir | 0,2 – 0,3 |
| Lanau | 0,3 – 0,35 |
| Pasir berkerikil | 0,1 – 1 |
| Batuan (rock) | 0,1 – 0,4 |

Dapat diperhatikan bahwa nilai untuk tanah sangat tak menentu, yang bisa dilakukan adalah membuat range, karena penentuan secara langsung nilai ν teramat sukar. Dalam kasus dinamik, penentuan nilai ν terdapat hanya pada range 0,333 dan 0,5. Kedua nilai ini sudah cukup memadai untuk semua masalah karena

hal tersebut masih merupakan perkiraan. Beberapa ahli geoteknik memilih angka 0,4 mengingat pada kasus dinamik strain vertical yang terjadi sangat kecil.

2.2.3. Modulus Tegangan Regangan (E)

Secara definisi, Modulus tegangan regangan adalah perbandingan antara perubahan tegangan terhadap perubahan regangan. Beberapa metode tersedia untuk menentukan modulus tegangan regangan, antara lain di laboratorium dengan menggunakan metode percobaan kompresi tak terbatas dan kompresi triaksial, dan percobaan di lapangan dengan menggunakan SPT, CPT, alat ukur tekanan, atau percobaan beban pelat. Karena nilai laboratorium dari E tidak sangat baik dan mahal untuk mendapatkannya, maka uji penetrasi standar (SPT) dan uji penetrasi kerucut (CPT) telah banyak digunakan. Tabel berikut memberikan sejumlah persamaan yang memungkinkan untuk digunakan pada beberapa metode percobaan. Nilai yang digunakan harus didasarkan pada pengalaman setempat dengan persamaan tersebut, yang memberikan kecocokan yang terbaik untuk tempat tersebut.

Tabel 2.3. Nilai E berdasarkan SPT dan CPT [1]

| Tanah | SPT (kPa) | CPT (kPa) |
|---------------------------------|--|---|
| Pasir (terkonsolidasi normal) | $E = 500(N + 15)$ $E = (15000 \text{ to } 22000) \ln N$ $E = (35000 \text{ to } 50000) \log N$ | $E = 2 \text{ to } 4q_c$ $E = (1 + D_r^2) q_c$ |
| Pasir (jenuh) | $E = 250(N + 15)$ | |
| Pasir (terkonsolidasi lebih) | $E = 18000 + 750N$ | $E = 6 \text{ to } 30q_c$ |
| Pasir berkerikil dan kerikil | $E = 1200(N + 6)$ $E = 600(N + 6) \quad N \leq 15$ $E = 600(N + 6) + 2000 \quad N > 15$ | |
| Pasir berlempung | $E = 320(N + 15)$ | $E = 3 \text{ to } 6q_c$ |
| Pasir berlanau | $E = 300(N + 6)$ | $E = 1 \text{ to } 2q_c$ |
| Lempung lunak | – | $E = 3 \text{ to } 8q_c$ |

Catatan : Nilai E dalam satuan kPa , dan nilai N harus diperkirakan sebagai N_{55}

Jangkauan nilai modulus tegangan regangan statik untuk beberapa jenis tanah dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 2.4. Nilai E untuk beberapa jenis tanah [1]

| Tanah | E_s (MPa) |
|-------------------------|---------------|
| Lempung | |
| Sangat lunak | 2 – 15 |
| Lunak | 5 – 25 |
| Sedang | 15 – 50 |
| Keras | 50 – 100 |
| Berpasir | 25 - 250 |
| Pasir | |
| Berlanau | 5 – 20 |
| Lepas | 10 – 25 |
| Padat | 50 - 81 |
| Pasir dan Kerikil Padat | |
| Lepas | 50 – 150 |
| Padat | 100 - 200 |

2.3. SIFAT ELASTISITAS TANAH

2.3.1. Tanah Sebagai Elemen Pegas

Menentukan nilai komponen elastisitas tanah dalam kasus pembebanan seismik merupakan hal yang sangat sulit dilakukan. Parameter elastisitas tanah merupakan kunci dari pemodelan tanah yang akan kita buat. Nilai yang eksak sangat sulit dilakukan, yang mungkin adalah menaksir nilai dari parameter tanah yang ada, dan kemudian membuat sebuah pemodelan tanah yang secara logika mirip perilaku tanah, akan tetapi tetap saja *engineering judgment* memainkan peranan dalam penentuannya. Oleh karena itu berikut ditampilkan beberapa nilai konstanta pegas dan redaman dari 2 narasumber yang berbeda.

1. **Tabel 2.5.** N.M. Newmark dan E. Rosenblueth, *Fundamental of Earthquake Engineering* untuk Pondasi Silinder Pejal [3]

| Derajat Kebebasan | Konstanta Pegas (K) | Redaman (C) |
|-------------------|-------------------------------------|------------------------|
| Vertikal | $\frac{4Gr}{1-\nu}$ | $1,79\sqrt{K\rho r^3}$ |
| Horisontal | $18,2Gr\frac{(1-\nu^2)}{(2-\nu)^2}$ | $1,08\sqrt{K\rho r^3}$ |
| Rocking | $2,7Gr^3$ | $0,47\sqrt{K\rho r^5}$ |
| Torsi | $5,3Gr^3$ | $1,11\sqrt{K\rho r^5}$ |

Catatan:

- r adalah jari-jari silinder. Untuk dasar selain silinder, kita konversikan berdasarkan persamaan luas.
- G = modulus geser , ρ = massa jenis tanah , ν = poisson ratio

2.

Tabel 2.6. Novak dan Beredugo (1972) untuk Pondasi Silinder Pejal Terbenam [8]

| Derajat Kebebasan | Konstanta Pegas (K) | Redaman (C) |
|-------------------|---|---|
| Vertikal | $Gr_0\left(\bar{C}_1 + \frac{G_s D_f}{G r_0} \bar{S}_1\right)$ | $r_0^2 \sqrt{\rho G} \left(\bar{C}_2 + \bar{S}_2 \frac{D_f}{r_0} \sqrt{\frac{G_s \rho_s}{\rho G}}\right)$ |
| Horisontal | $Gr_0\left(\bar{C}_{x1} + \frac{G_s D_f}{G r_0} \bar{S}_{x1}\right)$ | $r_0^2 \sqrt{\rho G} \left(\bar{C}_{x2} + \bar{S}_{x2} \frac{D_f}{r_0} \sqrt{\frac{G_s \rho_s}{\rho G}}\right)$ |
| Rocking | $Gr_0^3\left(\bar{C}_{\theta 1} + \frac{G_s D_f}{G r_0} \left(\bar{S}_{\theta 1} + \frac{D_f^2}{3r_0^2} \bar{S}_{x1}\right)\right)$ | $r_0^4 \sqrt{\rho G} \left(\bar{C}_{\theta 2} + \frac{G_s D_f}{G r_0} \left(\bar{S}_{\theta 2} + \frac{D_f^2}{3r_0^2} \bar{S}_{x2}\right)\right)$ |

| | | |
|-------|---|---|
| Torsi | $Gr_0^3 \left(\bar{C}_{\alpha 1} + \frac{G_s D_f}{G r_0} \bar{S}_{\alpha 1} \right)$ | $r_0^4 \sqrt{\rho G} \left(\bar{C}_{\alpha 2} + \bar{S}_{\alpha 2} \frac{G_s D_f}{G r_0} \sqrt{\frac{G_s \rho_s}{\rho G}} \right)$ |
|-------|---|---|

Catatan:

- Untuk pondasi selain silinder pejal

vertikal $r_0 = \sqrt{\frac{BL}{\pi}}$, horisontal $r_0 = \sqrt{\frac{BL}{\pi}}$, rocking $r_0 = \sqrt[4]{\frac{BL^3}{3\pi}}$,

torsi $r_0 = \sqrt[4]{\frac{BL(B^2 + L^2)}{6\pi}}$, dimana B dan L adalah dimensi lebar dan panjang pondasi.

- Nilai dari konstanta di atas

| Poisson Ratio (ν) | \bar{C}_1 | \bar{C}_2 | \bar{S}_1 | \bar{S}_2 |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0 | 3,9 | 3,5 | 2,7 | 6,7 |
| 0,25 | 5,2 | 5 | 2,7 | 6,7 |
| 0,5 | 7,5 | 6,8 | 2,7 | 6,7 |

| Poisson Ratio (ν) | Parameter | |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| 0 | $\bar{C}_{x1} = 4,3$ | $\bar{C}_{x2} = 2,7$ |
| 0,5 | $\bar{C}_{x1} = 5,1$ | $\bar{C}_{x2} = 3,15$ |
| 0 | $\bar{S}_{x1} = 3,6$ | $\bar{S}_{x2} = 8,2$ |
| 0,25 | $\bar{S}_{x1} = 4$ | $\bar{S}_{x2} = 9,1$ |
| 0,4 | $\bar{S}_{x1} = 4,1$ | $\bar{S}_{x2} = 10,6$ |

| Poisson Ratio (ν) | Parameter | |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 0 | $\bar{C}_{\theta 1} = 2,5$ | $\bar{C}_{\theta 2} = 0,43$ |
| $\neq 0$ | $\bar{S}_{\theta 1} = 2,5$ | $\bar{S}_{\theta 2} = 1,8$ |

| Parameter | |
|-----------------------------|----------------------------|
| $\bar{C}_{\alpha 1} = 4,3$ | $\bar{C}_{\alpha 2} = 0,7$ |
| $\bar{S}_{\alpha 1} = 12,4$ | $\bar{S}_{\alpha 2} = 2$ |

2.3.2. Tanah sebagai Elemen Plane Strain [9]

2.3.2.1. Hipotesa

Elemen plane strain digunakan untuk menganalisa tegangan pada suatu struktur dengan dimensi salah satu sumbunya dianggap tidak hingga, sehingga deformasi arah sumbu tersebut diabaikan karena sangat kecil sekali. Jika kita anggap sumbu tersebut adalah sumbu z, maka hipotesanya :

$$\begin{aligned}
 u &= u(x, y) \\
 v &= v(x, y) \\
 w &= 0 \\
 \varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} &= 0
 \end{aligned}
 \dots\dots\dots (2.51)$$

2.3.2.2. Formulasi Elemen Hingga

$$\{\sigma\} = [H_\varepsilon] \{\varepsilon\} \dots\dots\dots (2.52)$$

Dimana :

$$[H_\varepsilon] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & 0 & 0 \\ 0 & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.53)$$

$$\{\varepsilon\} = [B_m] \{u_n\} \dots\dots\dots (2.54)$$

Dimana matriks $[B_m]$ merupakan fungsi dari turunan pertama fungsi bentuk

$$[B_m] = \begin{bmatrix} N_{1,x} & 0 & N_{2,x} & 0 & N_{3,x} & 0 & N_{4,x} & 0 \\ 0 & N_{1,y} & 0 & N_{2,y} & 0 & N_{3,y} & 0 & N_{4,y} \\ N_{1,y} & N_{1,x} & N_{2,y} & N_{2,x} & N_{3,y} & N_{3,x} & N_{4,y} & N_{4,x} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.55)$$

Fungsi bentuknya :

$$\begin{aligned}
 N_1(x, y) &= \frac{1}{4ab}(a-x)(b-y) \\
 N_2(x, y) &= \frac{1}{4ab}(a+x)(b-y) \\
 N_3(x, y) &= \frac{1}{4ab}(a+x)(b+y) \\
 N_4(x, y) &= \frac{1}{4ab}(a-x)(b+y)
 \end{aligned} \dots\dots\dots(2.56)$$

Maka turunannya :

$$\begin{aligned}
 N_{1,x} &= \frac{1}{4ab}(-b+y) & N_{1,y} &= \frac{1}{4ab}(-a+x) \\
 N_{2,x} &= \frac{1}{4ab}(b-y) & N_{2,y} &= \frac{1}{4ab}(-a-x) \\
 N_{3,x} &= \frac{1}{4ab}(b+y) & N_{3,y} &= \frac{1}{4ab}(a+x) \\
 N_{4,x} &= \frac{1}{4ab}(-b-y) & N_{4,y} &= \frac{1}{4ab}(a-x)
 \end{aligned} \dots\dots\dots(2.57)$$

Sedangkan $\{u_n\}$ kita dapatkan dari :

$$\{f\} = [k_m]\{u_n\} - \{f\}^{BNE} \dots\dots\dots(2.58)$$

Dimana

$$[k_m] = \int_{-a-b}^a \int_{-a-b}^b [B_m]^T [H_m][B_m] d_x d_y \dots\dots\dots(2.59)$$

$$[H_m] = h[H] \dots\dots\dots(2.60)$$

Nilai h untuk kasus *plane strain* = 1 .

2.3.3. Gempa sebagai Tekanan Tanah

Tekanan lateral pada dinding basemen akibat gempa dihitung dengan menggunakan *Metode Seed and Whitman* sebagai berikut :

$$\text{Gaya lateral} = P_{ER} = \frac{P_E k_o}{k_A}, \text{ dimana } P_E = \frac{3}{8} \frac{a_{\max}}{g} H^2 \gamma_t$$

dimana :

H = kedalaman dinding basement

a_{\max} = percepatan gempa = $0,3g$ (untuk tanah lunak)

k_o = koefisien tanah diam

k_A = koefisien tanah aktif

dan posisi gaya lateral dari dasar dinding basement $h_e = 0,6H$



BAB III

MODELISASI STRUKTUR

3.1. MODELISASI STRUKTUR ATAS DENGAN ELEMEN HINGGA

Pemodelan dilakukan dengan pendekatan elemen hingga, karena jika menggunakan sistem yang kontinu yang tidak didiskritisasi akan sangat rumit sekali, melibatkan persamaan diferensial parsial untuk persamaan gerakanya. Alasan lainnya karena nantinya penelitian akan dilakukan dengan software yang bebasiskan elemen hingga, sehingga perlu untuk diketahui formulasi strukturnya.

Secara umum, sebuah struktur memiliki 6 DOF (*Degree of Freedom*) untuk setiap nodal yaitu tiga peralihan dan tiga translasi yang berhubungan dengan deformasi aksial, geser, lentur, dan torsi. Keakuratan dari elemen hingga ditentukan oleh jumlah DOF yang dikalkulasi. Karena bangunan tinggi akan memiliki banyak sekali nodal dan DOF, maka dimungkinkan untuk mereduksi jumlah DOF tiap nodal untuk mengefisienkan perhitungan tetapi tetap menghasilkan analisa yang memuaskan. [6]

Teknik yang sederhana dalam mereduksi DOF adalah dengan *kinematic constraints*. Diasumsikan lantai sebagai *rigid diaphragm*, maka tiap nodal hanya ada tiga DOF yaitu translasi arah X dan Y, serta rotasi arah Z. Maka peralihan elemen struktur dapat ditransformasikan terhadap peralihan pada pusat massa setiap level lantai dengan persamaan : [6]

$$\begin{aligned}
 u_x &= u_x^m - \Delta y \theta_z^m \\
 u_y &= u_y^m - \Delta x \theta_z^m \dots\dots\dots (3.1) \\
 \theta_z &= \theta_z^m
 \end{aligned}$$

dimana :

u_x, u_y, θ_z adalah peralihan elemen struktur

u_x^m, u_y^m, θ_z^m adalah peralihan pusat massa setiap level lantai

$\Delta x, \Delta y$ adalah jarak nodal elemen terhadap pusat massa lantai

3.1.1. Pembentukan Matrik Kekakuan

Dengan pendekatan finite elemen, fungsi peralihan dapat didefinisikan sebagai berikut

$$\mathbf{u} = \langle \mathbf{N} \rangle \{ \mathbf{d} \} \dots \dots \dots (3.2)$$

Dimana

$$\langle \mathbf{N} \rangle = \langle N_{ux1} \ N_{uy1} \ N_{uz1} \ N_{\theta x1} \ N_{\theta y1} \ N_{\theta z1} \ N_{ux2} \ N_{uy2} \ N_{uz2} \ N_{\theta x2} \ N_{\theta y2} \ N_{\theta z2} \rangle$$

$$\{ \mathbf{d} \} = \langle u_{x1} \ u_{y1} \ u_{z1} \ \theta_{x1} \ \theta_{y1} \ \theta_{z1} \ u_{x2} \ u_{y2} \ u_{z2} \ \theta_{x2} \ \theta_{y2} \ \theta_{z2} \rangle$$

Dan $\langle \mathbf{N} \rangle$ merupakan fungsi bentuk yang dirumuskan sebagai berikut

$$N_{ux1} = 1 - \frac{x}{L} \qquad N_{ux2} = \frac{x}{L}$$

$$N_{uy1} = 1 - 3\frac{x^2}{L^2} + 2\frac{x^3}{L^3} \qquad N_{uy2} = 3\frac{x^2}{L^2} - 2\frac{x^3}{L^3}$$

$$N_{uz1} = 1 - 3\frac{x^2}{L^2} + 2\frac{x^3}{L^3} \qquad N_{uz2} = 3\frac{x^2}{L^2} - 2\frac{x^3}{L^3}$$

$$N_{\theta x1} = 1 - \frac{x}{L} \qquad N_{\theta x2} = \frac{x}{L}$$

$$N_{\theta y1} = x - 2\frac{x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2} \qquad N_{\theta y2} = -\frac{x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2}$$

$$N_{\theta z1} = x - 2\frac{x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2} \qquad N_{\theta z2} = -\frac{x^2}{L} + \frac{x^3}{L^2}$$

Matrik kekakuan elemen dinyatakan oleh

$$[\mathbf{k}] = \int_{Vol} \langle \mathbf{B} \rangle [\mathbf{E}] \{ \mathbf{B} \} dVol \dots \dots \dots (3.3)$$

Dimana $[\mathbf{E}]$ adalah matrik property material dan $\{ \mathbf{B} \}$ adalah matrik *strain displacement matrix* yang merupakan turunan pertama dari fungsi bentuk.

3.1.2. Pembentukan Matrik Massa

Matriks massa elemen dapat dinyatakan oleh:

$$[\mathbf{m}] = \int_{Vol} \langle \mathbf{N} \rangle \rho \{ \mathbf{N} \} dVol \dots \dots \dots (3.4)$$

Dimana matriks massa yang terbentuk disebut matriks massa konsisten karena fungsi bentuk $\{N\}$ sama seperti fungsi bentuk yang dipakai untuk memformulasikan matriks kekakuan. Dari persamaan di atas, bentuk tunggal dari matriks massa adalah

$$m_{ij} = \rho A \int_{Vol} N_i N_j dx \dots\dots\dots(3.5)$$

Formulasi yang lebih sederhana adalah matriks massa tergroupal. Dengan cara ini gaya inersia dan derajat kebebasan rotasi diabaikan sehingga matriks mempunyai bentuk diagonal. Untuk matriks massa tergroupal,

$$m_{ij} = 0 \text{ jika } i \neq j$$

$$m_{ij} = 0 \text{ jika } j = \text{DOF rotasi}$$

3.1.3. Pembentukan Matrik Redaman

Ada dua metode menentukan redaman struktur [4], yaitu :

1. metode *phenomenological damping*, dimana mekanisme redaman aktual dimodelkan seperti gesekan sambungan struktur, sifat histeristik elastic-plastik material.
2. metode *spectral damping*, dimana redaman *viscous* didefinisikan dalam suatu rasio redaman yang ditentukan dengan percobaan. Metode spectral damping yang populer adalah rayleigh atau redaman proporsional dimana matriks massa redaman $[C]$ merupakan kombinasi linear dari matriks kekakuan dan massa yang dirumuskan [2]:

$$[C] = a_0 [K] + a_1 [M] \dots\dots\dots(3.6)$$

Dimana a_0 dan a_1 adalah konstanta redaman proporsional terhadap kekakuan dan massa yang dapat dicari dengan persamaan

$$\xi = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \dots\dots\dots(3.7)$$

Konstanta a_0 dan a_1 dapat dihitung dengan mendefinisikan rasio redaman ξ_i dan ξ_j pada mode I dan j, dengan frekuensi alami ω_i dan ω_j . Mode I adalah mode pertama dari struktur dan mode j adalah mode yang memiliki frekuensi natural yang lebih tinggi dan memberikan kontribusi respon dinamik yang

siknifikan. Dengan mengasumsikan redaman sama untuk kedua mode, konstanta a_0 dan a_1 dapat dirumuskan oleh

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \qquad a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \qquad \dots\dots\dots(3.8)$$

3.2. FORMULASI PERSAMAAN GERAK STRUKTUR ATAS

Dengan pendekatan elemen hingga, struktur kontinu diubah menjadi struktur diskrit dimana persamaan dinamik diturunkan dengan mendefinisikan perubahan energi potensial terhadap sebuah elemen. Dengan prinsip d’alembert persamaan kesetimbangan dirumuskan [5]:

$$\Delta E = \Delta W + \Delta I + \Delta D - \Delta L \dots\dots\dots(3.9)$$

dimana

$$\Delta W = \text{perubahan energi regangan} = \frac{1}{2} \int \{\Delta \varepsilon\}^T \{\Delta \sigma\} dVol$$

$$\{\Delta \varepsilon\} = [B]\{d\} \quad ; \quad [B] = \text{strain displacement matrik}$$

$$\{\Delta \sigma\} = [E]\{\Delta \varepsilon\} \quad ; \quad [E] = \text{matrik properti material}$$

$$\Delta I = \text{perubahan energi inersia} = \int \{\Delta u\} \rho \{\Delta \ddot{u}\} dVol \quad ;$$

ρ = massa jenis material

$$\Delta D = \text{perubahan energi redaman} = \int \{\Delta u\} c \{\Delta \dot{u}\} dVol \quad ;$$

c = konstanta redaman material

$$\Delta L = \int_{Vol} \{\Delta d\}^T \{\Delta F\} dVol + \int_{surface} \{\Delta d\}^T \{\Delta T\} dSurface$$

$$\{\Delta d\} = \text{displacement}$$

$$\{\Delta F\} = \text{body forces}$$

$$\{\Delta T\} = \text{surface traction}$$

ΔE = perubahan energi potensial

Dengan pendekatan metode elemen hingga, fungsi peralihan, kecepatan, dan percepatan daapt dinyatakan oleh

$$\{u\} = [N]\{u\}_{nodes}$$

$$\{\dot{u}\} = [N]\{\dot{u}\}_{nodes} \dots\dots\dots(3.10)$$

$$\{\ddot{u}\} = [N]\{\ddot{u}\}_{nodes}$$

Substitusi persamaan (3.10) ke dalam 4 persamaan energi di atas kemudian hasilnya disubstitusikan ke dalam persamaan (3.9) dan dengan prinsip kesetimbangan maka persamaan yang terbentuk akan sama dengan nol, sehingga

$$\begin{aligned} \delta\Delta E = & \sum_{i=1}^N \left(\{\delta\Delta u\}_n^T \right)_i \left[\int_{Vol} [B]^T [E][B] dVol \{\Delta u\}_n \right. \\ & + \sum_{i=1}^N \left(\{\delta\Delta u\}_n^T \right)_i \left[\int_{Vol} [N]^T \rho [N] dVol \{\Delta \ddot{u}\}_n \right] \\ & \left. - \sum_{i=1}^N \left(\{\delta\Delta u\}_n^T \right)_i \left[\int_{Vol} [N]^T \{\Delta F\} dVol + \int_{Surface} [N]^T \{\Delta T\} dSurface \right] = 0 \end{aligned} \quad \dots(3.11)$$

Persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi

$$\sum_{i=1}^n [m]_i (\{\ddot{u}\}_n)_i + \sum_{i=1}^n [c]_i (\{\dot{u}\}_n)_i + \sum_{i=1}^n [k]_i (\{u\}_n)_i = \sum_{i=1}^n \{R_E\} \dots\dots\dots(3.12)$$

Dimana

- [m] = matriks massa elemen
- [c] = matriks redaman elemen
- [k] = matriks kekakuan elemen
- [ΔR_E] = gaya luar

Dengan mengevaluasi seluruh elemen struktur dan mengkombinasikan setiap matrik elemen, maka persamaan (3.12.) dapat disederhanakan menjadi

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{R_E\} \dots\dots\dots(3.13)$$

Dimana [M], [C], [K] adalah matrik massa, redaman dan kekakuan struktur.

Untuk beban gempa, gaya luar { R_E } sama dengan nol. Dasar pergerakan gempa adalah tiga komponen peralihan tanah $u(t)_{ig}$ yang terjadi pada level pondasi struktur. Persamaan peralihan, kecepatan, dan percepatan absolut dapat dinyatakan oleh :

$$\begin{aligned} u(t)_a &= u(t) + I_x u(t)_{xg} + I_y u(t)_{yg} + I_z u(t)_{zg} \\ \dot{u}(t)_a &= \dot{u}(t) + I_x \dot{u}(t)_{xg} + I_y \dot{u}(t)_{yg} + I_z \dot{u}(t)_{zg} \dots\dots\dots(3.14) \\ \ddot{u}(t)_a &= \ddot{u}(t) + I_x \ddot{u}(t)_{xg} + I_y \ddot{u}(t)_{yg} + I_z \ddot{u}(t)_{zg} \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.14) ke persamaan (3.13), persamaan kesetimbangan dinamik untuk beban gempa dapat dinyatakan oleh

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]_x \{\ddot{u}\}_{xg} - [M]_y \{\ddot{u}\}_{yg} - [M]_z \{\ddot{u}\}_{zg} \dots\dots\dots(3.15)$$

Dimana :

$$[M]_i = [M] \{I\}_i$$

$\{I\}_i$ = vektor dengan besar satu untuk i derajat kebebasan dan nol untuk arah yang lain

3.3. ANALISA BEBAN DINAMIK PADA STRUKTUR ATAS

3.3.1. Properti Modal [2]

Persamaan getaran bebas, dimana gaya luar yang bekerja $R_E = 0$, dan struktur tidak teredam ($C = 0$) adalah :

$$m\ddot{u} + ku = 0 \dots\dots\dots(3.16)$$

Untuk menyelesaikan persamaan di atas, diambil persamaan lendutan sebagai berikut:

$$u(t) = q_n(t)\phi_n \dots\dots\dots(3.17)$$

Dimana :

$q_n(t)$ = lendutan yang bervariasi terhadap waktu secara harmonik

$\phi_n(t)$ = vektor fungsi bentuk yang tidak bervariasi terhadap waktu

Bentuk persamaan dari $q_n(t)$ merupakan fungsi lendutan harmonik sederhana, yaitu:

$$q_n(t) = A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t \dots\dots\dots(3.18)$$

Dimana A_n dan B_n adalah konstanta integrasi yang dapat dihitung berdasarkan kondisi awal. Dengan mengkombinasikan persamaan (3.17) dan (3.18), kemudian dengan mensubstitusikan ke dalam persamaan (3.16), maka akan didapat persamaan:

$$[-\omega_n^2 m \phi_n + k \phi_n] q_n(t) = 0 \dots\dots\dots(3.20)$$

Solusi trivial dari persamaan (3.20) dimana $q_n(t)=0$ akan menghasilkan $u(t)=0$. Hal ini berarti tidak ada pergerakan dalam struktur. Solusi non trivial persamaan (3.20) akan menghasilkan :

$$[-\omega_n^2 m + k] \phi_n = 0 \dots\dots\dots(3.21)$$

Untuk mendapatkan solusi non trivial persamaan (3.21) maka

$$\det[-\omega_n^2 m + k] = 0$$

Atau

$$\det[k - \lambda_n m] = 0$$

Dimana $\lambda_n = \omega_n^2$ adalah eigenvalue.

Penyelesaian persamaan polinomial ini akan menghasilkan N akar real dan positif untuk masing-masing $\lambda_n (\omega_n^2)$, karena matriks massa dan matriks kekakuan struktur merupakan matriks simetris dan definitif positif. Akar-akar real ini akan menghasilkan n buah frekuensi getar alami, yang disebut nilai eigen dimana $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \dots \leq \lambda_n$. Jika nilai eigen dimasukkan ke dalam persamaan (3.21), maka akan diperoleh N buah vektor independent ϕ_n , yang dikenal sebagai eigen vektor atau pola getar alami.

3.3.2. Persamaan Modal [2]

Persamaan kesetimbangan (3.13) merupakan persamaan yang saling berhubungan (coupled equations) dapat ditransformasikan menjadi persamaan yang tidak saling berhubungan (uncouple equation) dengan mensubstitusikan persamaan (3.17) ke dalam persamaan (3.13), sehingga :

$$\sum_{R=1}^N m \phi_r q_r + \sum_{R=1}^N c \phi_r q_r + \sum_{R=1}^N k \phi_r q_r = -M \ddot{u}_g(t) \dots\dots\dots(3.22)$$

Dengan mengalikan persamaan (3.22) dengan ϕ_n^T , maka:

$$\sum_{R=1}^N \phi_r^T m \phi_r q_r + \sum_{R=1}^N \phi_r^T c \phi_r q_r + \sum_{R=1}^N \phi_r^T k \phi_r q_r = -\phi_r^T M \ddot{u}_g(t) \dots\dots\dots(3.23)$$

Karena sifat ortogonalitas, setiap elemen penjumlahan akan hilang kecuali $r = n$, sehingga persamaan (3.23) dapat disederhanakan menjadi

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = P_n(t) \dots\dots\dots (3.24)$$

Dimana

$$M_n = \phi_n^T m \phi_n$$

$$K_n = \phi_n^T k \phi_n$$

$$C_n = \phi_n^T c \phi_n$$

$$P_n = \phi_n^T p(t)$$

Persamaan (3.24) identik dengan persamaan dari struktur dengan satu derajat kebebasan. Untuk selanjutnya persamaan (3.24) dapat diselesaikan dengan menggunakan integrasi dalam domain waktu maupun frekuensi.

3.3.3. Analisa Respons Spektrum

Respons spektrum menggambarkan respons maksimum dari semua struktur linier satu derajat kebebasan terhadap suatu pergerakan gempa bumi. Respons maksimum dapat digambarkan sebagai fungsi respons percepatan, kecepatan, atau peralihan terhadap periode atau frekuensi dari struktur SDOF. Setiap respons spektrum digambarkan dengan suatu rasio redaman, sehingga variasi respons spektrum dapat ditulis :

$$q_n^{\max}(T_n, \xi) = \max |q_n(t, T_n, \xi)|$$

$$\dot{q}_n^{\max}(T_n, \xi) = \max |\dot{q}_n(t, T_n, \xi)|$$

$$\ddot{q}_n^{\max}(T_n, \xi) = \max |\ddot{q}_n(t, T_n, \xi)|$$

Dengan konsep superposisi modal, struktur MDOF dapat diuraikan menjadi n buah struktur SDOF seperti dalam persamaan (3.24), sehingga respons maksimum dari setiap mode dapat dianalisis secara terpisah. Dan untuk mendapatkan respons total, dilakukan penjumlahan respons spektrum dari masing-masing mode. Penjumlahan ini dilakukan dengan pendekatan probabilistik, karena respons maksimum seluruh mode tidak berada pada waktu yang sama. Untuk mengkombinasikan respons spektrum dari setiap mode dapat menggunakan metode :

1. Metode CQC (*Complete Quadratic Combination*)

$$r_0 = \left(\sum_{n=1}^N r_{n0}^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^N \rho_{in} r_{i0} r_{n0} \right)^{1/2}$$

Dimana :

r_0 = respons maksimum total

r_{n0} = respons maksimum mode ke n

r_{ni} = respons maksimum mode ke i

$$\rho_{in} = \frac{8\xi^2 (1 + \beta_{in}) \beta_{in}^{3/2}}{(1 - \beta_{in}^2) + 4\xi^2 \beta_{in} (1 + \beta_{in})^2}$$

$$\beta_{in} = \frac{\omega_i}{\omega_n}$$

2. Metode SRSS (*Square Root of the Sum of Squares*)

$$r_0 = \left(\sum_{n=1}^N r_{n0}^2 \right)^{1/2}$$

3. Metode ABS (*Absolute*)

$$r_0 = \sum_{n=1}^N |r_{n0}|$$

BAB IV

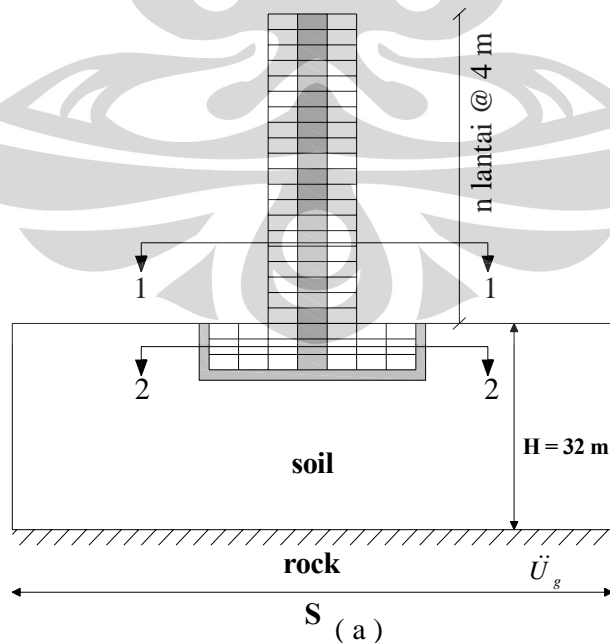
METODOLOGI PENELITIAN

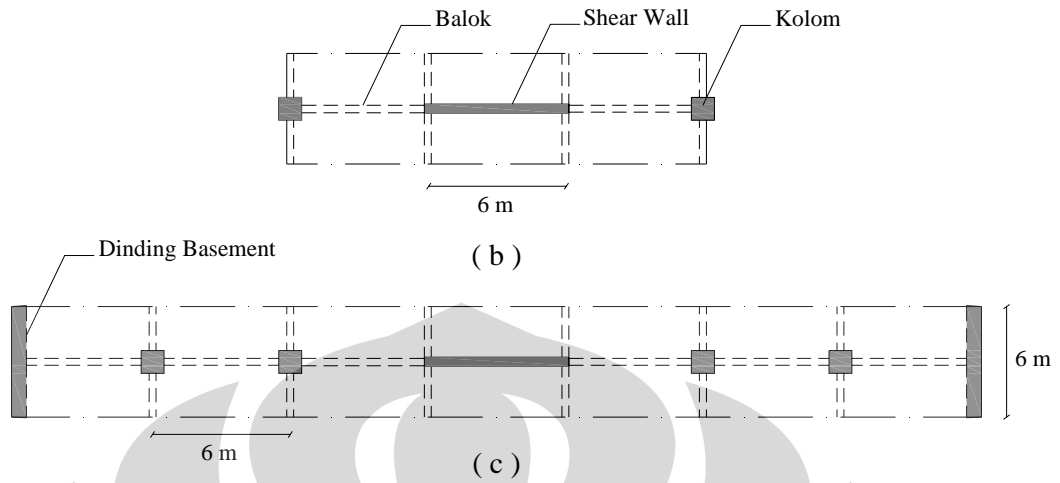
4.1. INFORMASI UMUM PEMODELAN STRUKTUR ATAS

4.1.1. Pemodelan Struktur

Pemodelan sistem struktur-tanah dimodelkan dalam bentuk dua dimensi, seperti terlihat pada gambar 4.1. Sistem struktur terdiri atas balok, kolom, *shear wall*, dinding basemen yang dimodelkan sebagai kolom, dan *bore pile* untuk salah satu pemodelan. Tanah dimodelkan sebagai sistem pegas-redaman, elemen *plane strain*, dan tekanan tanah. Pemodelan sistem struktur-tanah dilakukan dengan menggunakan program SAP 2000 versi 10.

Struktur atas terdiri dari n lantai yang akan divarisasikan yaitu 10 lantai, 20 lantai, dan 30 lantai, dimana tinggi tiap lantai 4 m. Struktur atas mempunyai 3 bentang dan basemen mempunyai 7 bentang, dengan masing-masing bentang, baik struktur atas maupun basemen, berukuran 6 m.





Gambar 4.1. (a) Model umum struktur tanah (b) Potongan 1 - 1
 (c) Potongan 2 - 2

Dimensi balok, kolom, dan shear wall untuk masing-masing variasi jumlah lantai dijabarkan dalam tabel 4.1.

Tabel 4.1. Dimensi balok, kolom, dan shear wall untuk masing-masing variasi jumlah lantai

| Tipe Bangunan | | Dimensi | | |
|----------------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | Kolom (cm x cm) | Balok (cm x cm) | Tebal Wall (cm) |
| 10 lantai + basement | Lt 8 - Lt 10 | 50 x 50 | 30 x 60 | 20 |
| | Lt 5 - Lt 7 | 60 x 60 | | |
| | Lt 1 - Lt 4 | 70 x 70 | | |
| | B1 - B3 | 80 x 80 | | |
| 20 lantai + basement | Lt 16 - Lt 20 | 50 x 50 | 30 x 60 | 30 |
| | Lt 11 - Lt 15 | 60 x 60 | | |
| | Lt 6 - Lt 10 | 70 x 70 | | |
| | Lt 1 - Lt 5 | 80 x 80 | | |
| | B1 - B3 | 80 x 80 | | |

| Tipe Bangunan | | Dimensi | | |
|----------------------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | Kolom (cm x cm) | Balok (cm x cm) | Tebal Wall (cm) |
| 30 lantai + basement | Lt 26 - Lt 30 | 50 x 50 | 30 x 60 | 40 |
| | Lt 21 - Lt 25 | 60 x 60 | | |
| | Lt 16 - Lt 20 | 70 x 70 | | |
| | Lt 11 - Lt 15 | 80 x 80 | | |
| | B3 - Lt 10 | 90 x 90 | | |

4.1.2. Pemodelan Tanah

Untuk tanah, beberapa batasan yang digunakan antara lapisan tanah homogen dan sifat tanah linear elastis. Ruang lingkup tanah, seperti terlihat pada gambar 4.1. memiliki kedalaman dari muka tanah sampai *bedrock* sedalam **H** 32 m dan lebar tanah yang masuk dalam pemodelan sebesar **S**, lebar tanah ini yang nantinya divariasikan untuk mendapatkan respon maksimum. Beberapa properti tanah yang perlu diketahui antara lain :

E = Modulus elastisitas tanah = 25 MPa

G = Modulus geser tanah = 20 MPa

ν = *Poisson ratio* tanah = 0,4

ρ = Massa jenis tanah = 17 kN/m³

Dengan menggunakan persamaan untuk nilai kekakuan dan redaman oleh N.M. Newmark dan E. Rosenblueth, *Fundamental of Earthquake Engineering* [3], didapatkan nilai kekakuan *spring constant* arah X adalah

$$K_x = 18,2Gr \frac{(1-\nu^2)}{(2-\nu)^2}$$

dan nilai redaman dalam bentuk *damper* arah X adalah

$$C_x = 1,08\sqrt{K\rho r^3}$$

Dimana

$$r = \sqrt{\frac{\text{Luas Alas Besemen}}{\pi}} = \sqrt{\frac{42 \times 42}{\pi}} = 23,7m$$

$K_x = 2831000$ kN/m

$$C_x = 296500 \text{ kN-s/m}$$

Akan tetapi nilai di atas adalah nilai kekakuan dan redaman tunggal untuk bangunan 3 dimensi, sehingga nilai kekakuan untuk bangunan 2 dimensi sepanjang dinding besemen mengikuti prosedur sebagai berikut :

- Nilai K_x dan C_x dibagi dua, karena ada dua dinding besemen (dinding besemen kanan dan kiri
- Karena yang ditinjau hanya 1 bagian portal saja, maka dibagi pula dengan banyaknya bentang dalam satu sisi dinding yaitu 7 bentang
- Kedalaman dinding besemen adalah 12 m, dan pegas-redaman dipasang tiap 1 m, maka nilainya dibagi 12

Dengan demikian nilai K_x dan C_x dibagi 168, sehingga didapatkan nilai pegas-redaman nya sebagai berikut :

$$k_x = 16851,19 \text{ kN/m}$$

$$c_x = 1764,88 \text{ kN-s/m}$$

Sedangkan pemodelan tanah sebagai plane strain, dimodelkan tidak memiliki massa, dengan ketebalan 3 m (mengambil 1/4 jarak kolom ke kanan dan ke kiri). Kemudian prosedur mencari tekanan tanah akibat gempa adalah sebagai berikut :

- Nilai gaya lateral dicari dengan rumus $P_{ER} = \frac{P_E k_o}{k_A}$ dimana $P_E = \frac{3}{8} \frac{a_{\max}}{g} H^2 \gamma_t$,

dimana nilai

$$H = \text{kedalaman dinding besemen} = 12 \text{ m}$$

$$a_{\max} = \text{percepatan maksimum gempa wilayah 3, tanah lunak} = 0,3g$$

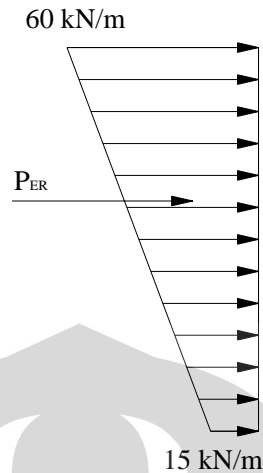
$$\phi = \text{sudut geser tanah} = 23^\circ$$

$$k_o = \text{koefisien tanah diam} = 1 - \sin \phi = 0,609$$

$$k_A = \text{koefisien tanah aktif} = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = 0,438$$

Sehingga didapatkan $P_E = 324 \text{ kN/m}$ dan $P_{ER} = 450 \text{ kN/m}$

- Posisi gaya lateral dari dasar dinding besemen $h_e = 0,6H = 7,2 \text{ m}$. Gaya lateral ini kemudian diurai menjadi gaya terdistribusi berbentuk trapesium pada dinding besemen, dimana letak pusat gaya terdistribusi tersebut sama dengan posisi P_{ER} . Dengan demikian dapat ditentukan distribusi penyebaran gaya sepanjang dinding besemen yang berbentuk trapesium sebagai berikut :



4.1.3. Material dan Pembebanan Struktur

Material struktur terdiri atas beton dan baja tulangan dengan spesifikasi sebagai berikut :

f_c' = kuat tekan beton = 30 MPa

E = modulus elastisitas beton = $4700\sqrt{f_c'} = 25742,960$ MPa

m = massa beton per satu satuan volume = 2400 kg/m³

W = berat beton per satu satuan volume = 24 kN/m³

Dan besi tulangan dengan :

f_y = kuat leleh baja tulangan = 400 MPa

Sedangkan untuk pembebanan sebagai berikut perinciannya :

Atap

Beban mati :

| | | |
|----------------------|---------------------------------|-------------------------|
| - Pelat (12 cm) | = 0,12 x 2400 kg/m ³ | = 288 kg/m ² |
| - CME | | = 36 kg/m ² |
| - Screed + finishing | | = 110 kg/m ² |
| | | _____ + |
| Total beban mati | | = 434 kg/m ² |

Beban hidup :

- Beban orang + perlengkapan = 100 kg/m²

Lantai Tipikal

Beban mati :

- Pelat (12 cm) = 0,12 x 2400 kg/m³ = 288 kg/m²

| | |
|------------------------|-------------------------|
| - Partisi | = 100 kg/m ² |
| - Screed dan finishing | = 110 kg/m ² |
| - CME | = 36 kg/m ² |
| | _____+ |
| Total beban mati | = 534 kg/m ² |

Beban hidup :

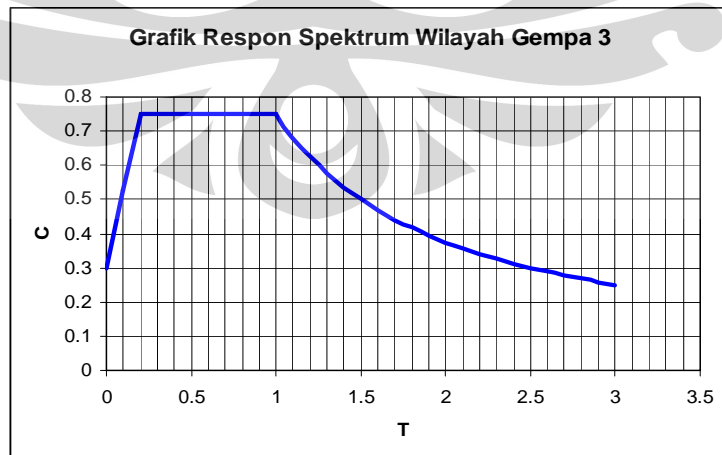
| | |
|------------------------|-------------------------|
| - Orang + Perlengkapan | = 250 kg/m ² |
|------------------------|-------------------------|

Lantai Basement

| | |
|-----------------------------|---|
| LL : Lantai basement parkir | = 400 kg/m ² |
| DL : CME | = 36 kg/m ² |
| Pelat (15 cm) | = 0,15 x 2400 kg/m ³ = 360 kg/m ² |

Untuk pembebanan gempa digunakan input gempa berupa respon spektrum yang diambil dari respon spektrum gempa SNI untuk wilayah gempa 3 (Jakarta) dengan jenis tanah lunak. Analisa modal yang digunakan tidak melebihi jumlah tingkat struktur. Analisa respon dinamik struktur dilakukan dengan menggunakan program SAP 8 versi 10. Beberapa hal terkait dengan input program antara lain :

1. Kombinasi massa untuk perhitungan gempa adalah 1DL + 0,3LL, dimana DL adalah beban mati dan LL adalah beban hidup.
2. Input gempa yang digunakan adalah respons spektrum gempa wilayah 3 dengan kondisi tanah lunak, sebagai berikut :



3. Karena struktur dimodelkan sebagai dua dimensi, maka percepatan gempa diberikan pada arah sumbu global X saja dengan faktor skala dihitung sebagai berikut :

$$\text{Faktor skala} = \frac{I}{R} g = 1,1541$$

Dimana :

I = faktor keutamaan gedung, untuk gedung perkantoran nilainya diambil 1

R = Faktor reduksi gempa, nilainya diambil 8,5

g = percepatan gravitasi 9,81 m/s²

4. Jumlah mode yang digunakan untuk analisa respon spektrum sama dengan jumlah tingkat struktur yang ditinjau, dimana jumlah partisipasi massa modalnya harus tidak kurang dari 90% (lihat lampiran). Tipe mode yang dianalisa adalah *eigen vectors*, sedangkan *modal combination* dan *directional combination* dihitung dengan metode SRSS, dimana respon gempa akhir diperoleh dari akar dari penjumlahan kuadrat respon masing-masing mode, sebagai berikut

$$r_0 = \left(\sum_{n=1}^N r_{n0}^2 \right)^{1/2}$$

4.2. VARIASI PEMODELAN

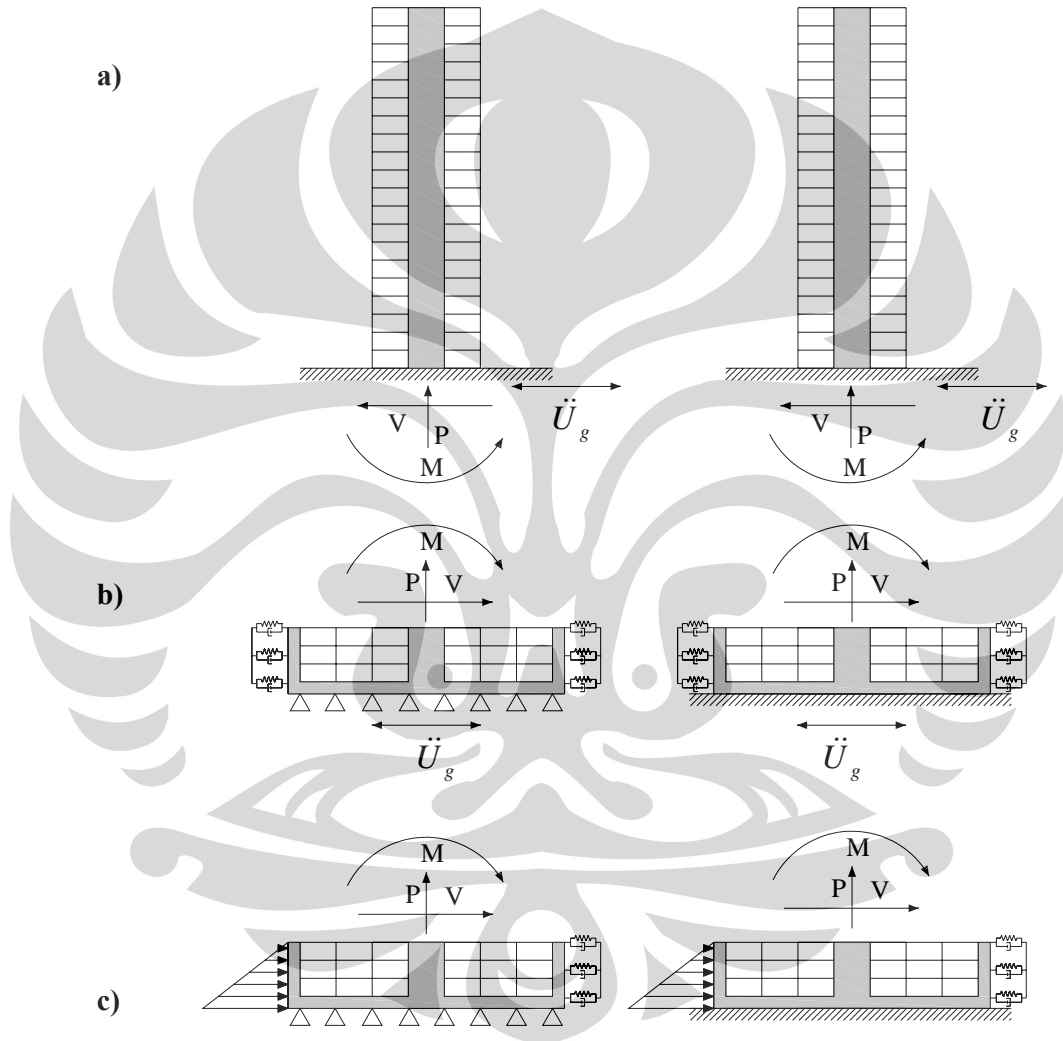
4.2.1. Penjepitan Lateral Struktur atas pada Taraf Lantai Dasar

Dalam pemodelan ini dipisahkan antara struktur atas dan besemen, struktur atas dijepit lateral pada taraf lantai dasar. Tanah di sekeliling besemen dimodelkan sebagai :

1. sebuah sistem pegas-redaman yang dipasang pada kedua sisi dinding besemen dimana perletakan besemen dimodelkan, pertama sebagai jepit dan kedua sebagai sendi. Percepatan gempa dikenakan pada perletakan struktur atas, kemudian reaksi perletakan akibat gempa disalurkan ke besemen sebagai aksi, digabung dengan percepatan gempa yang dikenakan pada perletakan besemen.
2. sebuah sistem pegas-redaman yang dipasang pada salah satu sisi dinding besemen, dimana perletakan besemen dimodelkan, pertama sebagai jepit

dan kedua sebagai sendi. Percepatan gempa dikenakan pada dasar penjepitan struktur atas. Kemudian reaksi perletakan akibat gempa disalurkan ke besemen sebagai aksi, digabung dengan gempa dalam bentuk tekanan tanah.

Pemodelan di atas dapat di lihat pada gambar 4.2. berikut ini :

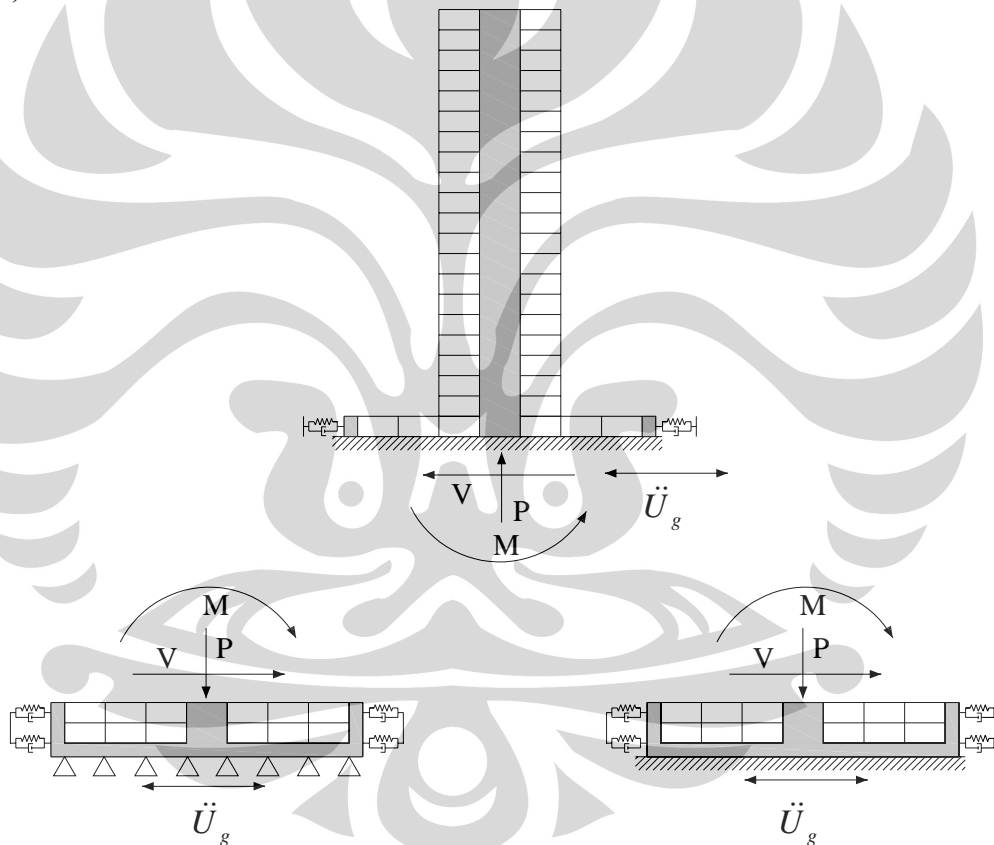


Gambar 4.2. a) Struktur atas dijepit lateral pada taraf lantai dasar, b) tanah sebagai pegas redaman di kedua dinding besemen, c) tanah sebagai pegas redaman di salah satu dinding besemen, dan gempa dimodelkan sebagai tekanan tanah

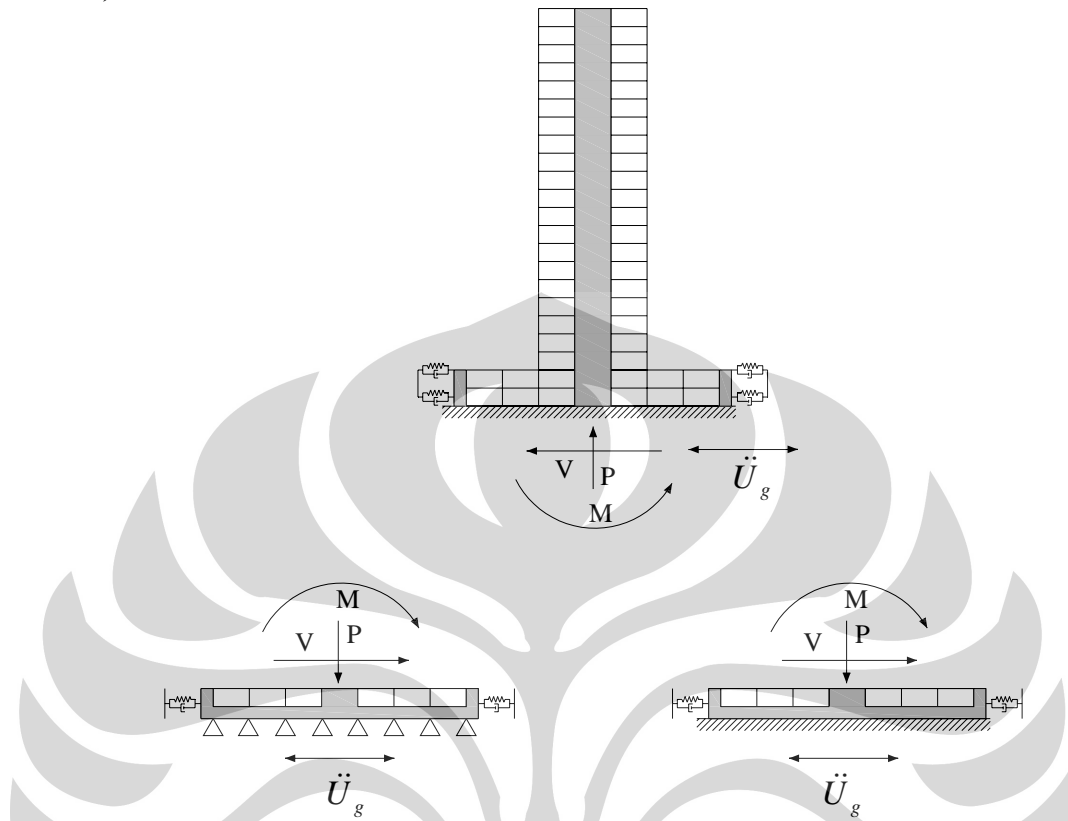
4.2.2. Penjepitan Lateral Struktur atas pada Taraf Lantai Basement

Dalam pemodelan ini struktur atas dijepit pada taraf lantai basement, mulai dari besemen 1, besemen 2, dan besemen 3, kemudian dikenakan percepatan gempa pada taraf penjepitan. Reaksi perletakan yang didapatkan ditransfer sebagai aksi pada basemen di bawahnya. Tanah di sepanjang dinding besemen dimodelkan sebagai sistem pegas-redaman dengan perletakan pada dasar besemen dimodelkan, pertama sebagai jepit dan kedua sebagai sendi. Pemodelan dapat dilihat visualisasinya pada gambar 4.3. berikut ini :

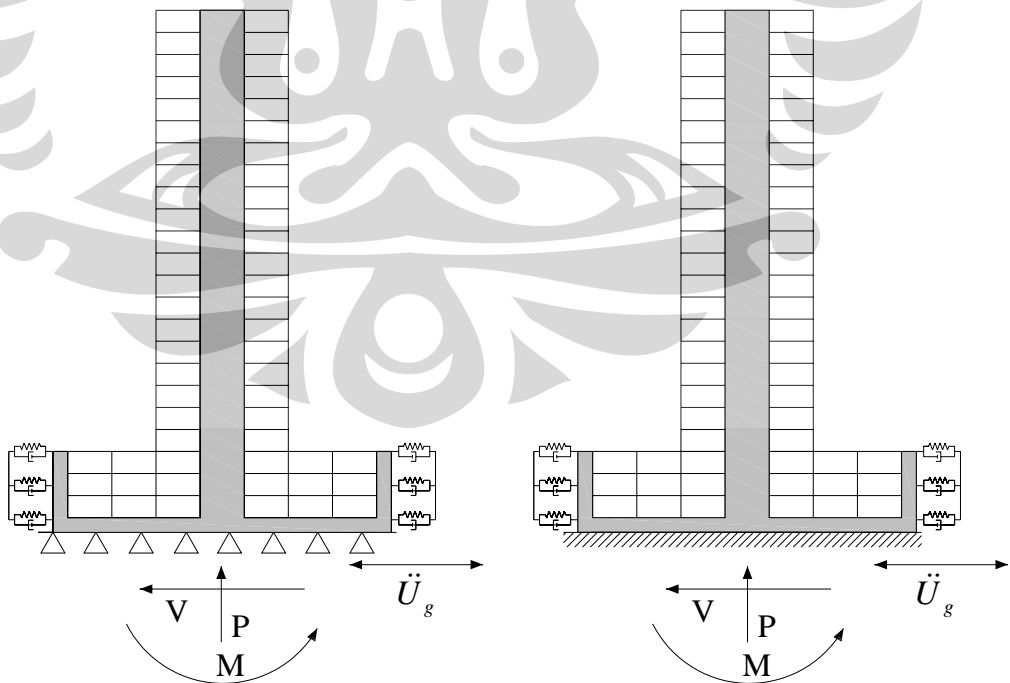
a)

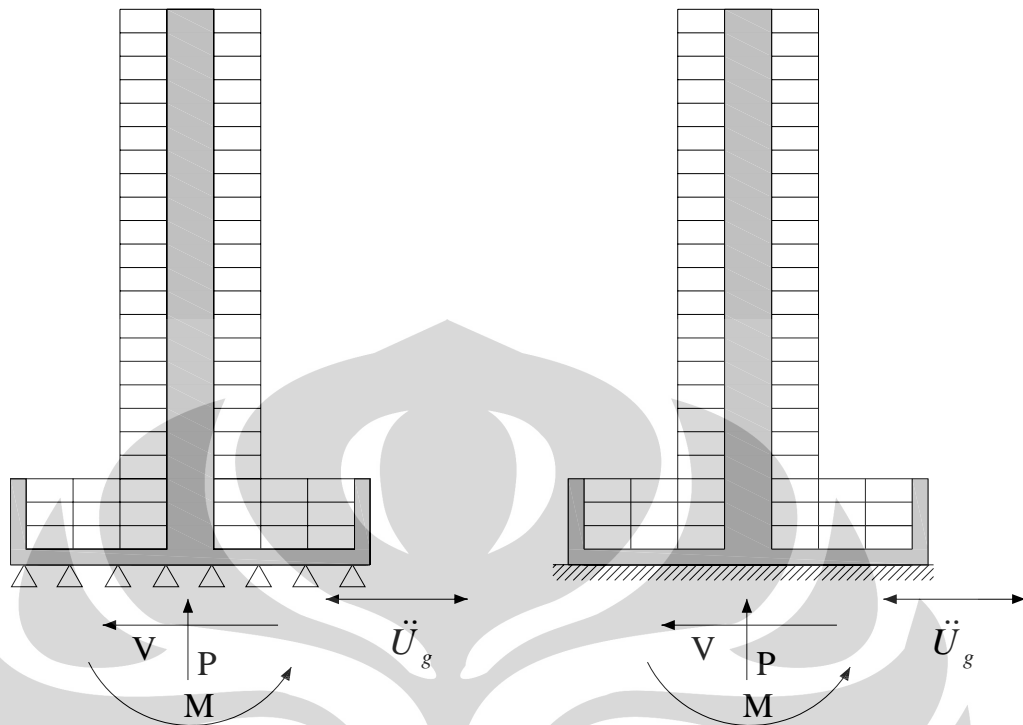


b)



c)

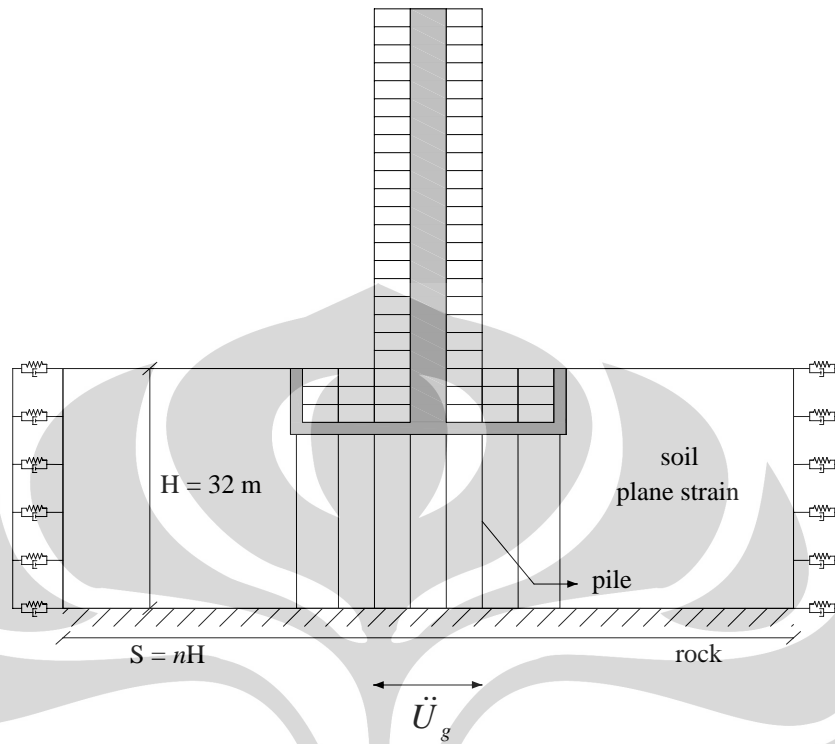




Gambar 4.3. a) Struktur jepit pada lantai besemen 1, b) Struktur jepit pada lantai besemen 2, c) Perletakan pada lantai besemen 3

4.2.3. Pemodelan Sistem Tanah-Struktur Secara Utuh

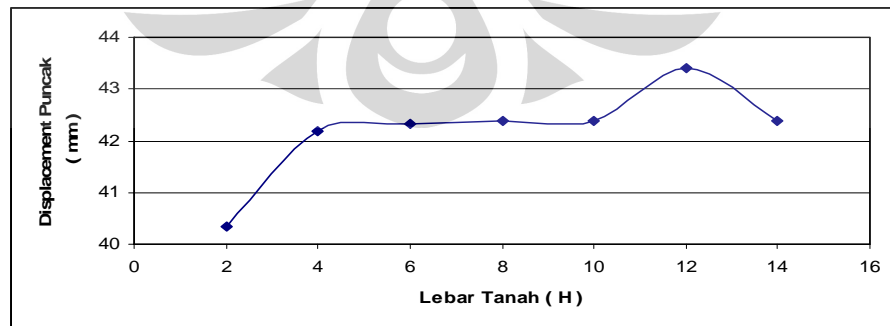
Pemodelan ini mempunyai tujuan untuk mendekati kondisi real dari peristiwa perambatan gelombang energi gempa dari batuan dasar ke tanah di atasnya dan kemudian ke dalam struktur. Hasil respon dari pemodelan ini akan dibandingkan dengan hasil respon dari pemodelan yang sebelumnya untuk mengetahui besar perbedaannya. Tanah dimodelkan dengan elemen *plane strain* untuk kedalaman tanah dari batuan dasar H dan bentang tanah S seperti terlihat pada gambar 4.4. berikut ini :



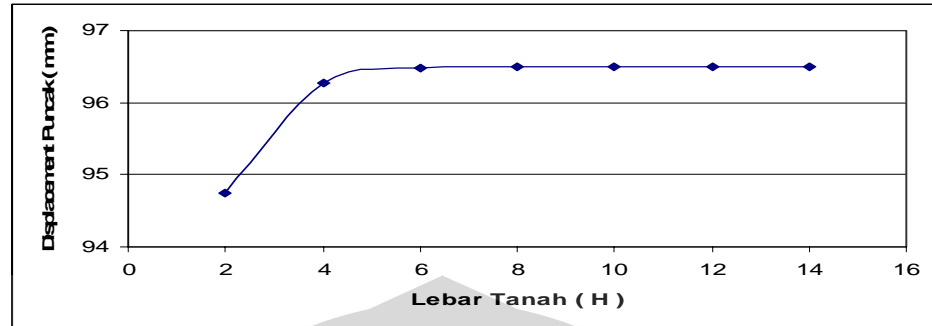
Gambar 4.4. Sistem struktur-tanah dengan pile

Bentang pemodelan tanah (S) ditentukan dengan mencari tahu terlebih dahulu respon *displacement* puncak struktur yang maksimum untuk variasi nilai n , mulai dari 2, 4, 6, 8, 10, 12, dan 14 kali nilai H . Respon *displacement* untuk masing-masing variasi disajikan pada grafik berikut ini :

Grafik 4.5.a. Respon *displacement* untuk 10 lantai



Grafik 4.1.b. Respon displacement untuk 20 lantai



Dapat dilihat dari grafik di atas bahwa respon displacement mulai stabil nilainya pada $n = 8$. Dengan demikian, pada pemodelan 4 digunakan bentang tanah $S = 8H$.

4.3. OUTPUT PEMODELAN

Dari pemodelan yang dilakukan, hasil yang akan diperoleh dan dievaluasi adalah :

1. Periode dan displacement puncak struktur
2. Gaya geser struktur
3. Momen guling struktur

Akan tetapi, agar hasil output dari pemodelan yang berbeda-beda dapat dibandingkan, maka output di atas diperhitungkan dengan cara :

1. Displacement puncak struktur diperhitungkan relatif terhadap lantai dasar
2. Membagi gaya geser struktur dengan berat gempa struktur (W_{gempa}), disebut rasio gaya geser dalam persen
3. Membagi momen guling struktur dengan mengalikan tinggi struktur dari penjepitannya dengan berat gempa struktur ($W_{gempa} \times H$), disebut rasio momen guling dalam persen
4. Membandingkan rasio gaya geser dasar kasus dinamik dengan rasio gaya

geser dasar kasus statik, yaitu $\frac{V_{base}}{W_{gempa}} = \frac{CI}{R}$. Nilai C didapat dengan melihat

grafik respon spectrum SNI wilayah gempa 3, dengan mengacu pada nilai periode mode pertama (T_1) dari output SAP dari masing-masing struktur.

Untuk memudahkan menganalisa, maka output akan disajikan dalam bentuk grafik dan diagram, dimana masing-masing pemodelan memiliki indeks sebagai berikut :

Struktur Atas

Pemodelan 1 dan Pemodelan 3:

(1A) Struktur jepit di level muka tanah (lantai dasar)

Pemodelan 2 :

(2A1) Struktur jepit di B1, tanah sebagai pegas-redaman

(2A2) Struktur jepit di B2, tanah sebagai pegas-redaman

(2A3JDT) Struktur jepit di B3, tanah sebagai pegas-redaman

(2A3JTT) Struktur jepit di B3, tanah tidak dimodelkan

(2A3SDT) Struktur sendi di B3, tanah sebagai pegas-redaman

(2A3STT) Struktur sendi di B3, tanah tidak dimodelkan

Pemodelan 4 :

(4A) Struktur ditopang borepile yang menyentuh pada tanah keras (dimodelkan sebagai jepit), tanah dimodelkan dengan plane strain.

Struktur Bawah

Pemodelan 1 :

(1BJ) Basement jepit di B3

(1BS) Basement sendi di B3

Pemodelan 2 :

(2B3JDT) Struktur jepit di B3, tanah sebagai pegas-redaman

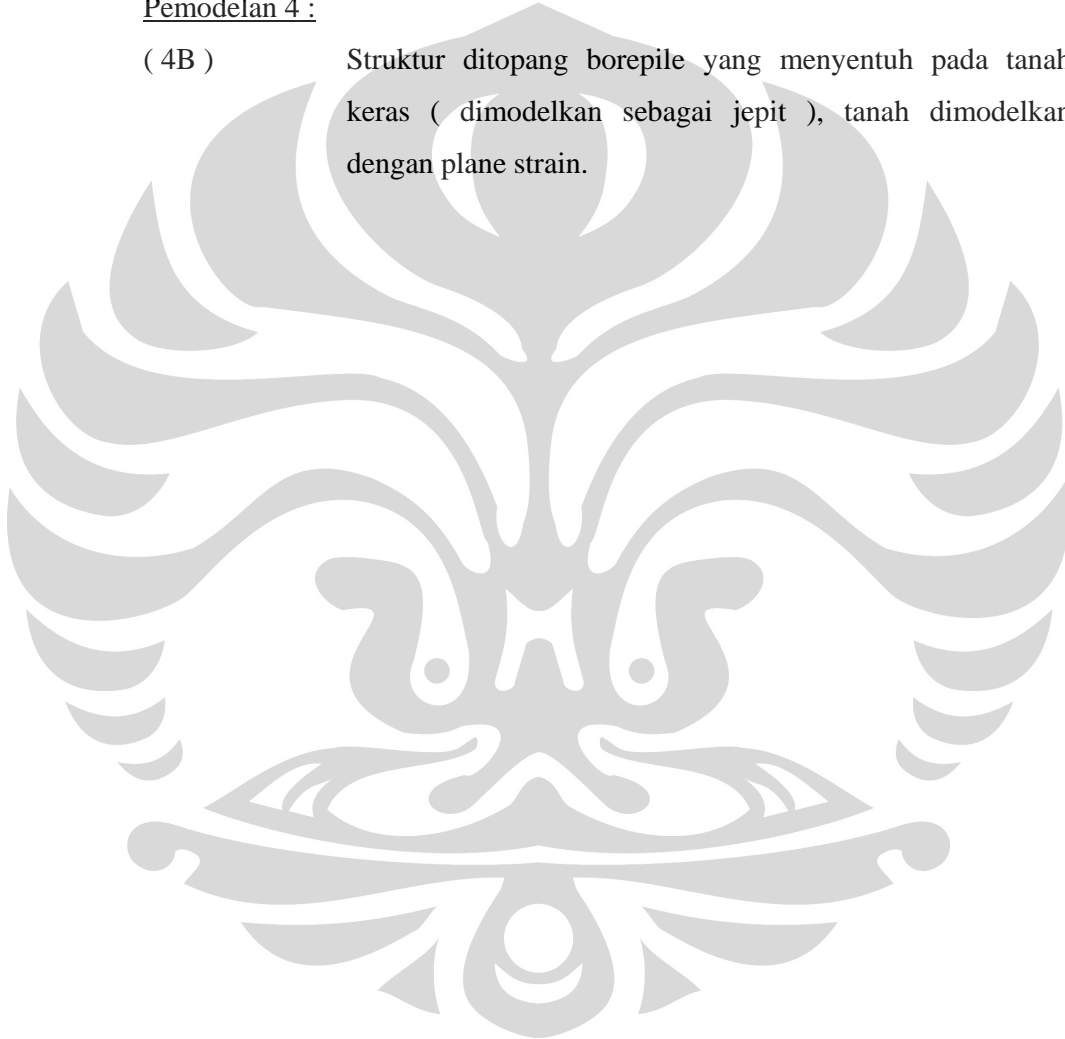
(2B3JTT) Struktur jepit di B3, tanah tidak dimodelkan

Pemodelan 3 :

- (3BJ) Struktur jepit di lantai dasar, gempa pada basement berupa tekanan tanah
- (3BS) Struktur sendi di lantai dasar, gempa pada basement berupa tekanan tanah

Pemodelan 4 :

- (4B) Struktur ditopang borepile yang menyentuh pada tanah keras (dimodelkan sebagai jepit), tanah dimodelkan dengan plane strain.



BAB V

HASIL ANALISA RESPON DINAMIK STRUKTUR DAN DISKUSI

5.1. ANALISA

Analisa respon dinamik struktur dilakukan dengan menggunakan program SAP 8 versi 10. Untuk prosedur dalam memasukkan input, secara khusus input gempa respon spectrum telah dijelaskan di bagian bab 4.1.3. Output yang ingin dievaluasi antara lain :

1. Periode getar mode 1 dan displacement puncak
2. Gaya geser dan momen guling pada taraf perletakan (*base reaction*)
3. Gaya geser dan momen guling tingkat pada taraf lantai dasar

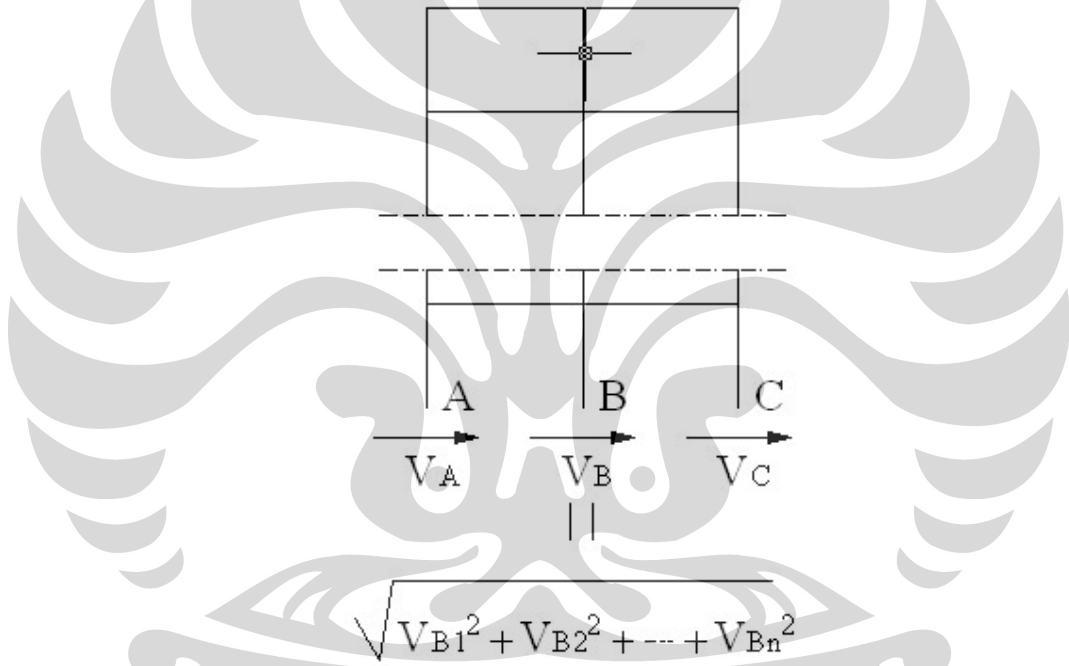
Program SAP hanya mengeluarkan poin pertama dan poin kedua dari output yang disebutkan di atas. SAP tidak mengeluarkan gaya-gaya tingkat (contoh : gaya geser dan momen guling tingkat), sehingga poin ketiga didapatkan dengan mengolah terlebih dahulu output gaya-gaya dalam elemen akibat beban gempa dari program SAP. Untuk mengetahui cara pengolahan datanya, perlu diketahui bagaimana program SAP menghasilkan gaya dalam elemen dan gaya-gaya tingkat. Gambar 5.1. menggambarkan bagaimana gaya dalam geser akibat beban gempa dari 3 buah elemen kolom (kolom A, B, dan C) pada suatu tingkat tertentu dari sistem struktur rangka portal didapatkan dari penjumlahan gaya dalam geser akibat gempa dari masing-masing mode dengan metode SRSS. V_{Bx} berarti gaya dalam geser akibat gempa pada kolom B dari mode ke-x. Secara matematis dapat ditulis

$$V_i = \sqrt{\sum_{x=1}^n (V_{ix})^2} \dots\dots\dots(5.1)$$

dimana i menunjukkan inisial kolom (A, B, dan C), dan x menunjukkan mode (1, 2, 3,, n). Sedangkan gaya geser tingkat didapatkan dengan menggunakan rumusan sebagai berikut

$$V_{tingkat} = \sqrt{\left(\sum_{i=A}^C V_{i1}\right)^2 + \left(\sum_{i=A}^C V_{i2}\right)^2 + \left(\sum_{i=A}^C V_{i3}\right)^2 + \dots + \left(\sum_{i=A}^C V_{in}\right)^2} \dots\dots(5.2)$$

Dengan menggunakan output gaya-gaya dalam elemen yang berada pada level lantai yang sama, kemudian menguraikannya menjadi gaya dalam gempa akibat mode ke- x , maka $V_{tingkat}$ dapat diperoleh dengan menggunakan rumus di atas. Contoh perhitungan dapat dilihat di lampiran.



Gambar 5.1. Contoh Output Gaya Dalam Geser Mode ke-n

5.2. HASIL ANALISA

Respon dinamik struktur yang akan ditinjau antara lain displacement di puncak struktur, gaya geser dan momen guling dasar, gaya geser dan momen guling tingkat, serta gaya geser pada dinding basement dari masing-masing pemodelan dengan ketinggian struktur 10, 20, dan 30 lantai, sebagai berikut :

5.2.1. Bangunan 10 Lantai

5.2.1.1. Berat Total dan Berat Gempa

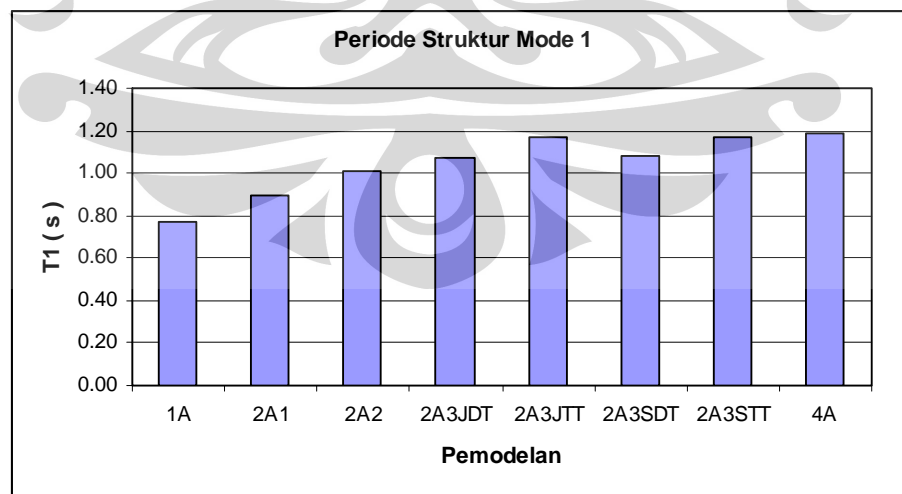
Berat total adalah berat keseluruhan struktur, dan berat gempa adalah berat yang digunakan untuk menghitung gaya geser tingkat gempa. Berat gempa terdiri atas 1 DL (dead load) + 0,3 LL (live load). Perlu menjadi catatan bahwa untuk model struktur tanah jadi satu, berat bore pile juga diikutsertakan dalam perhitungan berat total.

Tabel 5.1. Berat Struktur 10 Lantai

| Model | Berat 10 Lantai | | | |
|---|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | DL (kN) | LL (kN) | TOTAL (kN) | GEMPA (kN) |
| Model 1 dan 3 : <i>Level Muka Tanah</i> | 3341.28 | 423.00 | 3764.28 | 3468.18 |
| Model 2 : | | | | |
| <i>Perletakan di Basement 1</i> | 4194.48 | 639.00 | 4833.48 | 4386.18 |
| <i>Perletakan di Basement 2</i> | 5047.68 | 855.00 | 5902.68 | 5304.18 |
| <i>Perletakan di Basement 3</i> | 6270.24 | 1287.00 | 7557.24 | 6656.34 |
| Model 4 : <i>Struktur Tanah jadi Satu</i> | 8465.57 | 1285.00 | 9750.57 | 8851.07 |

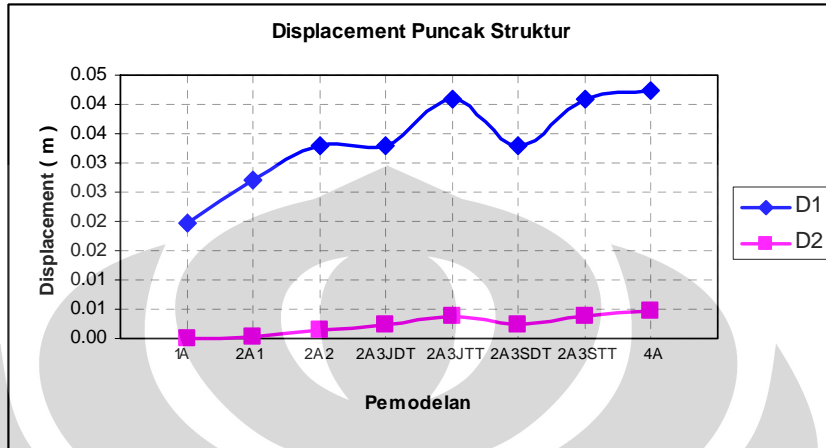
5.2.1.2. Periode Getar Mode 1 dan Displacement Puncak

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai periode getar dari pemodelan pada struktur 10 lantai.

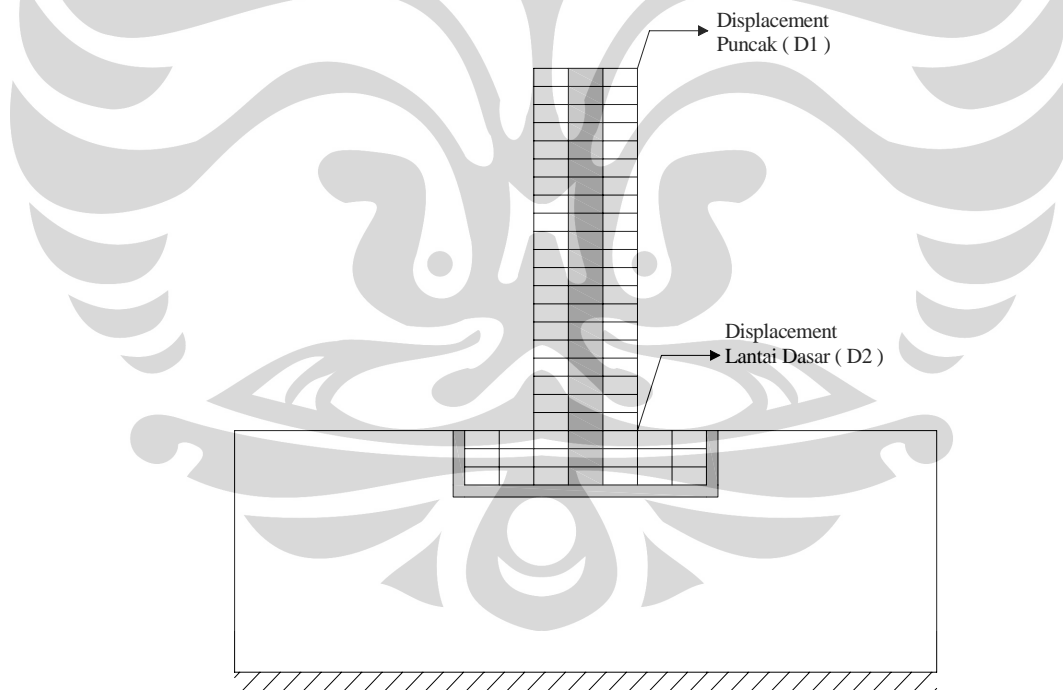


Grafik 5.1. Periode getar (T1) pemodelan struktur 10 lantai

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai displacement dari pemodelan pada struktur 10 lantai. Displacement yang ditinjau adalah displacement pada puncak struktur dan lantai dasar struktur, seperti terlihat pada gambar 5.1.



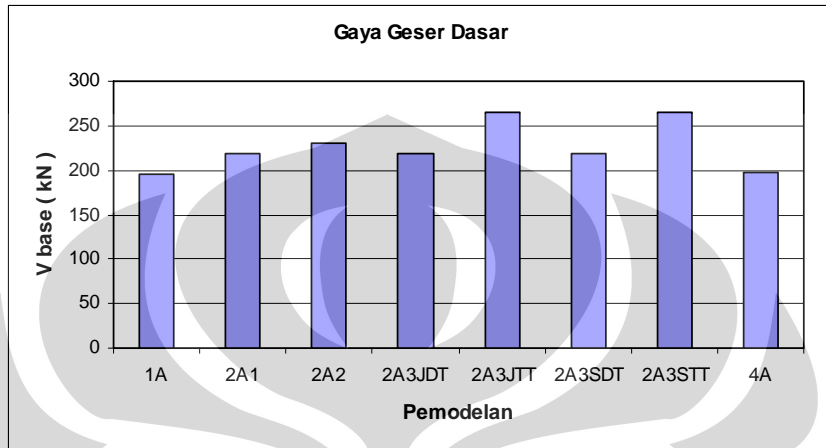
Grafik 5.2. Displacement puncak pemodelan struktur 10 lantai



Gambar 5.1. Deskripsi D1 dan D2

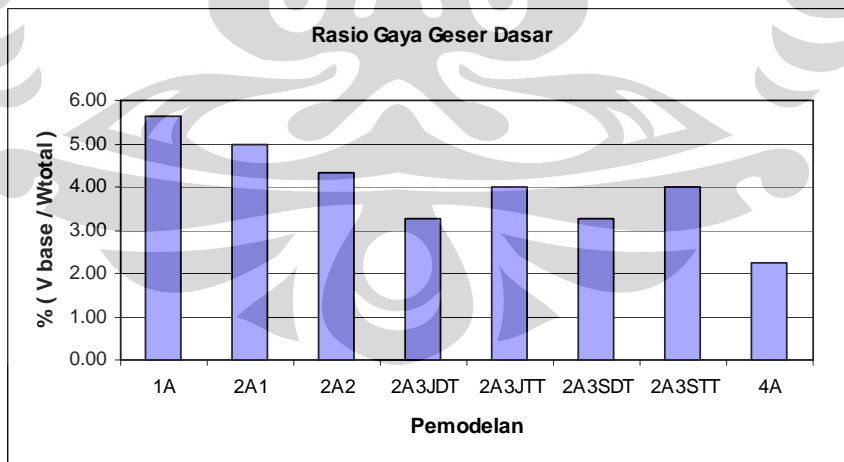
5.2.1.3. Gaya Geser dan Momen Guling di Perletakan

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai gaya geser dasar (taraf perletakan) dari pemodelan pada struktur 10 lantai.



Grafik 5.3. Gaya geser dasar

Sedangkan diagram di bawah ini menunjukkan nilai rasio gaya geser dasar (taraf perletakan) terhadap berat total struktur dari pemodelan pada struktur 10 lantai.



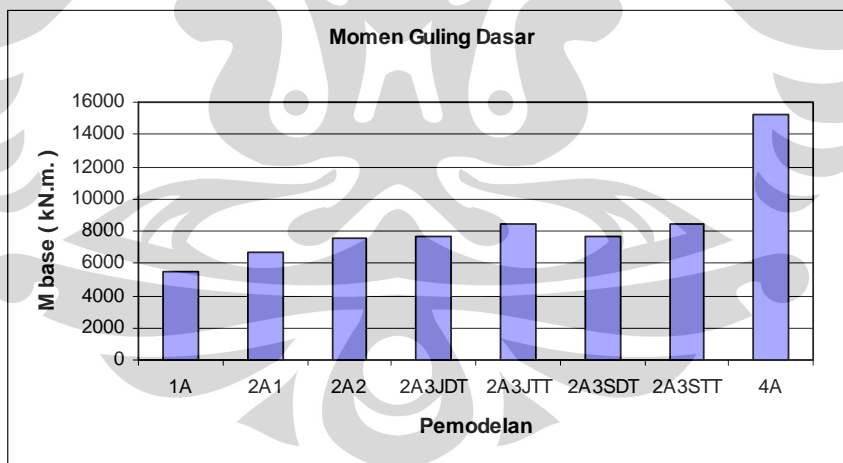
Grafik 5.4. Rasio gaya geser dasar

Tabel di bawah ini menunjukkan nilai rasio gaya geser dasar dari analisa static ekuivalen dari pemodelan pada struktur 10 lantai.

Tabel 5.2. Rasio Gaya Geser Dasar Analisa Statik Ekuivalen

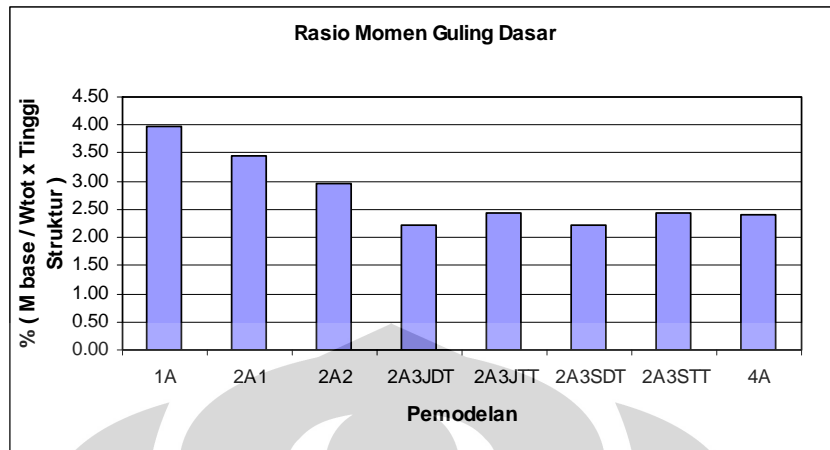
| RASIO GAYA GESER DASAR ANALISA STATIK EKIVALEN | | | |
|--|-----------|------|-----------|
| Model | 10 Lantai | | |
| | T1 (s) | C | Rasio (%) |
| Model 1 : <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 0.7685 | 0.75 | 8.82 |
| Model 2 : <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> | 0.8973 | 0.75 | 8.82 |
| <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> | 1.0112 | 0.74 | 8.73 |
| <i>Jepit di Basement 3 :</i> | | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> | 1.0759 | 0.70 | 8.20 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> | 1.1665 | 0.64 | 7.56 |
| <i>Sendi di Basement 3 :</i> | | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> | 1.0766 | 0.70 | 8.20 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 1.1702 | 0.64 | 7.54 |
| Model 4 : <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 1.1874 | 0.63 | 7.43 |

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai momen guling dasar (taraf perletakan) dari pemodelan pada struktur 10 lantai.



Grafik 5.5. Momen guling dasar

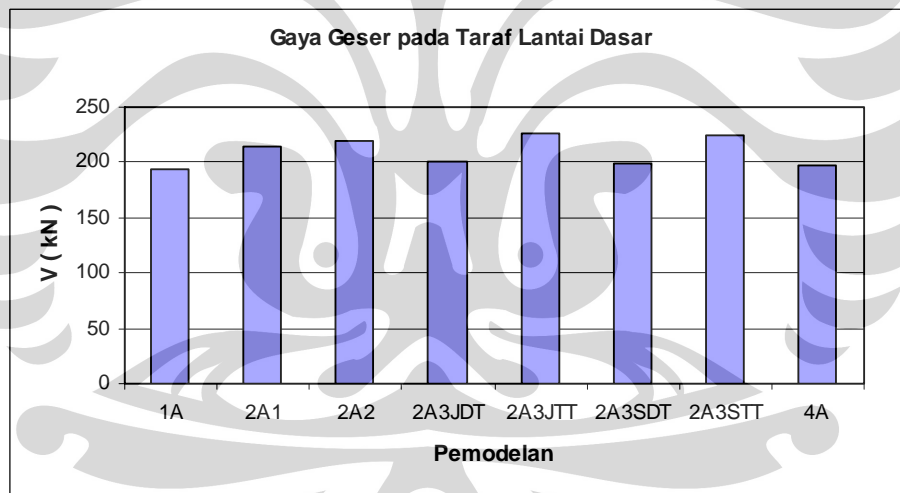
Sedangkan diagram di bawah ini menunjukkan nilai rasio momen guling dasar (taraf perletakan) terhadap berat total struktur dikalikan tinggi total struktur dari pemodelan pada struktur 10 lantai.



Grafik 5.6. Rasio momen guling dasar

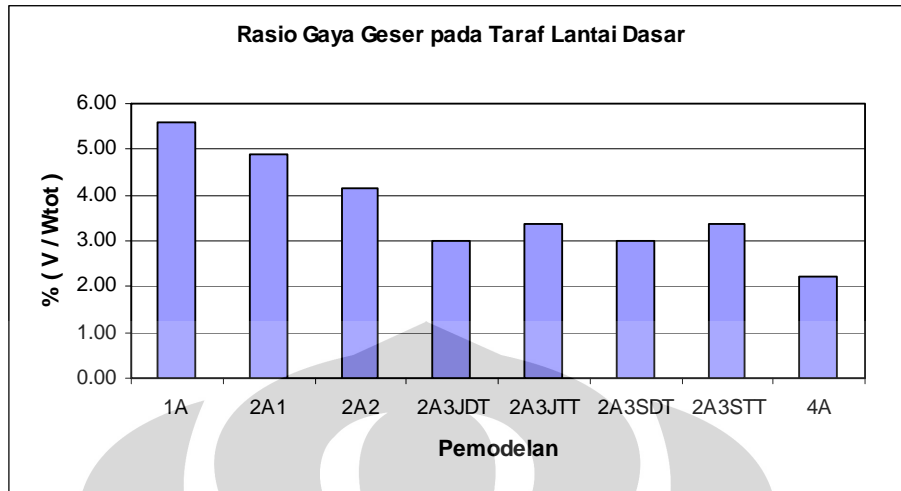
5.2.1.4. Gaya Geser di Taraf Lantai Dasar

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai gaya geser pada taraf lantai dasar dari pemodelan pada struktur 10 lantai.



Grafik 5.7. Gaya geser pada taraf lantai dasar

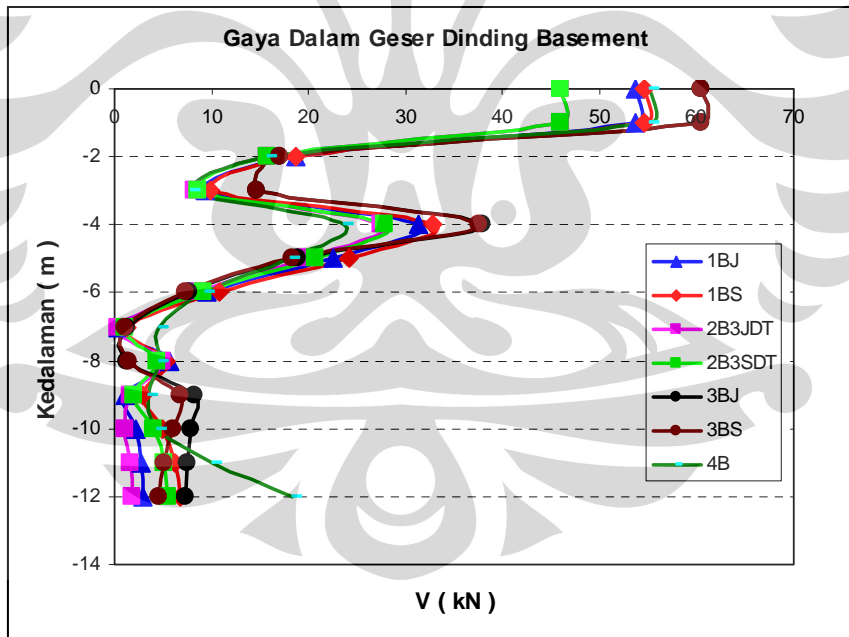
Sedangkan diagram di bawah ini menunjukkan nilai rasio gaya geser pada taraf lantai dasar terhadap berat total struktur dari pemodelan pada struktur 10 lantai.



Grafik 5.8. Rasio gaya geser pada taraf lantai dasar

5.2.1.5. Gaya Dalam Geser Dinding Basement

Grafik di bawah ini menunjukkan nilai gaya dalam geser sepanjang dinding basement dari pemodelan pada struktur 10 lantai.



Grafik 5.9. Gaya dalam geser sepanjang dinding basement

5.2.2. Bangunan 20 Lantai

5.2.2.1. Berat Total dan Berat Gempa

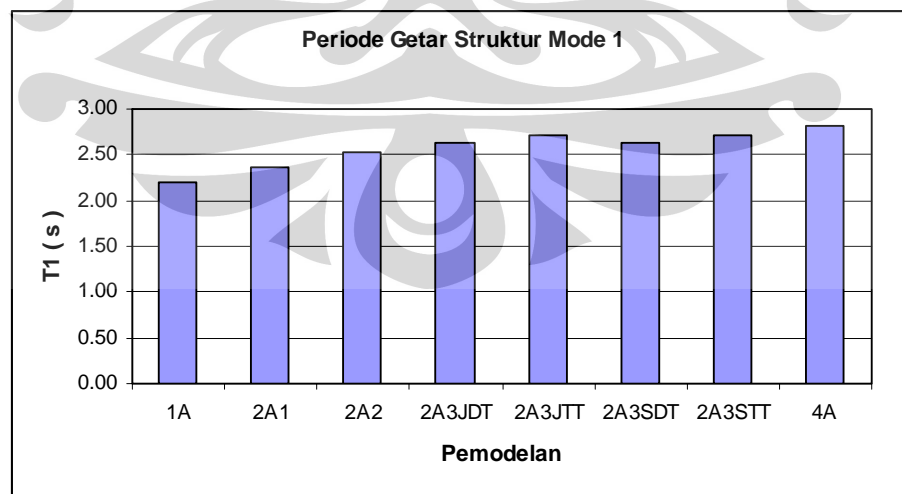
Berat total adalah berat keseluruhan struktur, dan berat gempa adalah berat yang digunakan untuk menghitung gaya geser tingkat gempa. Berat gempa terdiri atas 1 DL (dead load) + 0,3 LL (live load). Perlu menjadi catatan bahwa untuk model struktur tanah jadi satu, berat bore pile juga diikutsertakan dalam perhitungan berat total.

Tabel 5.3. Berat Struktur 20 Lantai

| Model | Berat 20 Lantai | | | |
|---|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | DL (kN) | LL (kN) | TOTAL (kN) | GEMPA (kN) |
| Model 1 dan 3 : <i>Level Muka Tanah</i> | 8067.60 | 873.00 | 8940.60 | 8329.50 |
| Model 2 : | | | | |
| <i>Perletakan Basement 1</i> | 8978.40 | 1089.00 | 10067.40 | 9305.10 |
| <i>Perletakan Basement 2</i> | 9889.20 | 1305.00 | 11194.20 | 10280.70 |
| <i>Perletakan Basement 3</i> | 11169.36 | 1737.00 | 12906.36 | 11690.46 |
| Model 4 : <i>Struktur Tanah jadi Satu</i> | 13370.99 | 1737.00 | 15107.99 | 13892.09 |

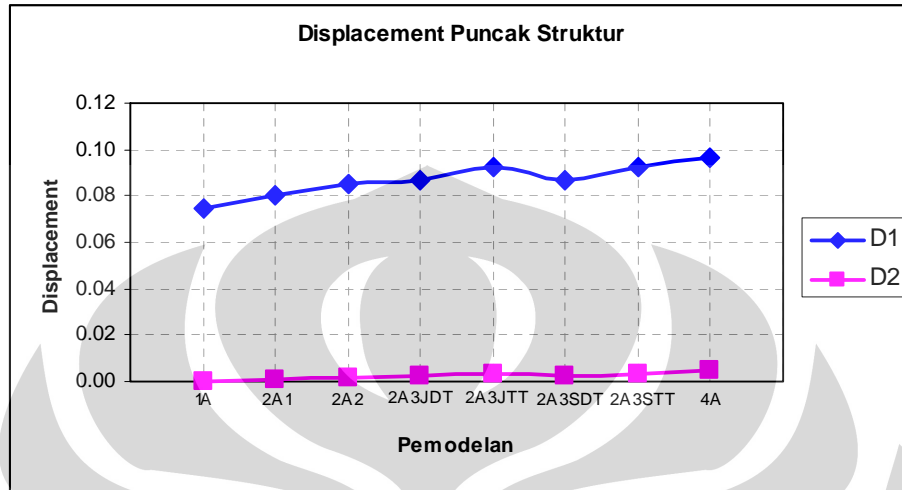
5.2.2.2. Periode Getar Mode 1 dan Displacement Puncak

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai periode getar dari pemodelan pada struktur 20 lantai.



Grafik 5.10. Periode getar (T1)

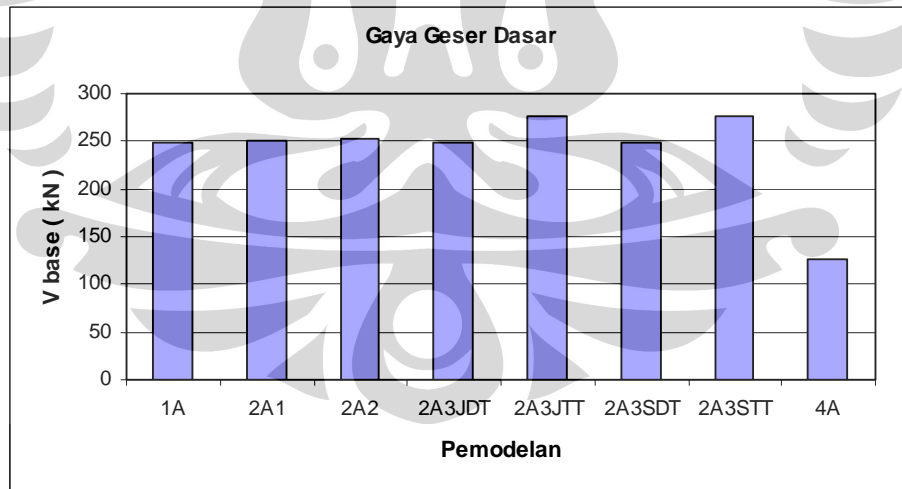
Diagram di bawah ini menunjukkan nilai displacement dari pemodelan pada struktur 20 lantai. Displacement yang ditinjau adalah displacement pada puncak struktur dan lantai dasar struktur, seperti terlihat pada gambar 5.1.



Grafik 5.11. Displacement puncak

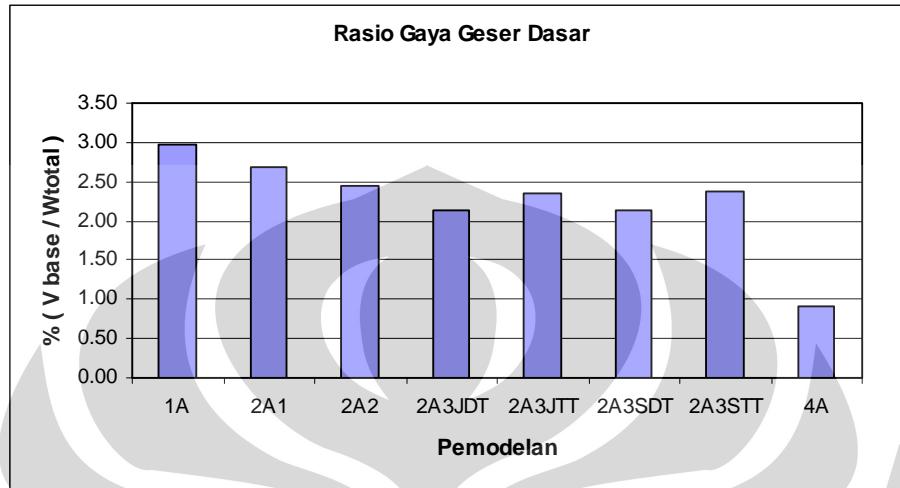
5.2.2.3. Gaya Geser dan Momen Guling di Perletakan

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai gaya geser dasar (taraf perletakan) dari pemodelan pada struktur 20 lantai.



Grafik 5.12. Gaya geser dasar

Sedangkan diagram di bawah ini menunjukkan nilai rasio gaya geser dasar (taraf perletakan) terhadap berat total struktur dari pemodelan pada struktur 20 lantai.



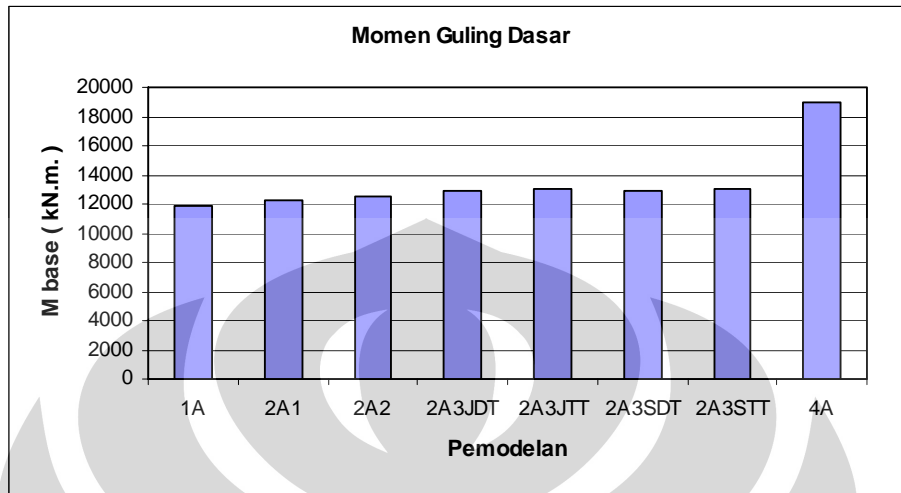
Grafik 5.13. Rasio gaya geser dasar

Tabel di bawah ini menunjukkan nilai rasio gaya geser dasar dari analisa static ekivalen dari pemodelan pada struktur 20 lantai.

Tabel 5.4. Rasio Gaya Geser Dasar Analisa Statik Ekivalen

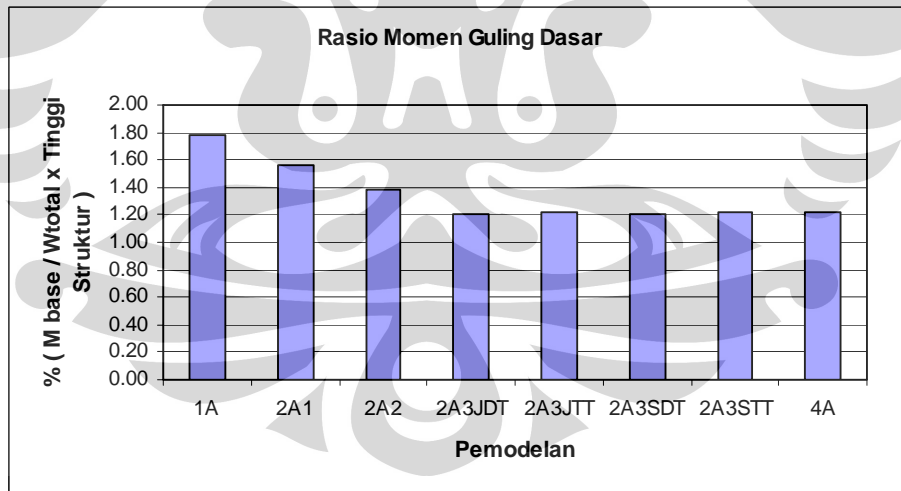
| RASIO GAYA GESER DASAR ANALISA STATIK EKIVALEN | | | |
|--|-----------|------|-----------|
| Model | 20 Lantai | | |
| | T1 (s) | C | Rasio (%) |
| Model 1 : | | | |
| <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 2.2018 | 0.34 | 4.01 |
| Model 2 : | | | |
| <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> | 2.3708 | 0.32 | 3.72 |
| <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> | 2.5188 | 0.30 | 3.50 |
| Jepit di Basement 3 : | | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> | 2.6207 | 0.29 | 3.37 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> | 2.6207 | 0.29 | 3.37 |
| Sendi di Basement 3 : | | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> | 2.6216 | 0.29 | 3.37 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 2.7106 | 0.28 | 3.26 |
| Model 4 : | | | |
| <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 2.8154 | 0.27 | 3.13 |

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai momen guling dasar (taraf perletakan) dari pemodelan pada struktur 20 lantai.



Grafik 5.14. Momen guling dasar

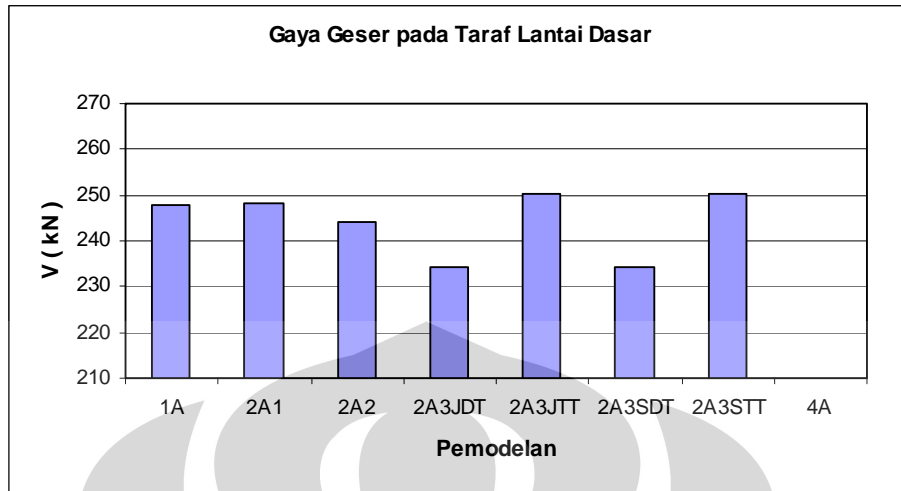
Sedangkan diagram di bawah ini menunjukkan nilai rasio momen guling dasar (taraf perletakan) terhadap berat total struktur dikalikan tinggi total struktur dari pemodelan pada struktur 20 lantai.



Grafik 5.15. Rasio momen guling dasar

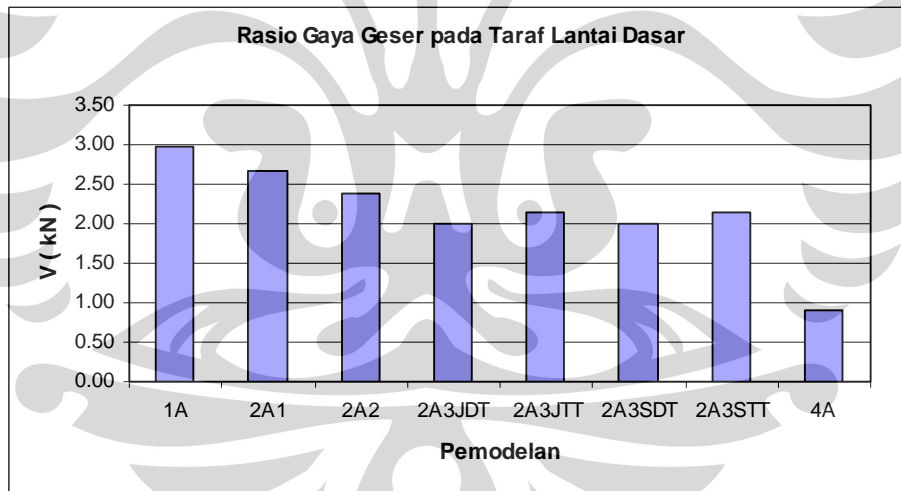
5.2.2.4. Gaya Geser di Taraf Lantai Dasar

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai gaya geser pada taraf lantai dasar dari pemodelan pada struktur 10 lantai.



Grafik 5.16. Gaya geser pada taraf lantai dasar

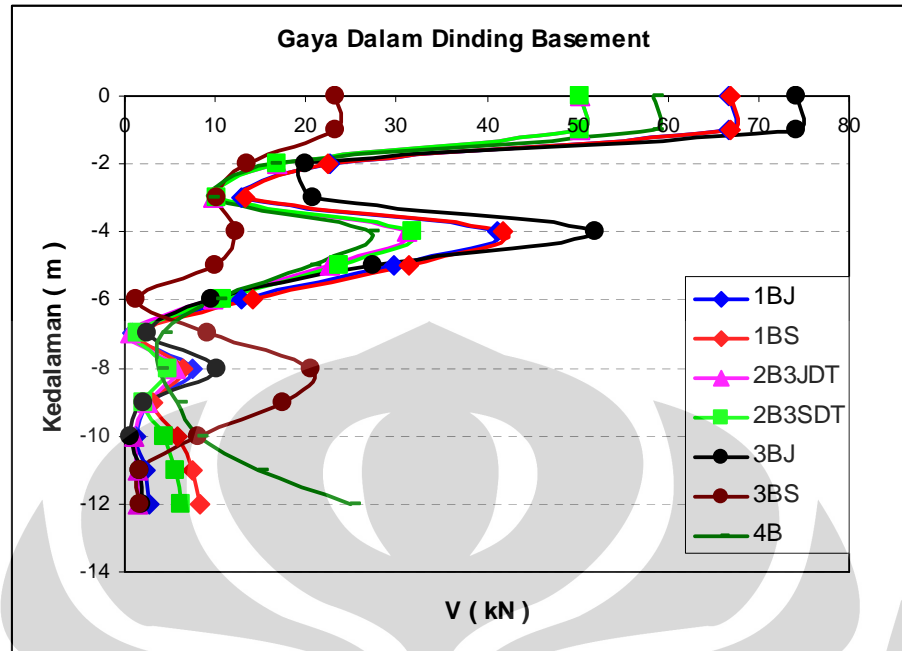
Sedangkan diagram di bawah ini menunjukkan nilai rasio gaya geser pada taraf lantai dasar terhadap berat total struktur dari pemodelan pada struktur 20 lantai.



Grafik 5.17. Gaya geser pada taraf lantai dasar

5.2.2.5. Gaya Dalam Geser Dinding Basement

Grafik di bawah ini menunjukkan nilai gaya dalam geser sepanjang dinding besemen dari pemodelan pada struktur 10 lantai.



Grafik 5.18. Gaya dalam geser dinding basement

5.2.3. Bangunan 30 Lantai

5.2.3.1. Berat Total dan Berat Gempa

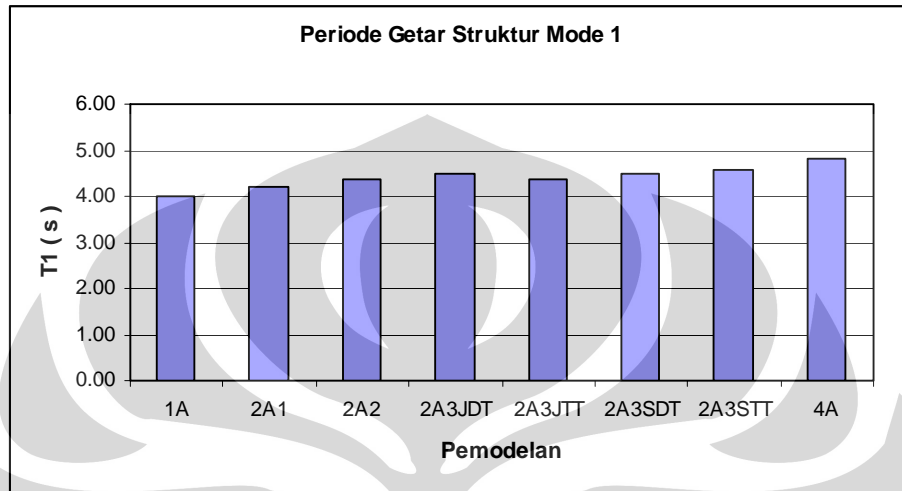
Berat total adalah berat keseluruhan struktur, dan berat gempa adalah berat yang digunakan untuk menghitung gaya geser tingkat gempa. Berat gempa terdiri atas 1 DL (dead load) + 0,3 LL (live load). Perlu menjadi catatan bahwa untuk model struktur tanah jadi 1, berat bore pile juga diikutsertakan dalam perhitungan berat total.

Tabel 5.5. Berat Struktur 30 Lantai

| Model | Berat 30 Lantai | | | |
|---|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | DL (kN) | LL (kN) | TOTAL (kN) | GEMPA (kN) |
| Model 1 dan 3 : <i>Level Muka Tanah</i> | 14558.40 | 1323.00 | 15881.40 | 14955.30 |
| Model 2 : | | | | |
| <i>Perletakan Basement 1</i> | 15624.72 | 1539.00 | 17163.72 | 16086.42 |
| <i>Perletakan Basement 2</i> | 16691.04 | 1755.00 | 18446.04 | 17217.54 |
| <i>Perletakan Basement 3</i> | 18126.72 | 2187.00 | 20313.72 | 18782.82 |
| Model 4 : | | | | |
| <i>Struktur Tanah jadi Satu</i> | 20328.35 | 2187.00 | 22515.35 | 20984.45 |

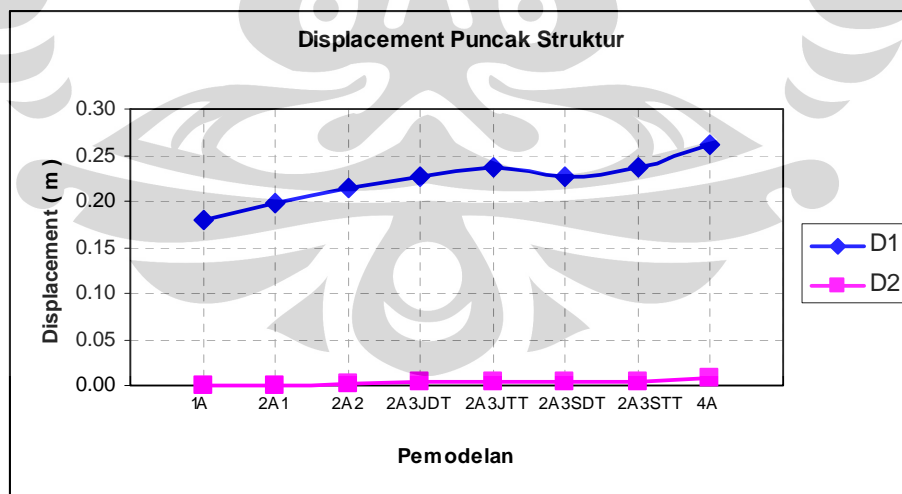
5.2.3.2. Periode Getar Mode 1 dan Displacement Puncak

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai periode getar dari pemodelan pada struktur 30 lantai.



Grafik 5.19. Periode getar (T1)

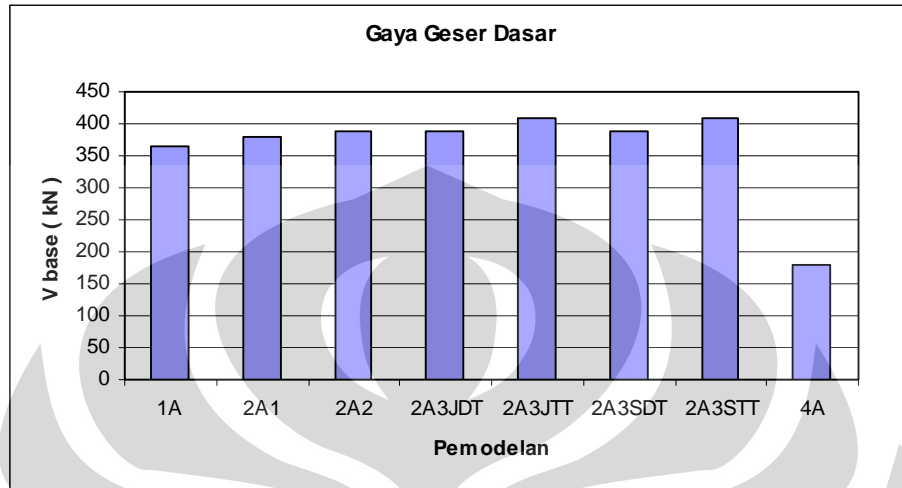
Diagram di bawah ini menunjukkan nilai displacement dari pemodelan pada struktur 30 lantai. Displacement yang ditinjau adalah displacement pada puncak struktur dan lantai dasar struktur, seperti terlihat pada gambar 5.1.



Grafik 5.20. Displacement puncak

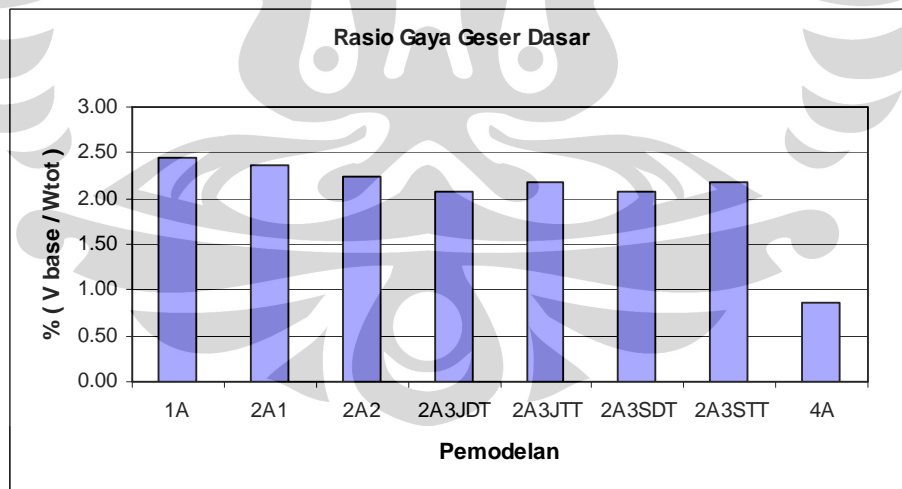
5.2.3.3. Gaya Geser dan Momen Guling di Perletakan

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai gaya geser dasar (taraf perletakan) dari pemodelan pada struktur 30 lantai.



Grafik 5.21. Gaya geser dasar

Sedangkan diagram di bawah ini menunjukkan nilai rasio gaya geser dasar (taraf perletakan) terhadap berat total struktur dari pemodelan pada struktur 30 lantai.



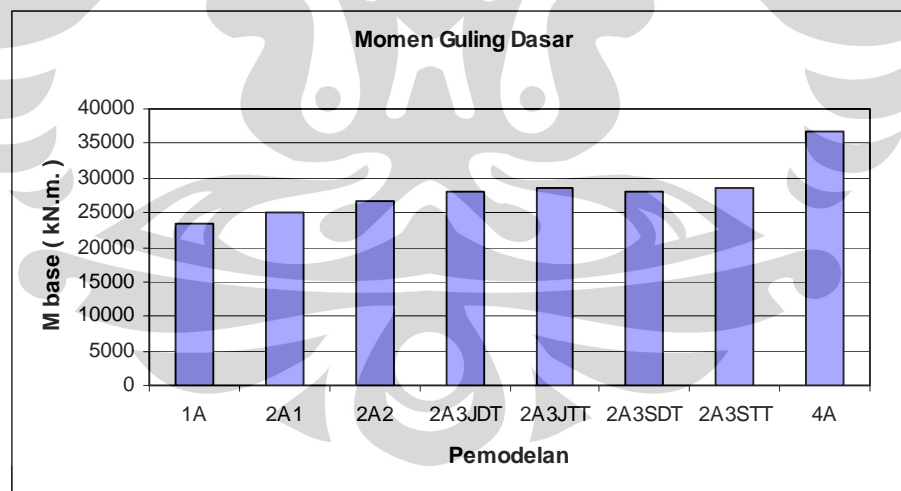
Grafik 5.22. Rasio gaya geser dasar

Tabel di bawah ini menunjukkan nilai rasio gaya geser dasar dari analisa statik ekuivalen dari pemodelan pada struktur 30 lantai.

Tabel 5.6. Rasio Gaya Geser Dasar Analisa Statik Ekuivalen

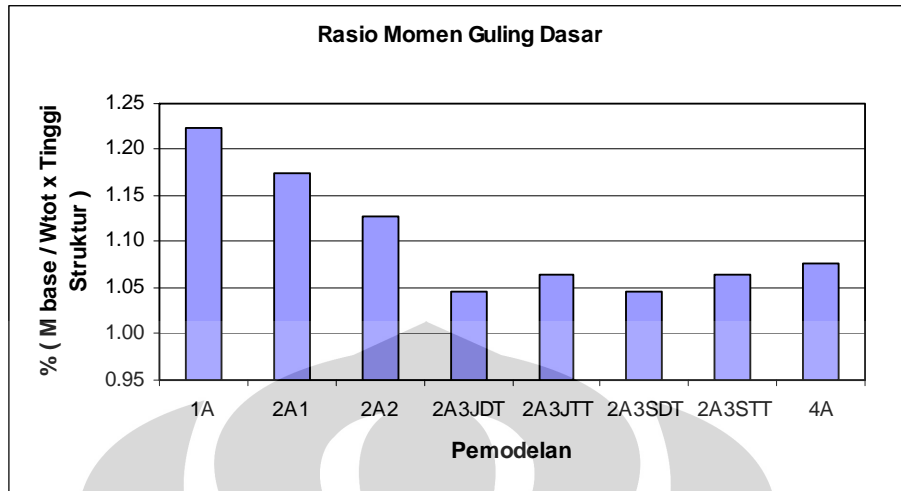
| RASIO GAYA GESER DASAR ANALISA STATIK EKIVALEN | | | |
|--|-------------|------|----------------|
| Model | 30 Lantai | | |
| | T1 (s) | C | Rasio (%) |
| Model 1 : <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 3.9878 | 0.19 | 2.21 |
| Model 2 : <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> | 4.1840 | 0.18 | 2.11 |
| <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> | 4.3647 | 0.17 | 2.02 |
| Jepit di Basement 3 : | | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> | 4.4933 | 0.17 | 1.96 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> | 4.3739 | 0.17 | 2.02 |
| Sendi di Basement 3 : | | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> | 4.4946 | 0.17 | 1.96 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 4.0562 | 0.18 | 2.18 |
| Model 4 : <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 4.8118 | 0.16 | 1.83 |

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai momen guling dasar (taraf perletakan) dari pemodelan pada struktur 30 lantai.



Grafik 5.23. Momen guling dasar

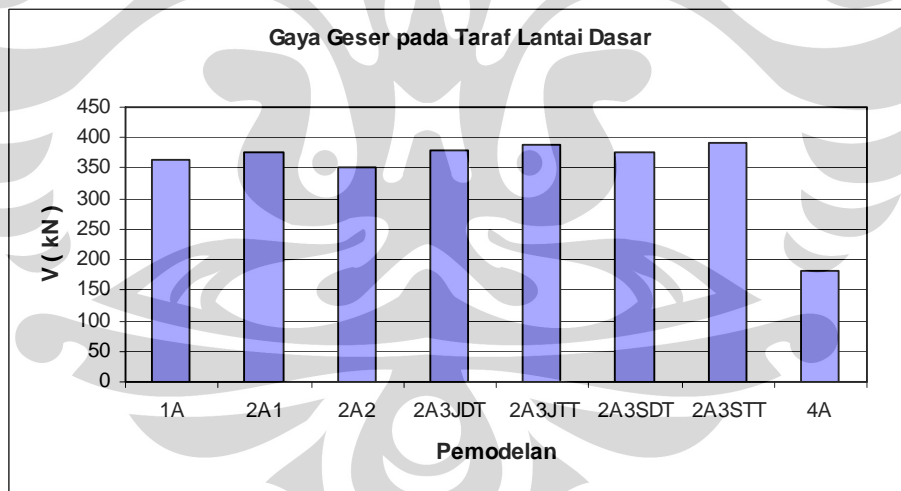
Sedangkan diagram di bawah ini menunjukkan nilai rasio momen guling dasar (taraf perletakan) terhadap berat total struktur dikalikan tinggi total struktur dari pemodelan pada struktur 30 lantai.



Grafik 5.24. Rasio momen guling dasar

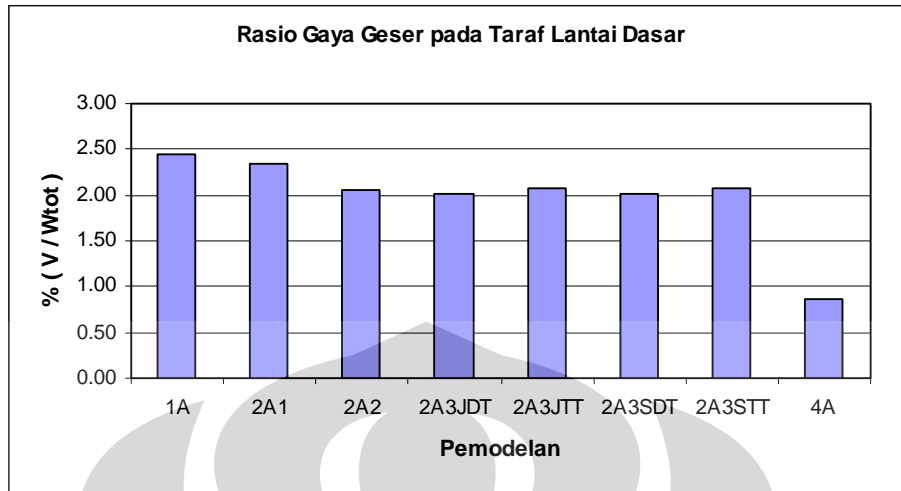
5.2.3.4. Gaya Geser di Taraf Lantai Dasar

Diagram di bawah ini menunjukkan nilai gaya geser pada taraf lantai dasar dari pemodelan pada struktur 30 lantai.



Grafik 5.25. Gaya geser pada taraf lantai dasar

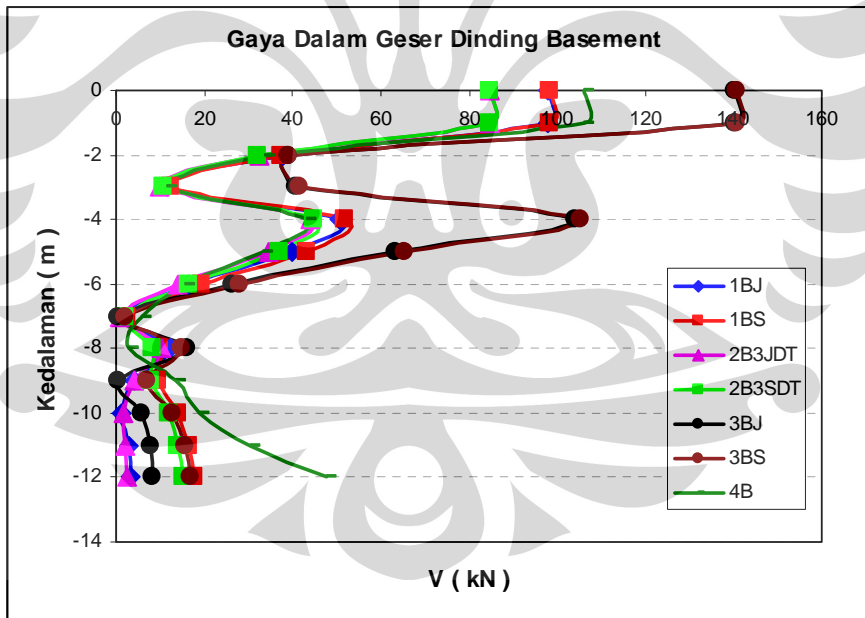
Sedangkan diagram di bawah ini menunjukkan nilai rasio gaya geser pada taraf lantai dasar terhadap berat total struktur dari pemodelan pada struktur 30 lantai.



Grafik 5.26. Gaya geser pada taraf lantai dasar

5.2.3.5. Gaya Dalam Geser Dinding Basement

Grafik di bawah ini menunjukkan nilai gaya dalam geser sepanjang dinding besemen dari pemodelan pada struktur 10 lantai.

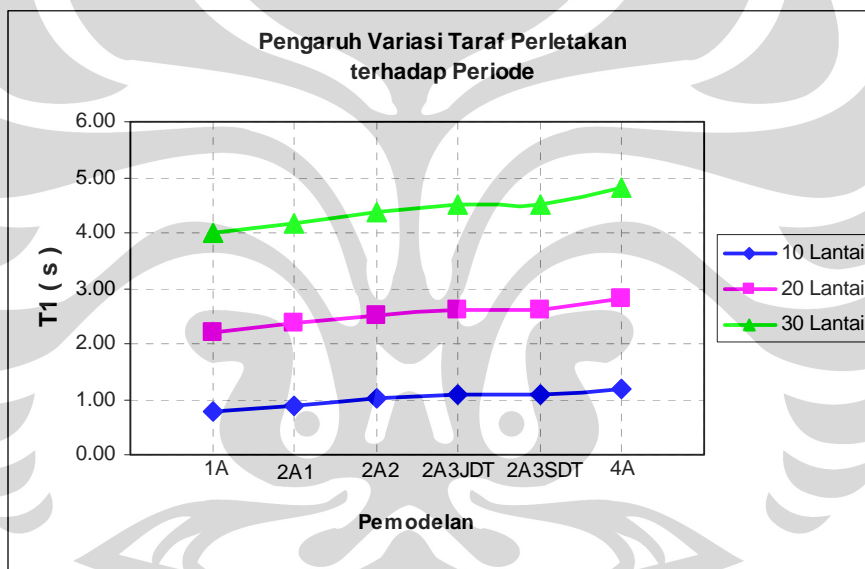


Grafik 5.27. Gaya dalam geser dinding besemen

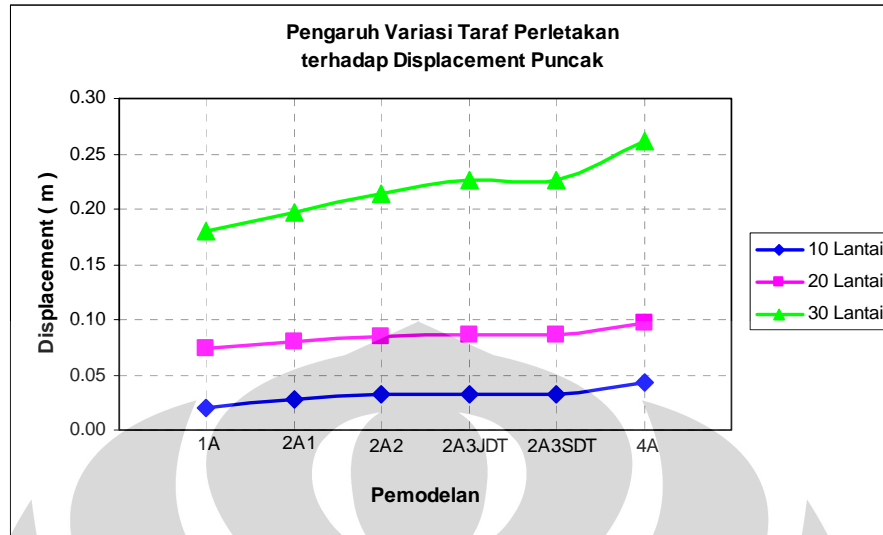
5.3. DISKUSI HASIL ANALISA

5.3.1. Pengaruh Variasi Taraf Perletakan terhadap Respon Struktur

Dapat dilihat dari grafik di bawah ini (Grafik 5.14.), nilai periode struktur terhadap variasi taraf perletakan cenderung untuk terus naik mulai dari pemodelan 1 sampai pemodelan 4. Variasi taraf perletakan, mulai dari pemodelan 1 sampai pemodelan 4, menyebabkan struktur menjadi lebih fleksibel oleh karena struktur menjadi lebih tinggi, ditambah kehadiran tanah dalam pemodelan yang menyebabkan tingkat pada taraf lantai dasar menjadi lebih fleksibel. Berbanding lurus dengan periode, maka displacement puncak pun terus naik mulai dari pemodelan 1 sampai dengan pemodelan 4 (Grafik 5.15.).

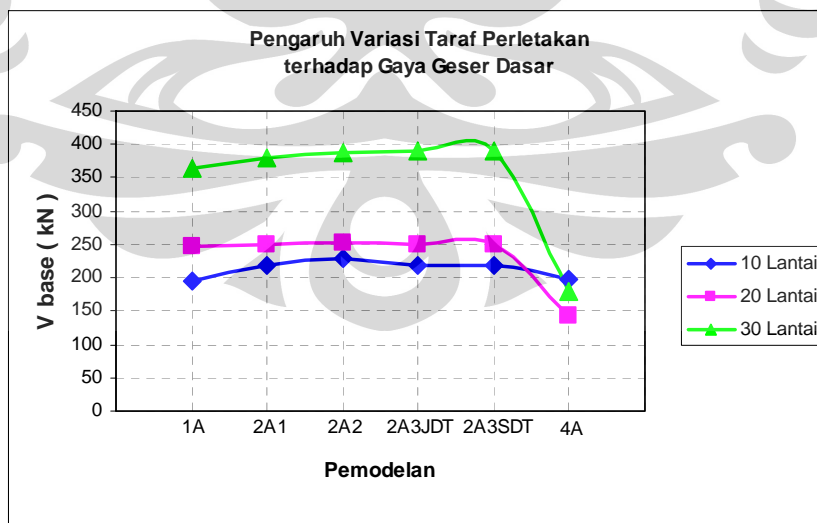


Grafik 5.28. Variasi taraf perletakan terhadap periode

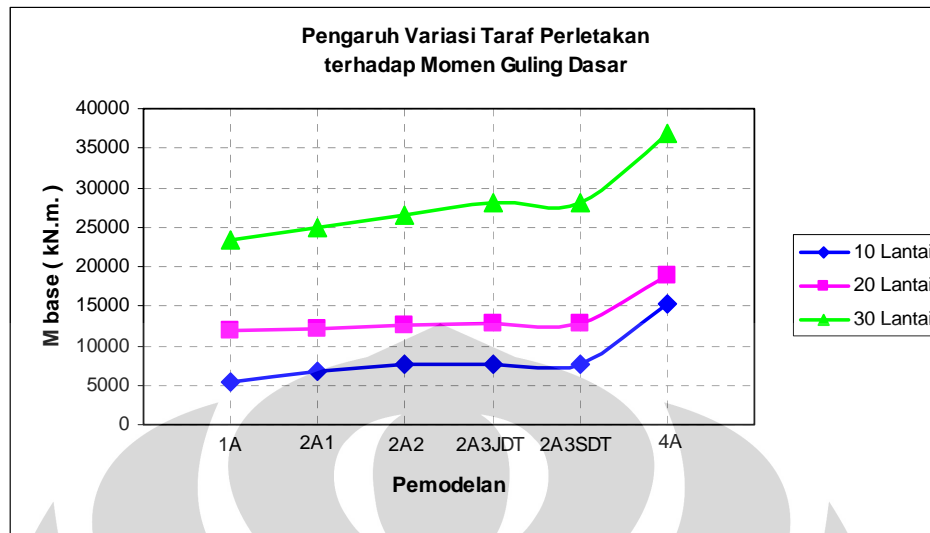


Grafik 5.29. Variasi taraf perletakan terhadap displacement puncak

Besarnya gaya geser dasar terhadap variasi taraf perletakan relatif sama untuk pemodelan 1A sampai 2A3SDT (lihat grafik 5.16). Gaya geser dasar maksimum terdapat pada pemodelan 4A dan gaya geser dasar minimum terdapat pada pemodelan 1A. Kalau kita lihat pemodelan 2, maka gaya geser dasar maksimum ada pada pemodelan 2A2. Berbanding lurus dengan gaya geser dan ketinggian struktur, maka nilai momen guling dasar juga semakin naik (grafik 5.17)



Grafik 5.30. Variasi taraf perletakan terhadap gaya geser dasar

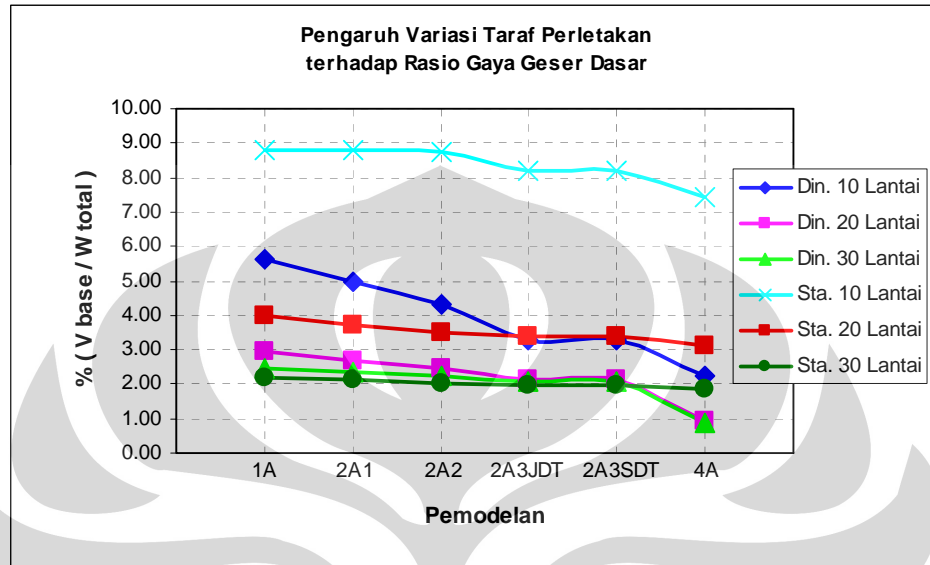


Grafik 5.31. Variasi taraf perletakan terhadap momen guling dasar

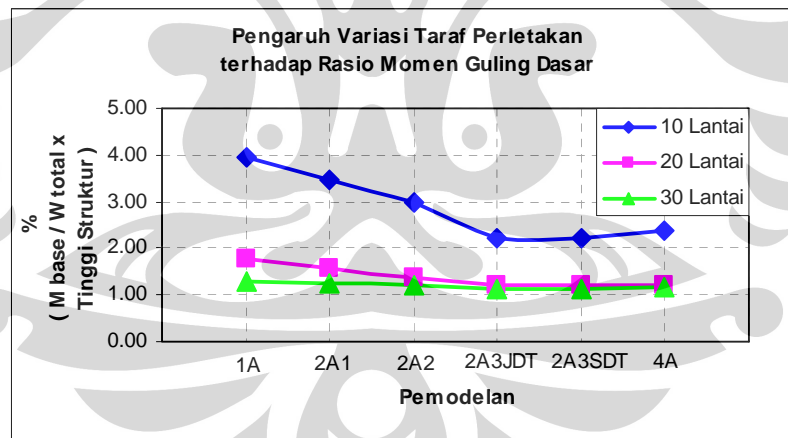
Rasio gaya geser dasar yang nampak pada grafik di bawah ini (grafik 5.17) menggambarkan rasio dari berat struktur yang menjadi gaya inersia gempa. Dari grafik dapat dilihat bahwa semakin rendah bangunan maka semakin besar persentase dari berat struktur yang menjadi gaya inersia gempa, demikian pula sebaliknya bahwa semakin tinggi bangunan semakin kecil persentase dari berat struktur yang menjadi gaya inersia gempa. Terlihat pula bahwa semakin tinggi bangunan, maka selisih persentase antar pemodelan dalam satu jumlah lantai tertentu semakin kecil. Hal itu disebabkan semakin tinggi struktur atas, maka kekakuan relatifnya terhadap struktur bawah (basement dan tanah) semakin kecil, sehingga pemodelannya makin menyerupai jepit di taraf lantai dasarnya. Rasio momen guling dasar berbanding lurus dengan rasio gaya geser dasar, sehingga makin tinggi bangunan semakin kecil pula rasionya.

Dari grafik terlihat bahwa untuk rasio gaya geser dasar, rasio untuk kasus statik lebih besar daripada rasio kasus dinamik. Terlihat bahwa rasio kasus statik terbesar terdapat pada pemodelan 10 lantai, memiliki perbedaan yang cukup jauh jika dibandingkan pada kasus statik untuk 20 dan 30 lantai. Hal ini menunjukkan perhitungan dengan statik ekuivalen pada bangunan yang lebih rendah menghasilkan gaya gempa pada struktur yang relatif besar perbedaannya dibandingkan dengan analisa dinamik. Akan tetapi dapat terlihat dari grafik kalau

pada kasus bangunan 30 lantai, analisa statik ekivalen memiliki besar gaya gempa yang hampir sama dengan analisa dinamik.



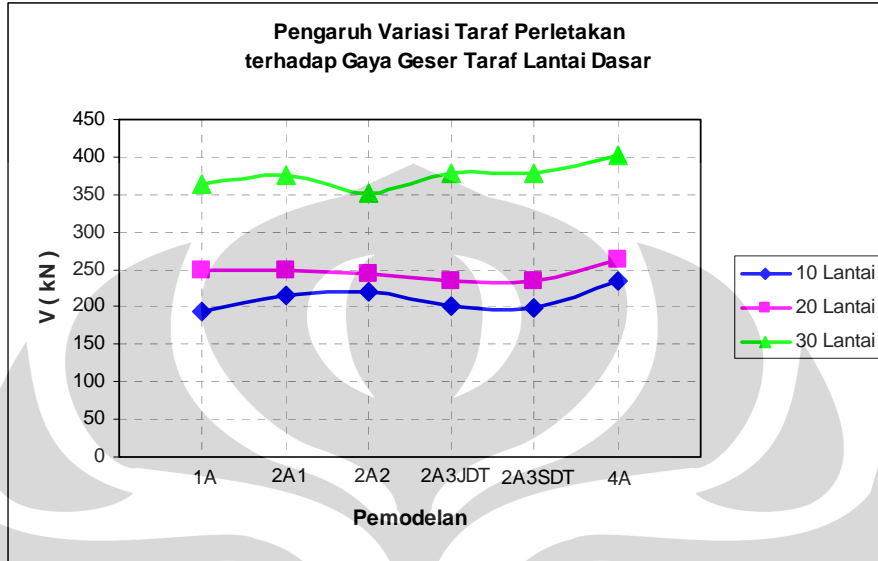
Grafik 5.32. Variasi taraf perletakan terhadap rasio gaya geser dasar



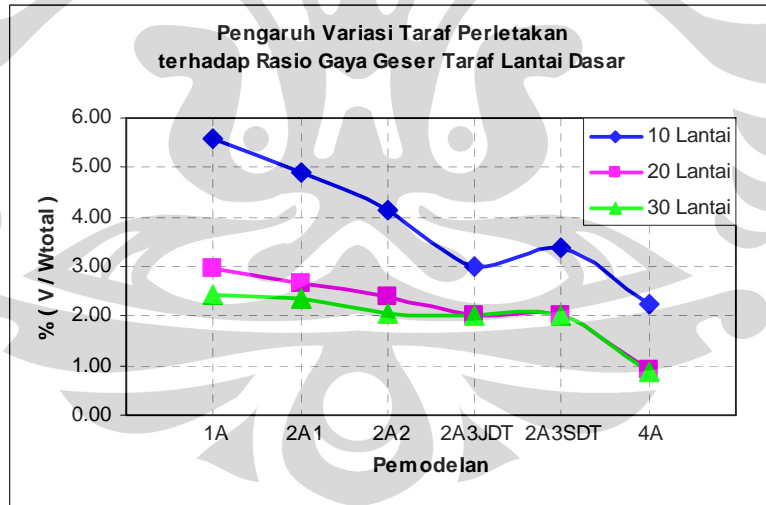
Grafik 5.33. Variasi taraf perletakan terhadap rasio momen guling dasar

Nilai gaya geser pada taraf lantai dasar, sekalipun nilainya relatif sama untuk pemodelan dengan suatu jumlah lantai tertentu, tetapi tidak membentuk pola grafik yang sama antara struktur dengan jumlah lantai 10, 20, dan 30 lantai (grafik 5.19). Akan tetapi rasio gaya geser pada taraf lantai dasar membentuk

suatu pola yaitu rasio semakin kecil mulai dari pemodelan 1A sampai 4A, dan semakin tinggi jumlah lantai semakin kecil pula rasionya (grafik 5.20).



Grafik 5.34. Variasi taraf perletakan terhadap gaya geser taraf lantai dasar

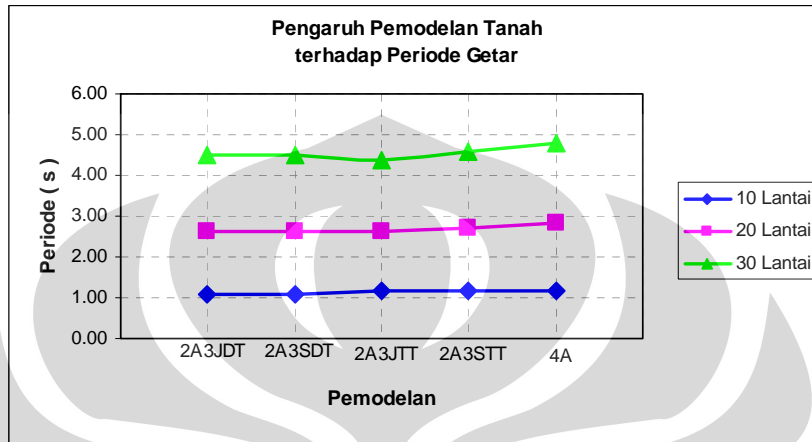


Grafik 5.35. Variasi taraf perletakan terhadap rasio gaya geser taraf lantai dasar

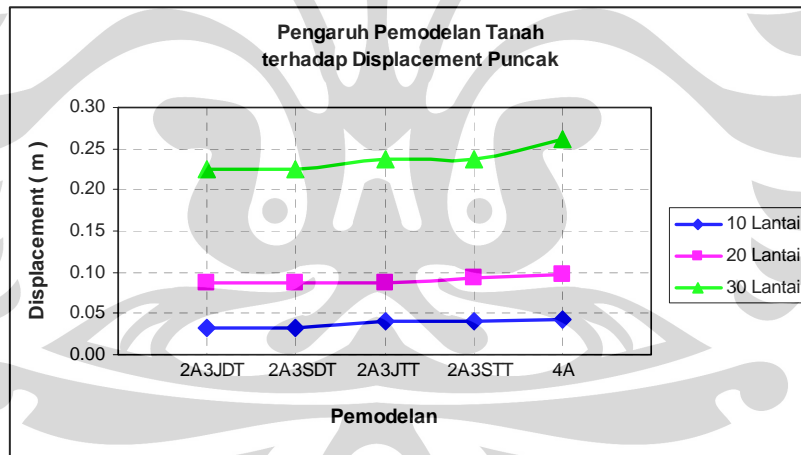
5.3.2. Pengaruh Pemodelan Tanah terhadap Respon Struktur

Pemodelan tanah pada dinding besemen menyebabkan periode getar semakin kecil bila dibandingkan dengan struktur tanpa tanah (tanah tidak dimodelkan pada dinding besemen). Dengan demikian pemodelan tanah

menyebabkan struktur secara keseluruhan menjadi lebih kaku, khususnya pada sistem struktur besemen (grafik 5.21.). Berbanding lurus dengan periode, maka displacement puncak struktur juga semakin kecil jika tanah ikut dimodelkan.



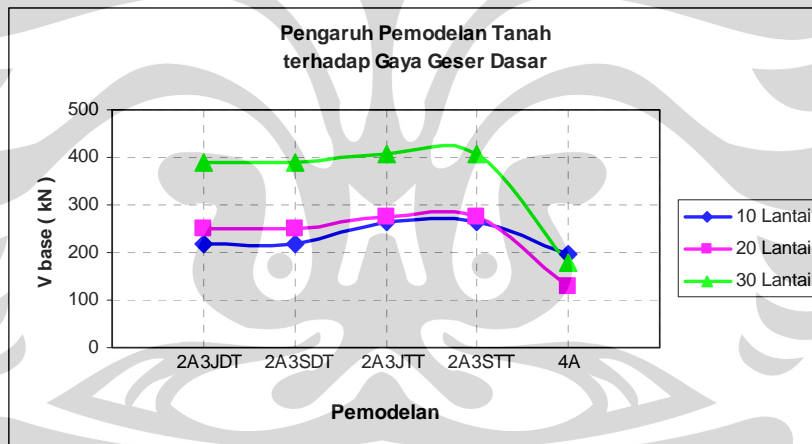
Grafik 5.36. Pemodelan tanah terhadap periode getar



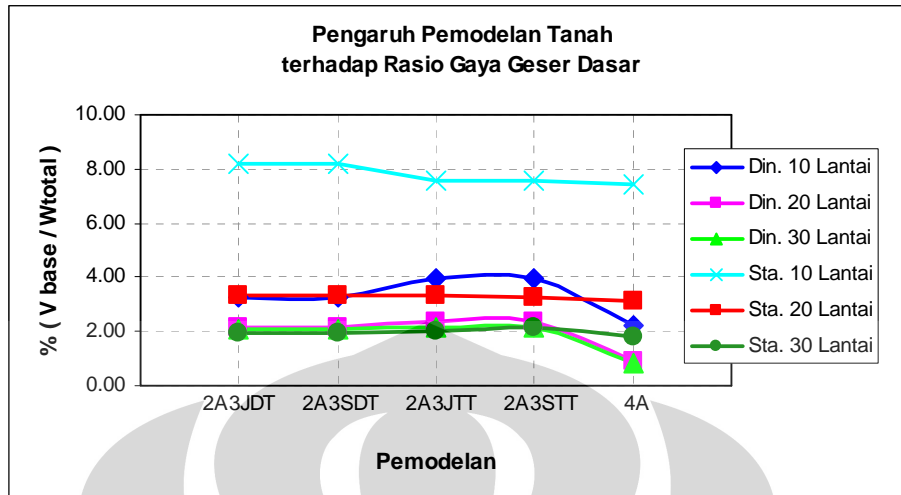
Grafik 5.37. Pemodelan tanah terhadap periode getar

Pada struktur tanpa tanah pada pemodelan 2A3JTT dan 2A3STT, gaya geser dasar yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan struktur dengan tanah dimodelkan pada pemodelan 2A3JDT dan 2A3SDT (grafik 5.23.). Hal ini disebabkan sebagian gaya inersia gempa diserap oleh tanah (dalam bentuk pegas-redaman) dan dinding besemen, sehingga gaya dalam geser yang diterima oleh elemen struktur besemen lainnya menjadi kecil. Rasio gaya geser dasar (grafik

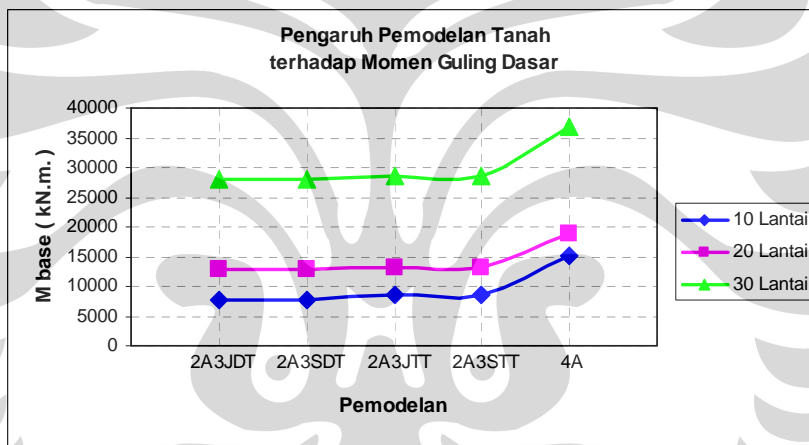
5.24.) menunjukkan persentase berat struktur yang menjadi gaya inersia gempa, dimana dapat dibaca bahwa persentase untuk struktur dengan tanah dimodelkan lebih kecil dibandingkan dengan struktur tanpa tanah. Akan tetapi semakin tinggi bangunan, selisih persentase antar pemodelan untuk suatu jumlah lantai tertentu semakin kecil, artinya persentasenya semakin konstan untuk semua pemodelan. Berbanding lurus dengan gaya geser dasar, maka pemodelan tanah memberikan pengaruh yang sama terhadap momen guling dasar dan rasio momen guling dasar (grafik 5.25 dan grafik 5.26). Jika dibandingkan dengan rasio gaya geser dasar kasus statik, maka dapat terlihat untuk bangunan relatif rendah, analisa statik ekuivalen menyebabkan struktur menerima gaya gempa lebih besar dibandingkan dengan analisa dinamik. Akan tetapi pada bangunan yang relatif lebih tinggi memberikan hasil kebalikannya, hasil analisa dinamik lebih tinggi dibandingkan analisa statik ekuivalen.



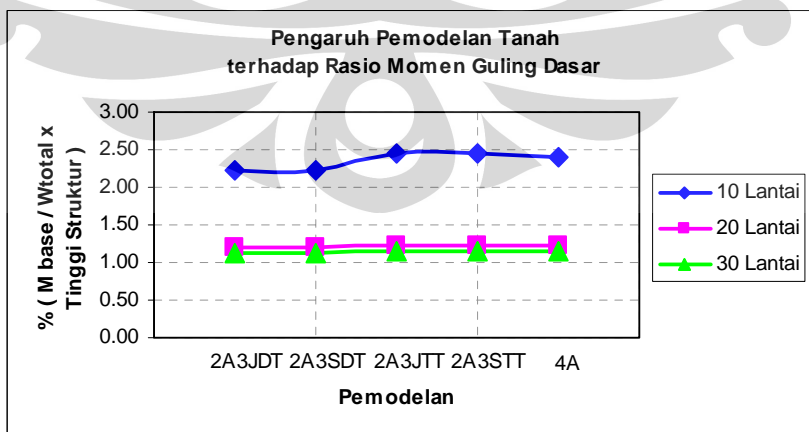
Grafik 5.38. Pemodelan tanah terhadap gaya geser dasar



Grafik 5.39. Pemodelan tanah terhadap rasio gaya geser dasar

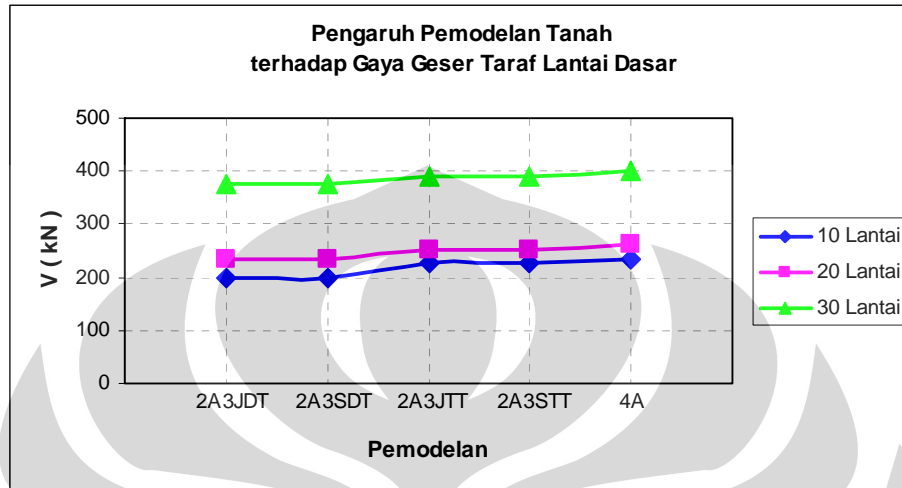


Grafik 5.40. Pemodelan tanah terhadap momen guling dasar

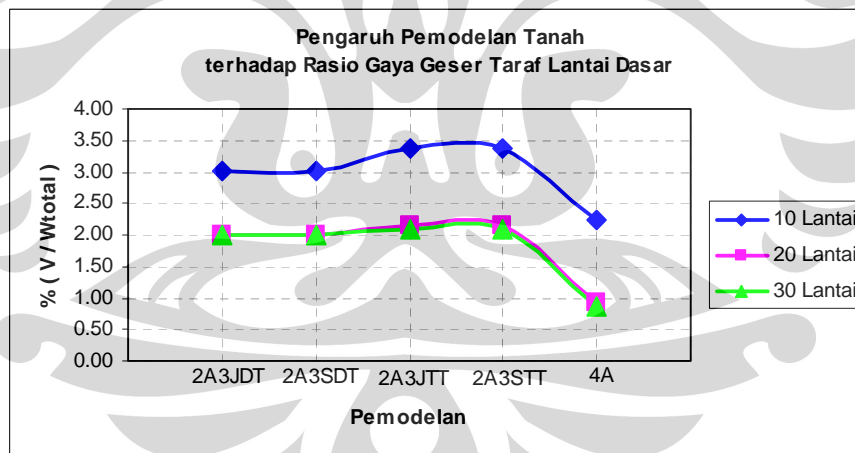


Grafik 5.41. Pemodelan tanah terhadap rasio momen guling dasar

Seperti pada gaya geser dasar, pemodelan tanah memperkecil gaya geser pada taraf lantai dasar pula, demikian pula dengan persentase terhadap berat totalnya.



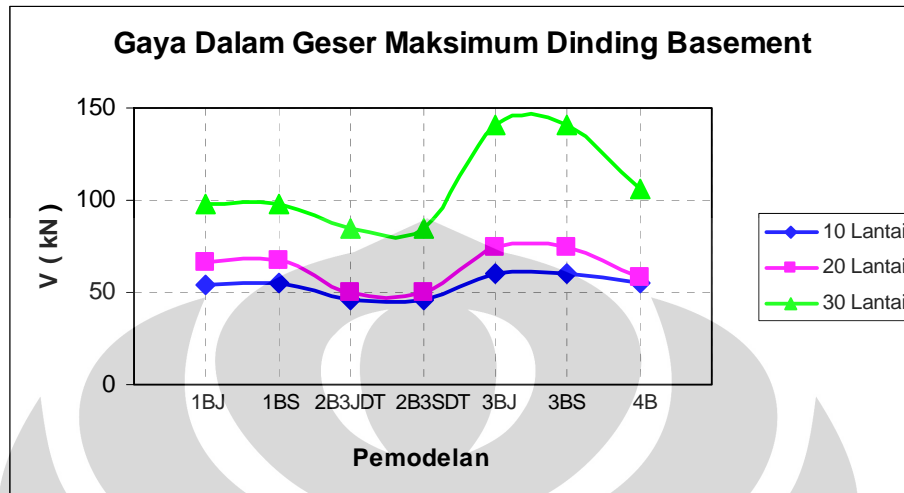
Grafik 5.42. Pemodelan tanah terhadap gaya geser pada taraf dasar



Grafik 5.43. Pemodelan tanah terhadap rasio gaya geser pada taraf dasar

Pemodelan tanah terhadap gaya geser maksimum untuk masing-masing pada dinding besemen dapat dilihat pada grafik berikut. Gaya geser maksimum dihasilkan oleh pemodelan 3BJ dan 3BS, yaitu gempa dimodelkan sebagai tekanan tanah. Gaya geser terkecil dihasilkan oleh pemodelan 2B3JDT dan

2B3SDT dimana struktur dimodelkan sampai pada basement 3 dengan tanah (pegas-redaman) di dinding besemen.



Grafik 5.44. Pemodelan tanah terhadap gaya geser maksimum dinding besemen

BAB VI

KESIMPULAN

Berdasarkan pemodelan yang telah dilakukan, dimana terdapat variasi taraf penjepitan, pemodelan tanah, dan jumlah lantai struktur, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Semakin ke bawah taraf perletakkannya, maka :
 - Periode getarnya semakin besar, demikian pula dengan displacement puncaknya
 - Nilai gaya geser dan momen guling dasar untuk pemodelan 1A sampai pemodelan 2A3SDT relative sama. Akan tetapi untuk pemodelan 4A memiliki nilai gaya geser dan momen guling dasar relatif jauh lebih besar daripada pemodelan lainnya. Akan tetapi, rasio gaya geser dan momen guling dasar semakin turun nilainya. Hal ini juga menyimpulkan semakin fleksibel struktur maka semakin kecil persentase berat struktur yang menjadi gaya inersia gempa
 - Nilai gaya geser pada taraf lantai maksimum dihasilkan oleh pemodelan 4A, tetapi secara umum relatif sama.
2. Pemodelan tanah seperti pada model 2A3JDT dan 2A3SDT jika dibandingkan dengan struktur tanpa tanah seperti pada 2A3JTT dan 2A3STT menyebabkan :
 - Periode getarnya semakin kecil, demikian pula dengan displacement puncaknya
 - Nilai gaya geser dan momen guling dasar semakin turun, karena sebagian gaya inersia gempa diserap oleh tanah
3. Semakin tinggi bangunan, efek dari pemodelan tanah semakin kecil terhadap respon struktur. Dapat dikatakan, semakin kecil nilai kekakuan relatif struktur

atas terhadap sistem struktur bawah (besemen dan tanah), maka pemodelan tanah memberikan efek yang semakin kecil pula terhadap respon struktur.

4. Pemisahan analisa struktur atas dengan besemen (model 1BJ, 1BS, 3BJ, dan 3BS) memberikan respon gaya geser pada dinding besemen yang lebih besar jika dibandingkan dengan analisa struktur atas dan besemen jadi satu (model 2A3JDT, 2A3SDT, dan 4B)

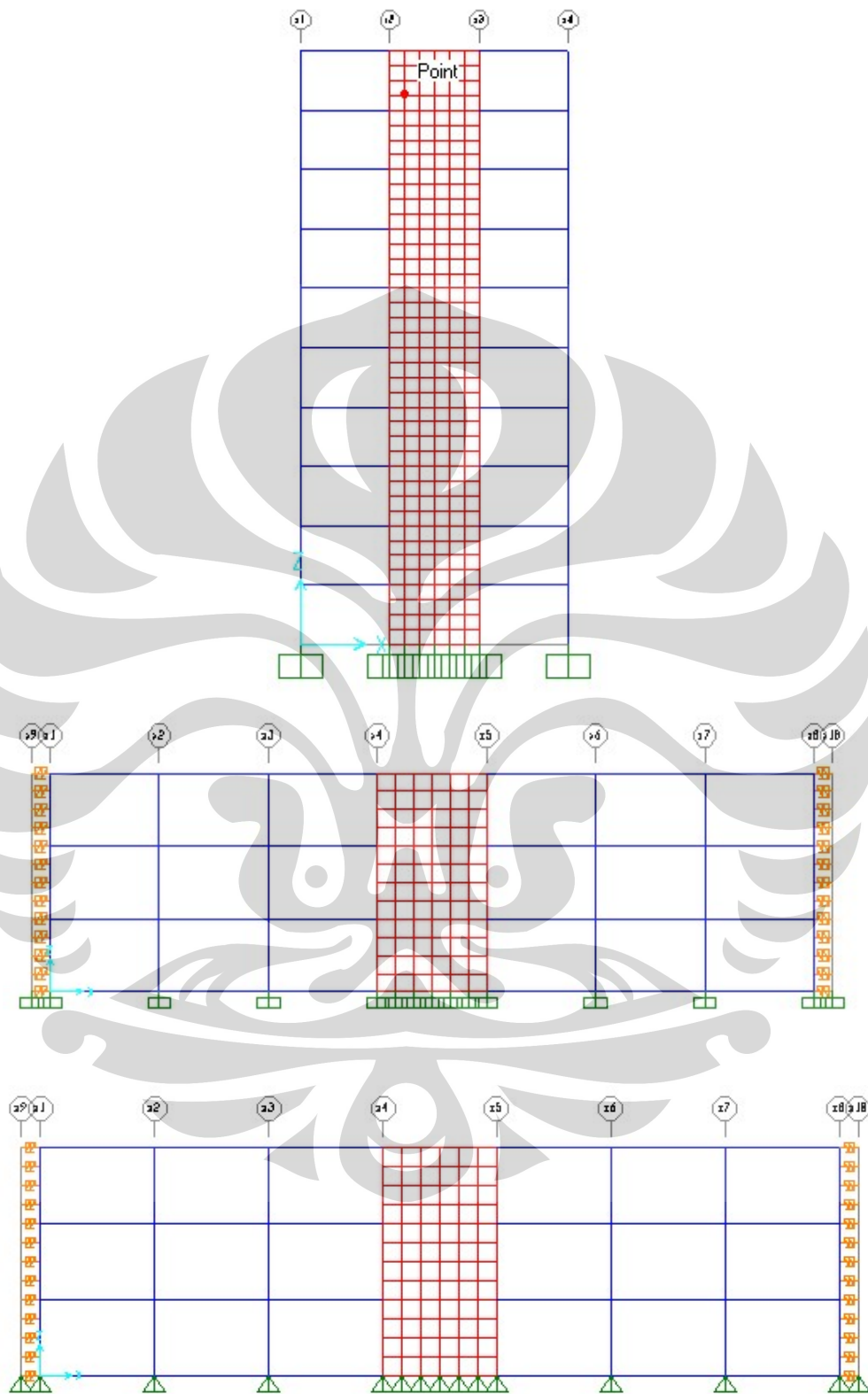


DAFTAR PUSTAKA

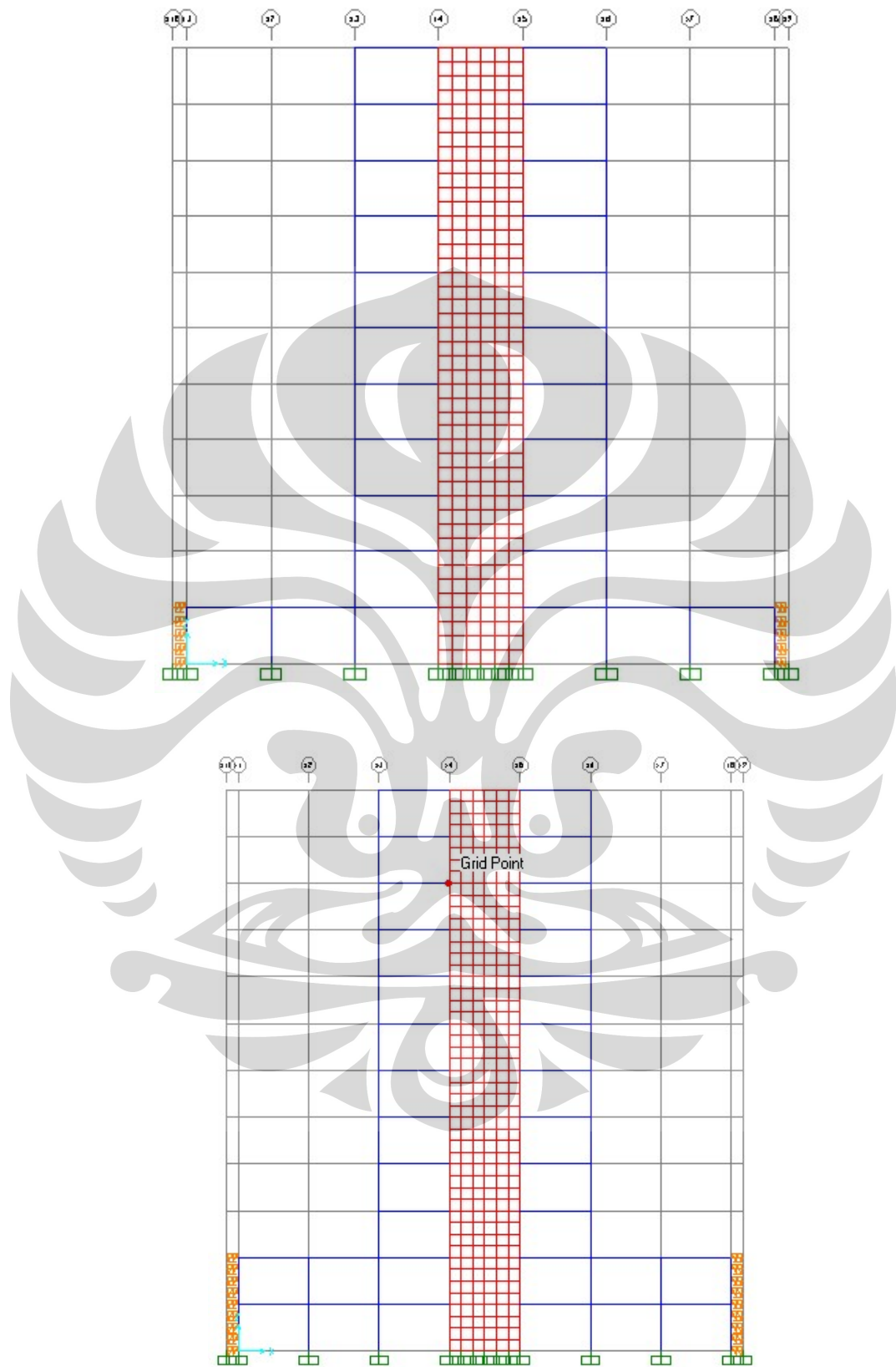
- [1] Bowles, Joseph E. 1990. *Foundation Analysis and Design*. New York : McGraw Hill
- [2] Chopra, Anil K. 1995. *Dynamics of Structure*. New Jersey : Prentice Hall.
- [3] Clough, Ray W. dan Penzien J. 1993. *Dynamics of Structure*. Singapore : McGraw
- [4] Cook, Robert D, David s. Malkus, dan Michael E. Plesha. 1989. *Concept and Application of Finite Element analysis*. Canada : Hamilton.
- [5] Hardy. *Dynamic Finite Element Theory*. www.ic.ac.uk
- [6] Kassegne, Sam. *Basics of Computer Assisted Analysis of Building and Industrial Structures*. www.pdhonline.org/cgi-bin
- [7] Katili, Irwan. 2000. *Aplikasi Metode Elemen Hingga pada Pelat Lentur*. Jakarta : FTUI.
- [8] Wolf, John P. 2000. *Soil Structure Interaction*. Prentice Hall.
- [9] Das, Braja M. 1985. *Soil Dynamics*. PWS Publisher.

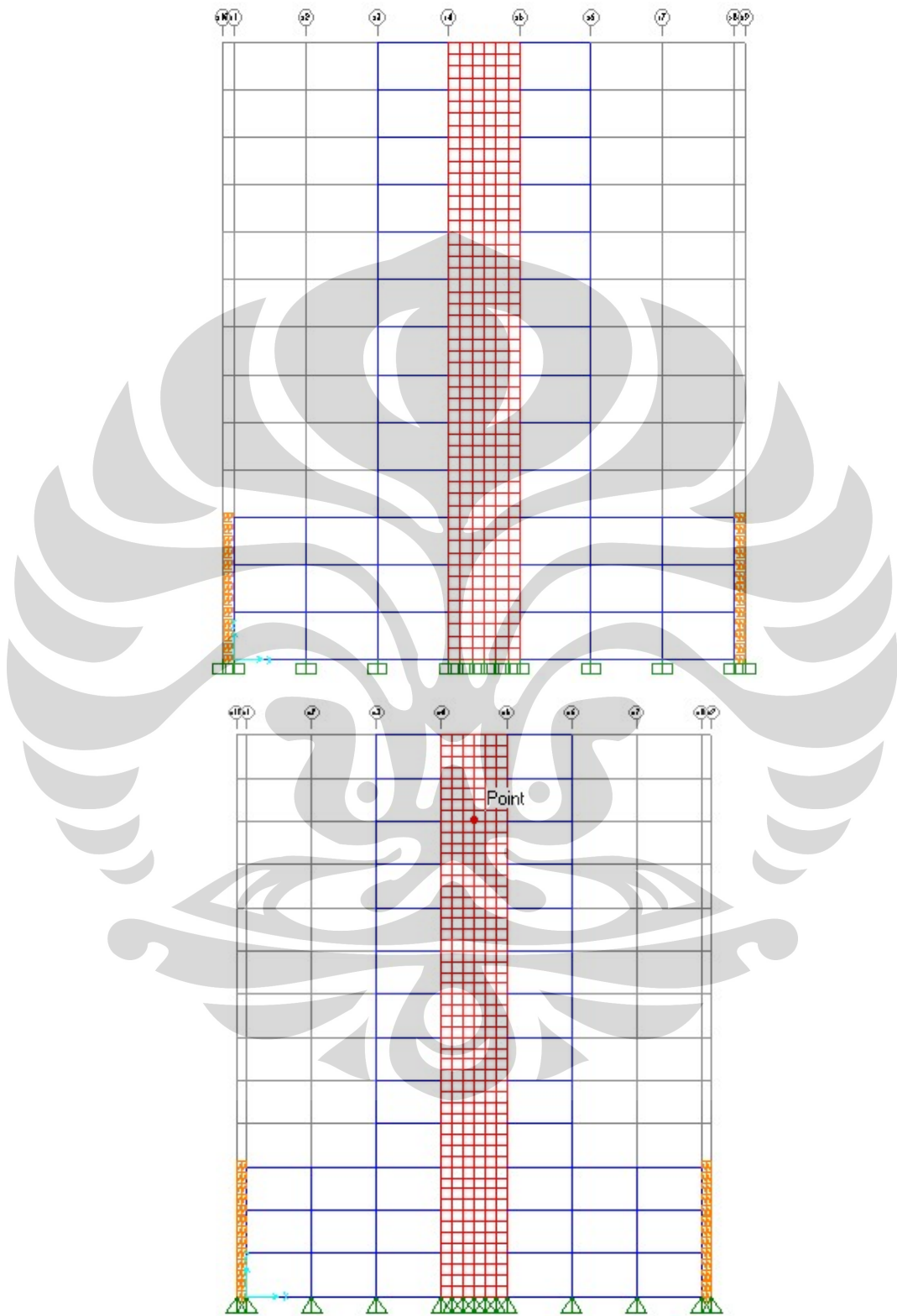
LAMPIRAN A
Pemodelan Sistem Struktur Tipikal pada Software SAP

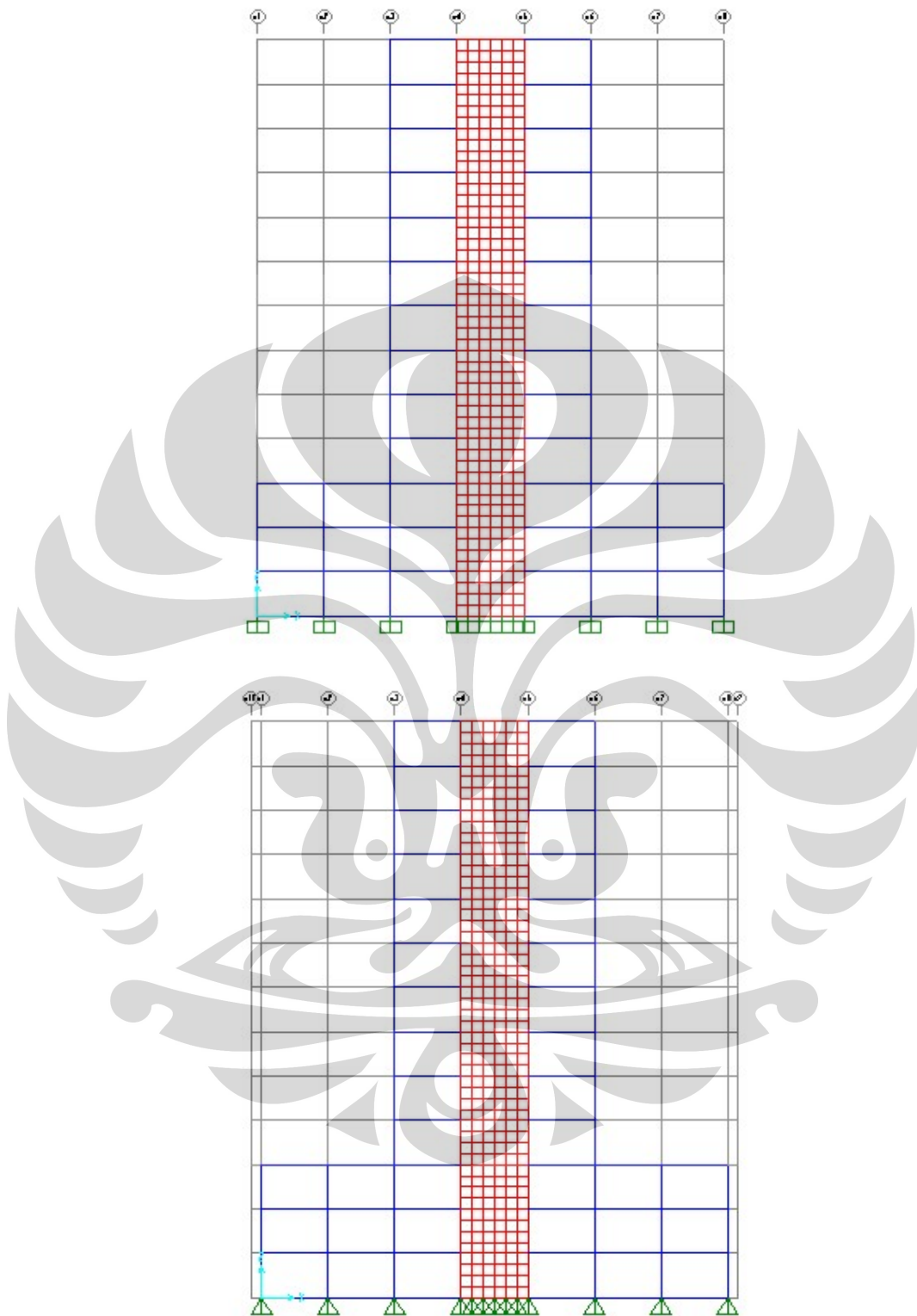




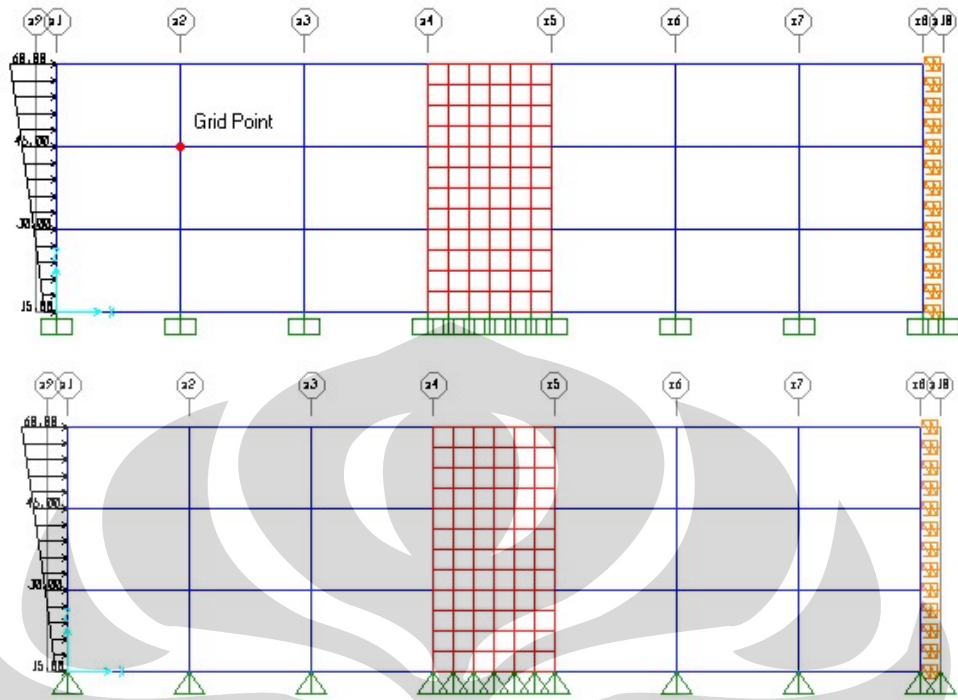
Gambar 1.1. Struktur atas jepit pada taraf lantai dasar (1A, 1BJ, 1BS)



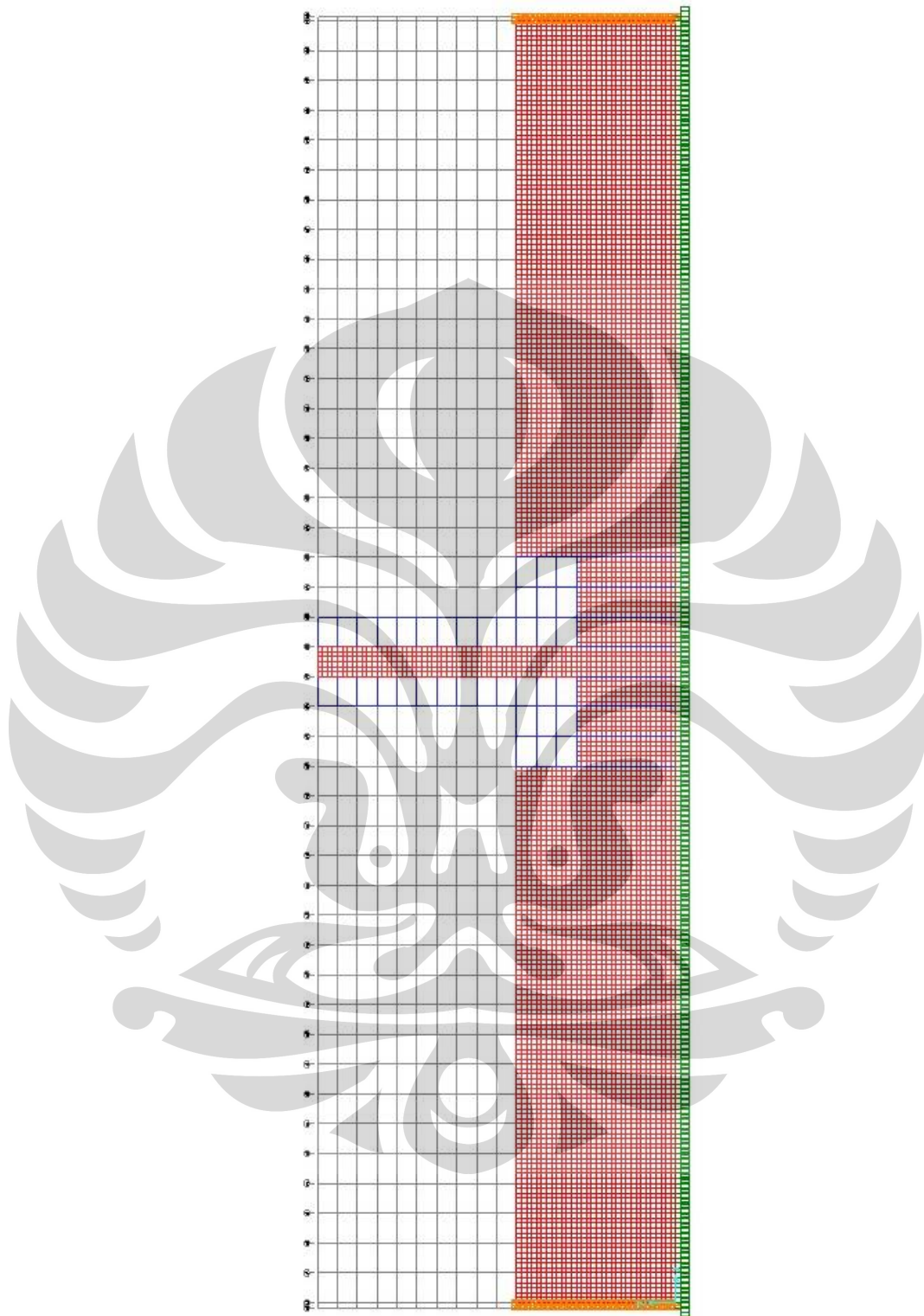




Gambar 1.2. Taraf penjepitan pada basement 1, 2, dan 3 (2A1, 2A2, 2A3JDT, 2A3SDT, 2A3JTT, 2A3STT)



Gambar 1.3. Basemen dengan gempa dalam bentuk tekanan tanah (3BJ, 3BS)



Gambar 1.4. Struktur dan tanah dimodelkan secara keseluruhan (4A)

LAMPIRAN B
Output Pemodelan 10 Lantai



Tabel B.1. Partisipasi Massa Modal

| Model 1A | | | |
|----------|-------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 0.768 | 0.632 | 0.632 |
| 2 | 0.154 | 0.202 | 0.834 |
| 3 | 0.065 | 0.000 | 0.834 |
| 4 | 0.064 | 0.002 | 0.836 |
| 5 | 0.063 | 0.071 | 0.906 |
| 6 | 0.063 | 0.000 | 0.906 |
| 7 | 0.037 | 0.037 | 0.943 |
| 8 | 0.025 | 0.020 | 0.963 |
| 9 | 0.025 | 0.001 | 0.964 |
| 10 | 0.025 | 0.000 | 0.964 |

| Model 2A1 | | | |
|-----------|-------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 0.897 | 0.566 | 0.566 |
| 2 | 0.181 | 0.191 | 0.756 |
| 3 | 0.074 | 0.089 | 0.845 |
| 4 | 0.070 | 0.000 | 0.845 |
| 5 | 0.069 | 0.000 | 0.845 |
| 6 | 0.068 | 0.000 | 0.845 |
| 7 | 0.044 | 0.067 | 0.912 |
| 8 | 0.031 | 0.044 | 0.956 |
| 9 | 0.027 | 0.000 | 0.956 |
| 10 | 0.027 | 0.000 | 0.956 |

| Model 2A2 | | | |
|-----------|-------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 1.011 | 0.514 | 0.514 |
| 2 | 0.208 | 0.200 | 0.714 |
| 3 | 0.088 | 0.124 | 0.839 |
| 4 | 0.076 | 0.000 | 0.839 |
| 5 | 0.073 | 0.000 | 0.839 |
| 6 | 0.072 | 0.000 | 0.839 |
| 7 | 0.053 | 0.076 | 0.915 |
| 8 | 0.036 | 0.032 | 0.947 |
| 9 | 0.029 | 0.000 | 0.947 |
| 10 | 0.029 | 0.000 | 0.947 |

| Model 2A3JDT | | | |
|--------------|-------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 1.076 | 0.468 | 0.468 |
| 2 | 0.229 | 0.218 | 0.686 |
| 3 | 0.103 | 0.154 | 0.840 |
| 4 | 0.082 | 0.000 | 0.840 |
| 5 | 0.078 | 0.000 | 0.840 |
| 6 | 0.077 | 0.000 | 0.840 |
| 7 | 0.062 | 0.068 | 0.908 |
| 8 | 0.041 | 0.036 | 0.944 |
| 9 | 0.032 | 0.000 | 0.944 |
| 10 | 0.032 | 0.000 | 0.944 |

| Model 2A3SDT | | | |
|--------------|-------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 1.077 | 0.468 | 0.468 |
| 2 | 0.229 | 0.220 | 0.689 |
| 3 | 0.103 | 0.157 | 0.846 |
| 4 | 0.082 | 0.000 | 0.846 |
| 5 | 0.078 | 0.000 | 0.846 |
| 6 | 0.077 | 0.000 | 0.846 |
| 7 | 0.062 | 0.069 | 0.915 |
| 8 | 0.041 | 0.036 | 0.951 |
| 9 | 0.032 | 0.000 | 0.952 |
| 10 | 0.032 | 0.000 | 0.952 |

| Model 2A3JTT | | | |
|--------------|-------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 1.167 | 0.506 | 0.506 |
| 2 | 0.251 | 0.232 | 0.738 |
| 3 | 0.111 | 0.130 | 0.868 |
| 4 | 0.082 | 0.000 | 0.868 |
| 5 | 0.078 | 0.000 | 0.868 |
| 6 | 0.077 | 0.000 | 0.868 |
| 7 | 0.063 | 0.052 | 0.920 |
| 8 | 0.041 | 0.032 | 0.953 |
| 9 | 0.032 | 0.000 | 0.953 |
| 10 | 0.032 | 0.000 | 0.953 |

| Model 2A3STT | | | |
|--------------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 1.170 | 0.504 | 0.504 |
| 2 | 0.252 | 0.234 | 0.738 |
| 3 | 0.111 | 0.131 | 0.869 |
| 4 | 0.082 | 0.000 | 0.869 |
| 5 | 0.078 | 0.000 | 0.869 |
| 6 | 0.077 | 0.000 | 0.869 |
| 7 | 0.063 | 0.052 | 0.921 |
| 8 | 0.041 | 0.032 | 0.953 |
| 9 | 0.032 | 0.000 | 0.953 |
| 10 | 0.032 | 0.000 | 0.953 |

| Model 4A | | | |
|----------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 1.187 | 0.369 | 0.369 |
| 2 | 0.304 | 0.394 | 0.762 |
| 3 | 0.179 | 0.148 | 0.911 |
| 4 | 0.114 | 0.000 | 0.911 |
| 5 | 0.105 | 0.001 | 0.912 |
| 6 | 0.101 | 0.000 | 0.912 |
| 7 | 0.099 | 0.020 | 0.932 |
| 8 | 0.068 | 0.020 | 0.952 |
| 9 | 0.057 | 0.001 | 0.952 |
| 10 | 0.056 | 0.000 | 0.952 |

Tabel B.2. Periode Getar dan Displacement Struktur Atas

| PERIODE GETAR dan DISPLACEMENT STRUKTUR ATAS | | | | |
|--|--|--|--|--|
| Model | 10 Lantai | | | |
| | T1 (s) | D1 (m) | D2 (m) | D1 - D2 (m) |
| <u>Model 1 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 0.7685 | 0.0197 | 0.0000 | 0.0197 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> <i>Jepit di Basement 3 :</i> - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> <i>Sendi di Basement 3 :</i> - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 0.8973 1.0112 1.0759 1.1665 1.0766 1.1702 | 0.0270 0.0328 0.0329 0.0409 0.0329 0.0410 | 0.0004 0.0015 0.0022 0.0038 0.0022 0.0039 | 0.0266 0.0313 0.0307 0.0370 0.0307 0.0371 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 1.1874 | 0.0424 | 0.0049 | 0.0375 |

Tabel B.3. Massa Total dan Massa Gempa

| Model | 10 Lantai | | | |
|---|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | DL (kN) | LL (kN) | TOTAL (kN) | GEMPA (kN) |
| <u>Model 1 dan 3 :</u> <i>Level Muka Tanah</i> | 3341.28 | 423.00 | 3764.28 | 3468.18 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Basement 1</i> <i>Basement 2</i> <i>Basement 3</i> | 4194.48 5047.68 6270.24 | 639.00 855.00 1287.00 | 4833.48 5902.68 7557.24 | 4386.18 5304.18 6656.34 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur Tanah jadi Satu</i> | 8465.57 | 1285.00 | 9750.57 | 8851.07 |

Tabel B.4. Reaksi Dasar

| BASE REACTION | | |
|--|--|--|
| Model | 10 Lantai | |
| | V (kN) | M (kNm) |
| <u>Model 1 dan 3 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 194.91 | 5496.62 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> <i>Jepit di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> <i>Sendi di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 218.56 230.17 217.93 265.55 217.84 265.55 | 6660.42 7553.41 7716.73 8450.63 7704.32 8450.63 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 196.92 | 15228.87 |

Tabel B.5. Rasio Reaksi Dasar

| RASIO BASE REACTION (%) | | |
|--|--|--|
| Model | 10 Lantai | |
| | V (kN) | M (kNm) |
| <u>Model 1 dan 3 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 5.62 | 3.96 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> <i>Jepit di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> <i>Sendi di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 4.98 4.34 3.27 3.99 3.27 3.99 | 3.45 2.97 2.23 2.44 2.23 2.44 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 2.22 | 2.39 |

Tabel B.6. Nilai dan Rasio Gaya Geser Taraf Lantai Dasar

| NILAI dan RASIO GAYA GESER TARAF LANTAI DASAR | | |
|--|--|--|
| MODEL 10 LANTAI | V (kN) | Rasio (%) |
| <u>Model 1 dan 3 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 194.08 | 5.596 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> <i>Jepit di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> <i>Sendi di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 215.05 219.09 200.16 225.47 199.82 225.32 | 4.903 4.131 3.007 3.387 3.002 3.385 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 196.92 | 2.225 |

Tabel B.7. Rasio Gaya Geser Dasar Statik Ekuivalen

| RASIO GAYA GESER DASAR ANALISA STATIK EKIVALEN | | | |
|--|--|--|--|
| Model | 10 Lantai | | |
| | T1 (s) | C | Rasio (%) |
| <u>Model 1 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 0.7685 | 0.75 | 8.82 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> <i>Jepit di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> <i>Sendi di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 0.8973 1.0112 1.0759 1.1665 1.0766 1.1702 | 0.75 0.74 0.70 0.64 0.70 0.64 | 8.82 8.73 8.20 7.56 8.20 7.54 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 1.1874 | 0.63 | 7.43 |

LAMPIRAN C
Output Pemodelan 20 Lantai



Tabel C.1. Partisipasi Massa Modal

| Model 1A | | | |
|----------|-------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 2.202 | 0.628 | 0.628 |
| 2 | 0.472 | 0.180 | 0.809 |
| 3 | 0.186 | 0.070 | 0.878 |
| 4 | 0.119 | 0.000 | 0.878 |
| 5 | 0.116 | 0.000 | 0.878 |
| 6 | 0.110 | 0.000 | 0.878 |
| 7 | 0.101 | 0.037 | 0.916 |
| 8 | 0.065 | 0.022 | 0.938 |
| 9 | 0.047 | 0.000 | 0.938 |
| 10 | 0.047 | 0.000 | 0.938 |
| 11 | 0.046 | 0.015 | 0.953 |
| 12 | 0.039 | 0.000 | 0.953 |
| 13 | 0.035 | 0.011 | 0.964 |
| 14 | 0.029 | 0.000 | 0.964 |
| 15 | 0.029 | 0.000 | 0.964 |
| 16 | 0.028 | 0.008 | 0.972 |
| 17 | 0.024 | 0.000 | 0.972 |
| 18 | 0.023 | 0.006 | 0.977 |
| 19 | 0.021 | 0.000 | 0.977 |
| 20 | 0.021 | 0.000 | 0.977 |

| Model 2A1 | | | |
|-----------|-------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 2.371 | 0.599 | 0.599 |
| 2 | 0.515 | 0.172 | 0.771 |
| 3 | 0.203 | 0.069 | 0.840 |
| 4 | 0.125 | 0.000 | 0.840 |
| 5 | 0.120 | 0.000 | 0.840 |
| 6 | 0.114 | 0.000 | 0.840 |
| 7 | 0.110 | 0.039 | 0.879 |
| 8 | 0.071 | 0.027 | 0.906 |
| 9 | 0.051 | 0.022 | 0.928 |
| 10 | 0.049 | 0.000 | 0.928 |
| 11 | 0.049 | 0.000 | 0.928 |
| 12 | 0.041 | 0.000 | 0.928 |
| 13 | 0.039 | 0.019 | 0.947 |
| 14 | 0.031 | 0.015 | 0.963 |
| 15 | 0.030 | 0.000 | 0.963 |
| 16 | 0.030 | 0.000 | 0.963 |
| 17 | 0.026 | 0.011 | 0.974 |
| 18 | 0.025 | 0.000 | 0.974 |
| 19 | 0.022 | 0.007 | 0.981 |
| 20 | 0.022 | 0.000 | 0.981 |

| Model 2A2 | | | |
|-----------|-------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 2.519 | 0.569 | 0.569 |
| 2 | 0.554 | 0.167 | 0.736 |
| 3 | 0.220 | 0.074 | 0.810 |
| 4 | 0.130 | 0.000 | 0.810 |
| 5 | 0.125 | 0.003 | 0.813 |
| 6 | 0.120 | 0.047 | 0.859 |
| 7 | 0.118 | 0.000 | 0.859 |
| 8 | 0.078 | 0.040 | 0.899 |
| 9 | 0.056 | 0.031 | 0.930 |
| 10 | 0.052 | 0.000 | 0.930 |
| 11 | 0.051 | 0.000 | 0.930 |
| 12 | 0.043 | 0.020 | 0.950 |
| 13 | 0.043 | 0.000 | 0.950 |
| 14 | 0.034 | 0.012 | 0.963 |
| 15 | 0.032 | 0.000 | 0.963 |
| 16 | 0.032 | 0.000 | 0.963 |
| 17 | 0.028 | 0.008 | 0.971 |
| 18 | 0.026 | 0.000 | 0.971 |
| 19 | 0.024 | 0.006 | 0.977 |
| 20 | 0.023 | 0.000 | 0.977 |

| Model 2A3JDT | | | |
|--------------|-------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 2.621 | 0.537 | 0.537 |
| 2 | 0.583 | 0.165 | 0.702 |
| 3 | 0.234 | 0.084 | 0.786 |
| 4 | 0.136 | 0.000 | 0.786 |
| 5 | 0.131 | 0.045 | 0.831 |
| 6 | 0.129 | 0.019 | 0.850 |
| 7 | 0.123 | 0.000 | 0.850 |
| 8 | 0.086 | 0.050 | 0.900 |
| 9 | 0.062 | 0.030 | 0.930 |
| 10 | 0.054 | 0.000 | 0.930 |
| 11 | 0.054 | 0.000 | 0.930 |
| 12 | 0.047 | 0.017 | 0.947 |
| 13 | 0.045 | 0.000 | 0.947 |
| 14 | 0.037 | 0.013 | 0.960 |
| 15 | 0.033 | 0.000 | 0.960 |
| 16 | 0.033 | 0.000 | 0.960 |
| 17 | 0.031 | 0.011 | 0.971 |
| 18 | 0.027 | 0.000 | 0.971 |
| 19 | 0.026 | 0.008 | 0.979 |
| 20 | 0.024 | 0.000 | 0.979 |

| Model 2A3SDT | | | |
|--------------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 2.622 | 0.537 | 0.537 |
| 2 | 0.583 | 0.165 | 0.703 |
| 3 | 0.235 | 0.084 | 0.787 |
| 4 | 0.136 | 0.000 | 0.787 |
| 5 | 0.131 | 0.048 | 0.835 |
| 6 | 0.129 | 0.017 | 0.852 |
| 7 | 0.123 | 0.000 | 0.852 |
| 8 | 0.086 | 0.051 | 0.903 |
| 9 | 0.062 | 0.030 | 0.933 |
| 10 | 0.054 | 0.000 | 0.933 |
| 11 | 0.054 | 0.000 | 0.933 |
| 12 | 0.047 | 0.018 | 0.951 |
| 13 | 0.045 | 0.000 | 0.951 |
| 14 | 0.037 | 0.013 | 0.963 |
| 15 | 0.033 | 0.000 | 0.963 |
| 16 | 0.033 | 0.000 | 0.963 |
| 17 | 0.031 | 0.011 | 0.974 |
| 18 | 0.027 | 0.000 | 0.974 |
| 19 | 0.026 | 0.008 | 0.982 |
| 20 | 0.024 | 0.000 | 0.982 |

| Model 2A3JTT | | | |
|--------------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 2.708 | 0.552 | 0.552 |
| 2 | 0.606 | 0.170 | 0.723 |
| 3 | 0.244 | 0.086 | 0.809 |
| 4 | 0.136 | 0.059 | 0.868 |
| 5 | 0.136 | 0.000 | 0.868 |
| 6 | 0.129 | 0.002 | 0.870 |
| 7 | 0.123 | 0.000 | 0.870 |
| 8 | 0.088 | 0.042 | 0.912 |
| 9 | 0.063 | 0.023 | 0.935 |
| 10 | 0.054 | 0.000 | 0.935 |
| 11 | 0.054 | 0.000 | 0.935 |
| 12 | 0.047 | 0.014 | 0.950 |
| 13 | 0.045 | 0.000 | 0.950 |
| 14 | 0.037 | 0.011 | 0.961 |
| 15 | 0.033 | 0.000 | 0.961 |
| 16 | 0.033 | 0.000 | 0.961 |
| 17 | 0.031 | 0.010 | 0.971 |
| 18 | 0.027 | 0.000 | 0.971 |
| 19 | 0.026 | 0.008 | 0.979 |
| 20 | 0.024 | 0.000 | 0.979 |

| Model 2A3STT | | | |
|--------------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 2.711 | 0.555 | 0.555 |
| 2 | 0.607 | 0.172 | 0.727 |
| 3 | 0.245 | 0.087 | 0.814 |
| 4 | 0.136 | 0.060 | 0.875 |
| 5 | 0.136 | 0.000 | 0.875 |
| 6 | 0.129 | 0.002 | 0.876 |
| 7 | 0.123 | 0.000 | 0.876 |
| 8 | 0.089 | 0.042 | 0.918 |
| 9 | 0.063 | 0.023 | 0.942 |
| 10 | 0.054 | 0.000 | 0.942 |
| 11 | 0.054 | 0.000 | 0.942 |
| 12 | 0.047 | 0.014 | 0.956 |
| 13 | 0.045 | 0.000 | 0.956 |
| 14 | 0.037 | 0.011 | 0.968 |
| 15 | 0.033 | 0.000 | 0.968 |
| 16 | 0.033 | 0.000 | 0.968 |
| 17 | 0.031 | 0.010 | 0.978 |
| 18 | 0.027 | 0.000 | 0.978 |
| 19 | 0.026 | 0.007 | 0.984 |
| 20 | 0.024 | 0.000 | 0.984 |

| Model 4A | | | |
|----------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 2.815 | 0.458 | 0.458 |
| 2 | 0.643 | 0.180 | 0.638 |
| 3 | 0.292 | 0.204 | 0.841 |
| 4 | 0.194 | 0.093 | 0.935 |
| 5 | 0.174 | 0.000 | 0.935 |
| 6 | 0.154 | 0.000 | 0.935 |
| 7 | 0.144 | 0.000 | 0.935 |
| 8 | 0.124 | 0.015 | 0.950 |
| 9 | 0.086 | 0.008 | 0.958 |
| 10 | 0.068 | 0.009 | 0.967 |
| 11 | 0.065 | 0.000 | 0.967 |
| 12 | 0.065 | 0.002 | 0.969 |
| 13 | 0.058 | 0.002 | 0.972 |
| 14 | 0.057 | 0.000 | 0.972 |
| 15 | 0.056 | 0.000 | 0.972 |
| 16 | 0.055 | 0.003 | 0.974 |
| 17 | 0.055 | 0.000 | 0.974 |
| 18 | 0.049 | 0.001 | 0.975 |
| 19 | 0.046 | 0.000 | 0.975 |
| 20 | 0.046 | 0.000 | 0.975 |

Tabel C.2. Periode Getar dan Displacement Struktur Atas

| PERIODE GETAR dan DISPLACEMENT STRUKTUR ATAS | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|------------------|
| Model | 20 Lantai | | | |
| | T1 (s) | D1 (m) | D2 (m) | D1 - D2 (m) |
| <u>Model 1 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 2.2018 | 0.0744 | 0.0000 | 0.0744 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> | 2.3708 | 0.0802 | 0.0004 | 0.0798 |
| <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> | 2.5188 | 0.0848 | 0.0015 | 0.0833 |
| <i>Jepit di Basement 3 :</i> | | | | |
| <i>- Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> | 2.6207 | 0.0868 | 0.0024 | 0.0843 |
| <i>- Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> | 2.6207 | 0.0868 | 0.0024 | 0.0843 |
| <i>Sendi di Basement 3 :</i> | | | | |
| <i>- Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> | 2.6216 | 0.0868 | 0.0024 | 0.0843 |
| <i>- Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 2.7106 | 0.0925 | 0.0035 | 0.0889 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 2.8154 | 0.0965 | 0.0052 | 0.0913 |

Tabel C.3. Massa Total dan Massa Gempa

| Model | 20 Lantai | | | |
|---|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | DL (kN) | LL (kN) | TOTAL (kN) | GEMPA (kN) |
| <u>Model 1 dan 3 :</u> <i>Level Muka Tanah</i> | 8067.60 | 873.00 | 8940.60 | 8329.50 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Basement 1</i> | 8978.40 | 1089.00 | 10067.40 | 9305.10 |
| <i>Basement 2</i> | 9889.20 | 1305.00 | 11194.20 | 10280.70 |
| <i>Basement 3</i> | 11169.36 | 1737.00 | 12906.36 | 11690.46 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur Tanah jadi Satu</i> | 13370.99 | 1737.00 | 15107.99 | 13892.09 |

Tabel C.4. Reaksi Dasar

| BASE REACTION | | |
|--|-------------|--------------|
| Model | 20 Lantai | |
| | V (kN) | M (kNm) |
| Model 1 dan 3 : <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 247.93 | 11838.77 |
| Model 2 : <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> | 250.62 | 12198.25 |
| <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> | 251.99 | 12570.80 |
| <i>Jepit di Basement 3 :</i> | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> | 248.42 | 12909.79 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> | 275.78 | 13085.36 |
| <i>Sendi di Basement 3 :</i> | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> | 248.48 | 12902.89 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 276.49 | 13080.24 |
| Model 4 : <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 127.20 | 18956.92 |

Tabel C.5. Rasio Reaksi Dasar

| RASIO BASE REACTION (%) | | |
|--|-------------|--------------|
| Model | 20 Lantai | |
| | V (kN) | M (kNm) |
| Model 1 dan 3 : <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 2.98 | 1.78 |
| Model 2 : <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> | 2.69 | 1.56 |
| <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> | 2.45 | 1.39 |
| <i>Jepit di Basement 3 :</i> | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> | 2.12 | 1.20 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> | 2.36 | 1.22 |
| <i>Sendi di Basement 3 :</i> | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> | 2.13 | 1.20 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 2.37 | 1.22 |
| Model 4 : <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 0.92 | 1.22 |

Tabel C.6. Nilai dan Rasio Gaya Geser Taraf Lantai Dasar

| NILAI dan RASIO GAYA GESER TARAF LANTAI DASAR | | |
|--|--|--|
| MODEL 20 LANTAI | V (kN) | Rasio (%) |
| <u>Model 1 dan 3 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 247.93 | 2.977 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> <i>Jepit di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> <i>Sendi di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 248.40 244.11 234.39 250.26 234.12 250.30 | 2.669 2.374 2.005 2.141 2.003 2.141 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 127.20 | 0.916 |

Tabel C.7. Rasio Gaya Geser Dasar Statik Ekuivalen

| RASIO GAYA GESER DASAR ANALISA STATIK EKIVALEN | | | |
|--|--|--|--|
| Model | 20 Lantai | | |
| | T1 (s) | C | Rasio (%) |
| <u>Model 1 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 2.2018 | 0.34 | 4.01 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> <i>Jepit di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> <i>Sendi di Basement 3 :</i> <i>- Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> <i>- Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 2.3708 2.5188 2.6207 2.6207 2.6216 2.7106 | 0.32 0.30 0.29 0.29 0.29 0.28 | 3.72 3.50 3.37 3.37 3.37 3.26 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 2.8154 | 0.27 | 3.13 |

LAMPIRAN D
Output Pemodelan 30 Lantai



Tabel D.1. Partisipasi Massa Modal

| Model 1A | | | |
|----------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 3.988 | 0.633 | 0.633 |
| 2 | 0.929 | 0.171 | 0.804 |
| 3 | 0.372 | 0.067 | 0.871 |
| 4 | 0.200 | 0.035 | 0.907 |
| 5 | 0.168 | 0.000 | 0.907 |
| 6 | 0.153 | 0.000 | 0.907 |
| 7 | 0.145 | 0.000 | 0.907 |
| 8 | 0.125 | 0.022 | 0.928 |
| 9 | 0.087 | 0.015 | 0.944 |
| 10 | 0.067 | 0.000 | 0.944 |
| 11 | 0.066 | 0.000 | 0.944 |
| 12 | 0.065 | 0.010 | 0.954 |
| 13 | 0.056 | 0.000 | 0.954 |
| 14 | 0.051 | 0.008 | 0.962 |
| 15 | 0.041 | 0.006 | 0.969 |
| 16 | 0.041 | 0.000 | 0.969 |
| 17 | 0.041 | 0.000 | 0.969 |
| 18 | 0.034 | 0.005 | 0.974 |
| 19 | 0.034 | 0.000 | 0.974 |
| 20 | 0.029 | 0.000 | 0.974 |
| 21 | 0.029 | 0.000 | 0.974 |
| 22 | 0.029 | 0.004 | 0.978 |
| 23 | 0.025 | 0.003 | 0.981 |
| 24 | 0.024 | 0.000 | 0.981 |
| 25 | 0.023 | 0.000 | 0.981 |
| 26 | 0.023 | 0.000 | 0.981 |
| 27 | 0.022 | 0.003 | 0.984 |
| 28 | 0.020 | 0.002 | 0.986 |
| 29 | 0.019 | 0.000 | 0.986 |
| 30 | 0.019 | 0.000 | 0.986 |

| Model 2A1 | | | |
|-----------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 4.184 | 0.615 | 0.615 |
| 2 | 0.984 | 0.165 | 0.780 |
| 3 | 0.395 | 0.065 | 0.845 |
| 4 | 0.212 | 0.035 | 0.880 |
| 5 | 0.173 | 0.000 | 0.880 |
| 6 | 0.157 | 0.000 | 0.880 |
| 7 | 0.148 | 0.000 | 0.880 |
| 8 | 0.133 | 0.023 | 0.903 |
| 9 | 0.093 | 0.017 | 0.920 |
| 10 | 0.069 | 0.006 | 0.926 |
| 11 | 0.069 | 0.007 | 0.933 |
| 12 | 0.068 | 0.000 | 0.933 |
| 13 | 0.058 | 0.000 | 0.933 |
| 14 | 0.054 | 0.011 | 0.944 |
| 15 | 0.044 | 0.009 | 0.953 |
| 16 | 0.042 | 0.000 | 0.953 |
| 17 | 0.042 | 0.000 | 0.953 |
| 18 | 0.036 | 0.008 | 0.961 |
| 19 | 0.035 | 0.000 | 0.961 |
| 20 | 0.031 | 0.008 | 0.969 |
| 21 | 0.030 | 0.000 | 0.969 |
| 22 | 0.030 | 0.000 | 0.969 |
| 23 | 0.027 | 0.006 | 0.975 |
| 24 | 0.025 | 0.000 | 0.975 |
| 25 | 0.024 | 0.005 | 0.981 |
| 26 | 0.024 | 0.000 | 0.981 |
| 27 | 0.024 | 0.000 | 0.981 |
| 28 | 0.021 | 0.004 | 0.984 |
| 29 | 0.020 | 0.000 | 0.984 |
| 30 | 0.019 | 0.003 | 0.987 |

| Model 2A2 | | | |
|-----------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 4.365 | 0.595 | 0.595 |
| 2 | 1.036 | 0.159 | 0.754 |
| 3 | 0.418 | 0.065 | 0.820 |
| 4 | 0.224 | 0.038 | 0.858 |
| 5 | 0.178 | 0.000 | 0.858 |
| 6 | 0.161 | 0.000 | 0.858 |
| 7 | 0.151 | 0.000 | 0.858 |
| 8 | 0.141 | 0.027 | 0.885 |
| 9 | 0.099 | 0.022 | 0.907 |

| Model 2A3JDT | | | |
|--------------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 4.493 | 0.572 | 0.572 |
| 2 | 1.073 | 0.156 | 0.727 |
| 3 | 0.435 | 0.068 | 0.795 |
| 4 | 0.235 | 0.044 | 0.839 |
| 5 | 0.184 | 0.000 | 0.839 |
| 6 | 0.165 | 0.000 | 0.839 |
| 7 | 0.155 | 0.000 | 0.839 |
| 8 | 0.149 | 0.035 | 0.874 |
| 9 | 0.105 | 0.030 | 0.904 |

| | | | |
|----|-------|-------|-------|
| 10 | 0.073 | 0.019 | 0.926 |
| 11 | 0.071 | 0.000 | 0.926 |
| 12 | 0.071 | 0.000 | 0.926 |
| 13 | 0.060 | 0.000 | 0.926 |
| 14 | 0.058 | 0.016 | 0.942 |
| 15 | 0.047 | 0.013 | 0.955 |
| 16 | 0.043 | 0.000 | 0.955 |
| 17 | 0.043 | 0.000 | 0.955 |
| 18 | 0.039 | 0.009 | 0.964 |
| 19 | 0.036 | 0.000 | 0.964 |
| 20 | 0.033 | 0.007 | 0.971 |
| 21 | 0.031 | 0.000 | 0.971 |
| 22 | 0.031 | 0.000 | 0.971 |
| 23 | 0.029 | 0.005 | 0.975 |
| 24 | 0.026 | 0.000 | 0.975 |
| 25 | 0.025 | 0.004 | 0.979 |
| 26 | 0.024 | 0.000 | 0.979 |
| 27 | 0.024 | 0.000 | 0.979 |
| 28 | 0.023 | 0.003 | 0.982 |
| 29 | 0.020 | 0.003 | 0.985 |
| 30 | 0.020 | 0.000 | 0.985 |

| | | | |
|----|-------|-------|-------|
| 10 | 0.079 | 0.024 | 0.928 |
| 11 | 0.073 | 0.000 | 0.928 |
| 12 | 0.073 | 0.000 | 0.928 |
| 13 | 0.062 | 0.016 | 0.944 |
| 14 | 0.062 | 0.000 | 0.944 |
| 15 | 0.050 | 0.011 | 0.955 |
| 16 | 0.044 | 0.000 | 0.955 |
| 17 | 0.044 | 0.000 | 0.955 |
| 18 | 0.042 | 0.008 | 0.962 |
| 19 | 0.037 | 0.000 | 0.962 |
| 20 | 0.035 | 0.006 | 0.969 |
| 21 | 0.032 | 0.000 | 0.969 |
| 22 | 0.032 | 0.000 | 0.969 |
| 23 | 0.031 | 0.006 | 0.974 |
| 24 | 0.027 | 0.005 | 0.979 |
| 25 | 0.027 | 0.000 | 0.979 |
| 26 | 0.025 | 0.000 | 0.979 |
| 27 | 0.025 | 0.000 | 0.979 |
| 28 | 0.024 | 0.004 | 0.983 |
| 29 | 0.022 | 0.000 | 0.983 |
| 30 | 0.022 | 0.000 | 0.983 |

| Model 2A3SDT | | | |
|--------------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 4.495 | 0.572 | 0.572 |
| 2 | 1.074 | 0.156 | 0.728 |
| 3 | 0.435 | 0.068 | 0.796 |
| 4 | 0.235 | 0.044 | 0.840 |
| 5 | 0.184 | 0.000 | 0.840 |
| 6 | 0.165 | 0.000 | 0.840 |
| 7 | 0.155 | 0.000 | 0.840 |
| 8 | 0.149 | 0.035 | 0.875 |
| 9 | 0.105 | 0.030 | 0.906 |
| 10 | 0.079 | 0.024 | 0.930 |
| 11 | 0.073 | 0.000 | 0.930 |
| 12 | 0.073 | 0.000 | 0.930 |
| 13 | 0.062 | 0.016 | 0.946 |
| 14 | 0.062 | 0.000 | 0.946 |
| 15 | 0.050 | 0.011 | 0.957 |
| 16 | 0.044 | 0.000 | 0.957 |
| 17 | 0.044 | 0.000 | 0.957 |
| 18 | 0.042 | 0.008 | 0.965 |
| 19 | 0.037 | 0.000 | 0.965 |
| 20 | 0.035 | 0.006 | 0.972 |
| 21 | 0.032 | 0.000 | 0.972 |
| 22 | 0.032 | 0.000 | 0.972 |
| 23 | 0.031 | 0.006 | 0.977 |
| 24 | 0.027 | 0.005 | 0.982 |

| Model 2A3JTT | | | |
|--------------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 4.574 | 0.581 | 0.581 |
| 2 | 1.097 | 0.158 | 0.739 |
| 3 | 0.445 | 0.069 | 0.808 |
| 4 | 0.240 | 0.044 | 0.852 |
| 5 | 0.184 | 0.000 | 0.852 |
| 6 | 0.165 | 0.000 | 0.852 |
| 7 | 0.155 | 0.000 | 0.852 |
| 8 | 0.152 | 0.034 | 0.887 |
| 9 | 0.107 | 0.027 | 0.914 |
| 10 | 0.080 | 0.020 | 0.934 |
| 11 | 0.073 | 0.000 | 0.935 |
| 12 | 0.073 | 0.000 | 0.935 |
| 13 | 0.063 | 0.013 | 0.948 |
| 14 | 0.062 | 0.000 | 0.948 |
| 15 | 0.050 | 0.009 | 0.957 |
| 16 | 0.044 | 0.000 | 0.957 |
| 17 | 0.044 | 0.000 | 0.957 |
| 18 | 0.042 | 0.007 | 0.964 |
| 19 | 0.037 | 0.000 | 0.964 |
| 20 | 0.035 | 0.006 | 0.969 |
| 21 | 0.032 | 0.000 | 0.969 |
| 22 | 0.032 | 0.000 | 0.969 |
| 23 | 0.031 | 0.005 | 0.975 |
| 24 | 0.027 | 0.005 | 0.979 |

| | | | |
|----|-------|-------|-------|
| 25 | 0.027 | 0.000 | 0.982 |
| 26 | 0.025 | 0.000 | 0.982 |
| 27 | 0.025 | 0.000 | 0.982 |
| 28 | 0.024 | 0.004 | 0.986 |
| 29 | 0.022 | 0.000 | 0.986 |
| 30 | 0.022 | 0.000 | 0.986 |

| | | | |
|----|-------|-------|-------|
| 25 | 0.027 | 0.000 | 0.979 |
| 26 | 0.025 | 0.000 | 0.979 |
| 27 | 0.025 | 0.000 | 0.979 |
| 28 | 0.024 | 0.004 | 0.983 |
| 29 | 0.022 | 0.000 | 0.983 |
| 30 | 0.022 | 0.000 | 0.983 |

| Model 2A3STT | | | |
|--------------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 4.577 | 0.583 | 0.583 |
| 2 | 1.098 | 0.158 | 0.742 |
| 3 | 0.445 | 0.070 | 0.811 |
| 4 | 0.241 | 0.045 | 0.857 |
| 5 | 0.184 | 0.000 | 0.857 |
| 6 | 0.165 | 0.000 | 0.857 |
| 7 | 0.155 | 0.000 | 0.857 |
| 8 | 0.153 | 0.035 | 0.892 |
| 9 | 0.107 | 0.028 | 0.919 |
| 10 | 0.080 | 0.020 | 0.940 |
| 11 | 0.073 | 0.000 | 0.940 |
| 12 | 0.073 | 0.000 | 0.940 |
| 13 | 0.063 | 0.013 | 0.953 |
| 14 | 0.062 | 0.000 | 0.953 |
| 15 | 0.051 | 0.009 | 0.962 |
| 16 | 0.044 | 0.000 | 0.962 |
| 17 | 0.044 | 0.000 | 0.962 |
| 18 | 0.042 | 0.007 | 0.969 |
| 19 | 0.037 | 0.000 | 0.969 |
| 20 | 0.035 | 0.006 | 0.975 |
| 21 | 0.032 | 0.000 | 0.975 |
| 22 | 0.032 | 0.000 | 0.975 |
| 23 | 0.031 | 0.005 | 0.980 |
| 24 | 0.027 | 0.005 | 0.985 |
| 25 | 0.027 | 0.000 | 0.985 |
| 26 | 0.025 | 0.000 | 0.985 |
| 27 | 0.025 | 0.000 | 0.985 |
| 28 | 0.024 | 0.003 | 0.988 |
| 29 | 0.022 | 0.000 | 0.988 |
| 30 | 0.022 | 0.000 | 0.988 |

| Model 4A | | | |
|----------|---------|-------|--------|
| Mode | T (s) | UX | Sum UX |
| 1 | 4.812 | 0.519 | 0.519 |
| 2 | 1.151 | 0.154 | 0.673 |
| 3 | 0.481 | 0.102 | 0.775 |
| 4 | 0.288 | 0.125 | 0.900 |
| 5 | 0.230 | 0.000 | 0.900 |
| 6 | 0.204 | 0.053 | 0.952 |
| 7 | 0.192 | 0.000 | 0.953 |
| 8 | 0.177 | 0.000 | 0.953 |
| 9 | 0.142 | 0.011 | 0.964 |
| 10 | 0.103 | 0.005 | 0.968 |
| 11 | 0.085 | 0.000 | 0.968 |
| 12 | 0.085 | 0.000 | 0.968 |
| 13 | 0.080 | 0.005 | 0.973 |
| 14 | 0.075 | 0.000 | 0.973 |
| 15 | 0.067 | 0.007 | 0.980 |
| 16 | 0.059 | 0.001 | 0.980 |
| 17 | 0.058 | 0.000 | 0.980 |
| 18 | 0.057 | 0.002 | 0.983 |
| 19 | 0.056 | 0.000 | 0.983 |
| 20 | 0.051 | 0.000 | 0.983 |
| 21 | 0.051 | 0.000 | 0.983 |
| 22 | 0.049 | 0.000 | 0.983 |
| 23 | 0.049 | 0.000 | 0.983 |
| 24 | 0.048 | 0.000 | 0.983 |
| 25 | 0.046 | 0.002 | 0.986 |
| 26 | 0.044 | 0.000 | 0.986 |
| 27 | 0.041 | 0.001 | 0.986 |
| 28 | 0.038 | 0.000 | 0.987 |
| 29 | 0.038 | 0.000 | 0.987 |
| 30 | 0.037 | 0.000 | 0.987 |

Tabel D.2. Periode Getar dan Displacement Struktur Atas

| PERIODE GETAR dan DISPLACEMENT STRUKTUR ATAS | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|----------------|
| Model | 30 Lantai | | | |
| | T1 (s) | D1 (m) | D2 (m) | D1 - D2 (m) |
| <u>Model 1 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 3.9878 | 0.1796 | 0.0000 | 0.1796 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> | 4.1840 | 0.1976 | 0.0006 | 0.1971 |
| <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> | 4.3647 | 0.2145 | 0.0021 | 0.2125 |
| <i>Jepit di Basement 3 :</i> | | | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> | 4.4933 | 0.2259 | 0.0038 | 0.2221 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> | 4.3739 | 0.2363 | 0.0050 | 0.2313 |
| <i>Sendi di Basement 3 :</i> | | | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> | 4.4946 | 0.2260 | 0.0038 | 0.2222 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 4.0562 | 0.1845 | 0.0043 | 0.1802 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 4.8118 | 0.2621 | 0.0087 | 0.2535 |

Tabel D.3. Massa Total dan Massa Gempa

| Model | 30 Lantai | | | |
|---|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | DL (kN) | LL (kN) | TOTAL (kN) | GEMPA (kN) |
| <u>Model 1 dan 3 :</u> <i>Level Muka Tanah</i> | 14558.40 | 1323.00 | 15881.40 | 14955.30 |
| <u>Model 2 :</u> | | | | |
| <i>Basement 1</i> | 15624.72 | 1539.00 | 17163.72 | 16086.42 |
| <i>Basement 2</i> | 16691.04 | 1755.00 | 18446.04 | 17217.54 |
| <i>Basement 3</i> | 18126.72 | 2187.00 | 20313.72 | 18782.82 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur Tanah jadi Satu</i> | 20328.35 | 2187.00 | 22515.35 | 20984.45 |

Tabel D.4. Reaksi Dasar

| BASE REACTION | | |
|--|-------------|--------------|
| Model | 30 Lantai | |
| | V (kN) | M (kNm) |
| Model 1 dan 3 : <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 364.94 | 23325.71 |
| Model 2 : <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> | 378.48 | 24988.70 |
| <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> | 387.19 | 26609.13 |
| <i>Jepit di Basement 3 :</i> | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> | 389.58 | 28033.61 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> | 407.78 | 28528.51 |
| <i>Sendi di Basement 3 :</i> | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> | 389.69 | 28032.85 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 408.46 | 28540.24 |
| Model 4 : <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 180.35 | 36828.33 |

Tabel D.5. Rasio Reaksi Dasar

| RASIO BASE REACTION (%) | | |
|--|-------------|--------------|
| Model | 30 Lantai | |
| | V (kN) | M (kNm) |
| Model 1 dan 3 : <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 2.44 | 1.30 |
| Model 2 : <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> | 2.35 | 1.25 |
| <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> | 2.25 | 1.21 |
| <i>Jepit di Basement 3 :</i> | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> | 2.07 | 1.13 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> | 2.17 | 1.15 |
| <i>Sendi di Basement 3 :</i> | | |
| - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> | 2.07 | 1.13 |
| - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 2.17 | 1.15 |
| Model 4 : <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 0.86 | 1.15 |

Tabel D.6. Nilai dan Rasio Gaya Geser Taraf Lantai Dasar

| NILAI dan RASIO GAYA GESER TARAF LANTAI DASAR | | |
|--|--|--|
| MODEL 30 LANTAI | V (kN) | Rasio (%) |
| <u>Model 1 dan 3 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 364.94 | 2.440 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> <i>Jepit di Basement 3 :</i> - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> <i>Sendi di Basement 3 :</i> - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 376.87 352.84 377.63 389.84 377.56 390.18 | 2.343 2.049 2.011 2.076 2.010 2.077 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 180.35 | 0.859 |

Tabel D.7. Rasio Gaya Geser Dasar Statik Ekuivalen

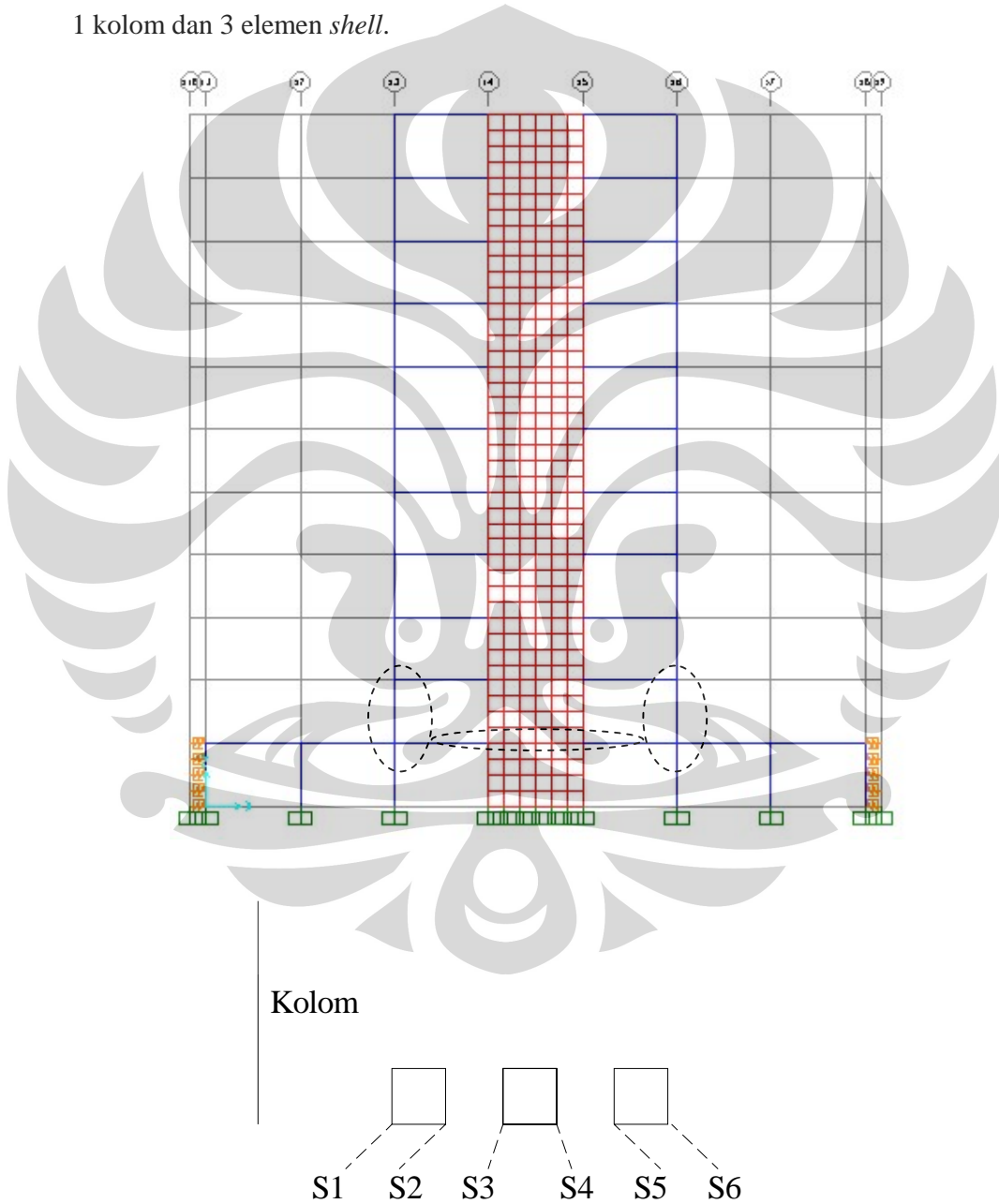
| RASIO GAYA GESER DASAR ANALISA STATIK EKIVALEN | | | |
|--|--|--|--|
| Model | 30 Lantai | | |
| | T1 (s) | C | Rasio (%) |
| <u>Model 1 :</u> <i>Jepit di Level Muka Tanah (1A)</i> | 3.9878 | 0.19 | 2.21 |
| <u>Model 2 :</u> <i>Jepit di Basement 1 (2A1)</i> <i>Jepit di Basement 2 (2A2)</i> <i>Jepit di Basement 3 :</i> - <i>Tanah Dimodelkan (2A3JDT)</i> - <i>Tanpa Tanah (2A3JTT)</i> <i>Sendi di Basement 3 :</i> - <i>Tanah Dimodelkan (2A3SDT)</i> - <i>Tanpa Tanah (2A3STT)</i> | 4.1840 4.3647 4.4933 4.3739 4.4946 4.0562 | 0.18 0.17 0.17 0.17 0.17 0.18 | 2.11 2.02 1.96 2.02 1.96 2.18 |
| <u>Model 4 :</u> <i>Struktur - Tanah jadi Satu (4A)</i> | 4.8118 | 0.16 | 1.83 |

LAMPIRAN E

Contoh Perhitungan Gaya Geser Tingkat



Sebagai contoh, ditinjau pemodelan 2A1 dari struktur 10 lantai. Perhatikan gambar di bawah ini, respon gaya geser taraf lantai dasar ditinjau berdasarkan gaya dalam geser akibat beban gempa pada elemen struktur yang ditandai di bawah ini, terdiri atas 2 kolom dan 6 elemen *shell* pada lantai dasar. Karena gaya dalam geser akibat beban gempa sifatnya simetris, maka yang perlu ditinjau hanya 1 kolom dan 3 elemen *shell*.



Gaya dalam yang ditinjau yaitu gaya dalam geser dari kolom, dan gaya dalam F1 (*element joint force*) dari join elemen *shell* seperti terlihat pada gambar. Langkah-langkah penyusunan gaya geser tingkat sebagai berikut :

1. *Run* di SAP untuk menghasilkan output gaya dalam geser akibat beban gempa, dimana analisa gempa dilakukan dengan menggunakan jumlah mode berturut-turut 1 mode, 2 mode, 3 mode, sampai jumlah mode dimana respon tidak terlalu banyak berubah, maka didapatkan tabel sebagai berikut :

| Jumlah Mode | Kolom (V) | s1 (F1) | s2 (F1) | s3 (F1) | s4 (F1) | s5 (F1) | s6 (F1) |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 6.304 | 56.198 | 11.934 | 47.806 | 19.203 | 13.225 | 10.694 |
| 2 | 6.341 | 56.51 | 11.962 | 48.318 | 19.438 | 14.693 | 12.221 |
| 3 | 6.341 | 56.515 | 11.968 | 48.334 | 19.468 | 14.776 | 12.314 |
| 4 | 6.341 | 56.515 | 11.968 | 48.334 | 19.468 | 14.776 | 12.314 |
| 7 | 6.341 | 56.515 | 11.97 | 48.335 | 19.474 | 14.785 | 12.326 |

2. Dengan menggunakan persamaan $V_i = \sqrt{\sum_{x=1}^n (V_{ix})^2}$, maka didapatkan nilai gaya dalam geser akibat beban gempa akibat mode 1, mode 2, dan mode selanjutnya, seperti tampak pada tabel di bawah ini.

| Jumlah Mode | Kolom (V) | s1 (F1) | s2 (F1) | s3 (F1) | s4 (F1) | s5 (F1) | s6 (F1) |
|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 6.304 | 56.198 | -11.934 | 47.806 | -19.203 | 13.225 | 10.694 |
| 2 | 0.684 | 5.930 | 0.818 | 7.015 | 3.013 | 6.402 | 5.915 |
| 3 | 0.000 | 0.752 | 0.379 | 1.244 | 1.080 | 1.564 | 1.511 |
| 4 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 7 | 0.000 | 0.000 | 0.219 | 0.311 | 0.483 | 0.516 | 0.544 |

3. Dengan menggunakan persamaan

$$V_{tingkat} = \sqrt{\left(\sum_{i=A}^C V_{i1}\right)^2 + \left(\sum_{i=A}^C V_{i2}\right)^2 + \left(\sum_{i=A}^C V_{i3}\right)^2 + \dots + \left(\sum_{i=A}^C V_{in}\right)^2}$$

maka didapatkan gaya geser tingkat.