

STUDI PARAMETRIK DENGAN RESPONS SPEKTRUM TERHADAP DEFORMASI DINDING DIAFRAGMA PADA BASEMENT DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Kenny Erick¹ dan Alfred J. Susilo²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
kenny.325180067@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
alfred@ft.untar.ac.id

Masuk: 01-02-2022, revisi: 07-02-2022, diterima untuk diterbitkan: 08-03-2022

ABSTRACT

There are various dynamic loads acting on basement structure of building, for example earthquake load. It can be influenced by many parameters, both structural and soil parameters. Therefore, the effect of variation of the structural and soil parameter values on the response of basement structure due to earthquake load will be analyzed. Thus, it can be seen the influence of studied parameters on the response of the basement. The deformation of diaphragm wall will be the focus in this study. This research will be using Midas GTS NX program in modelling the basement structure of the building and the surrounding soil using the finite element method. The analyzed basement structure consists of flat slab, diaphragm wall, king post, raft, and pile foundation. Earthquake load will be analyzed using the response spectrum method based on data of Jakarta. From the analysis, it is found that the parameters that affect the deformation of the diaphragm wall are the soil's modulus of elasticity, soil's density, soil's poisson ratio, diaphragm wall's thickness and concrete's quality of diaphragm wall. Soil's modulus of elasticity has greatest influence on deformation changes, which is 30,29%, while concrete's quality of diaphragm wall has smallest influence, which is 0,027%.

Keywords: basement, diaphragm wall, earthquake, response spectrum, finite element method

ABSTRAK

Terdapat berbagai macam beban dinamik yang bekerja pada struktur *basement* sebuah bangunan, misalnya adalah beban gempa. Respons struktur akibat beban gempa tersebut dapat dipengaruhi oleh banyak parameter, baik parameter struktural maupun parameter dari tanah. Maka, pada penelitian ini akan dianalisis efek variasi nilai parameter struktur dan tanah terhadap respons dari struktur *basement* akibat beban gempa. Dengan demikian, dapat diketahui pengaruh berbagai parameter terhadap respons struktur *basement*. Respons struktur yang diteliti adalah deformasi dari dinding diafragma. Penelitian ini akan dilakukan dengan bantuan program Midas GTS NX dalam memodelkan struktur *basement* bangunan dan tanah disekitarnya dengan metode elemen hingga. Struktur *basement* yang dianalisis terdiri dari pelat tipe *flat slab*, dinding diafragma, *king post*, *raft*, dan fondasi tiang. Beban gempa dianalisis dengan metode respons spektrum berdasarkan data wilayah Jakarta. Dari hasil analisis diperoleh bahwa parameter yang berpengaruh pada deformasi dinding diafragma adalah modulus elastisitas tanah, berat jenis tanah, *poisson ratio* tanah, tebal dinding diafragma dan mutu beton dinding diafragma. Modulus elastisitas tanah memiliki pengaruh pada perubahan deformasi yang paling besar yaitu 30,29%, sedangkan mutu beton dinding diafragma memiliki pengaruh yang paling kecil yaitu 0,027%.

Kata kunci: *basement*, dinding diafragma, gempa, respons spektrum, Midas GTS NX, metode elemen hingga

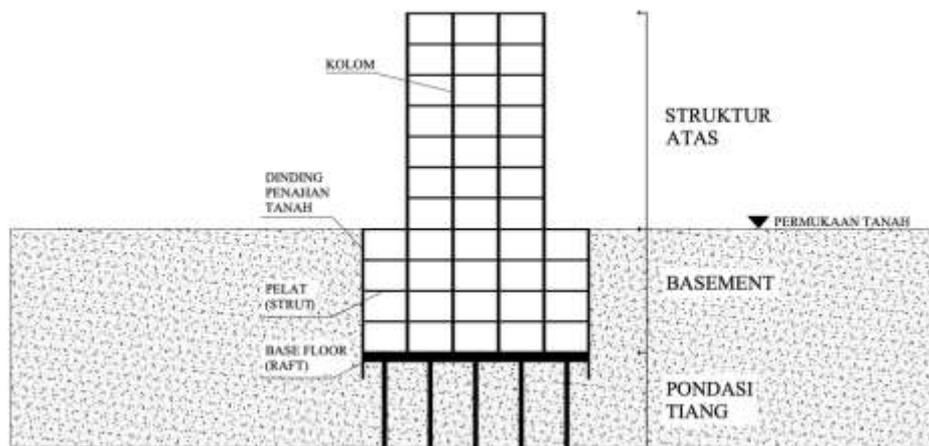
1. PENDAHULUAN

Gempa bumi adalah getaran yang terjadi di permukaan bumi akibat pelepasan energi secara mendadak dari dalam bumi yang menciptakan gelombang seismik. Gempa bumi merupakan fenomena alam yang merusakkan dan merugikan. Gempa bumi dengan kekuatan yang besar dapat meruntuhkan struktur bangunan dan dapat menimbulkan korban jiwa. Untuk mencegah adanya korban jiwa akibat gempa bumi, maka banyak penelitian yang dilakukan untuk menganalisis beban gempa terhadap kekuatan, keamanan, dan kenyamanan struktur. Beban gempa merupakan beban dinamik yang memiliki periode relatif panjang dan terjadi secara bolak balik.

Meskipun terletak di bawah tanah, *basement* tidak terlepas dari kemungkinan rusak akibat adanya beban dinamik seperti gempa. Oleh karena itu perlu dianalisis respons struktur *basement* tersebut akibat beban yang terjadi. Struktur *basement* sendiri terdiri dari dinding penahan tanah, pelat, *king post*, *raft*, dan fondasi seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 1. Elemen struktur tersebut memberi kekuatan kepada *basement* terhadap beban dari dalam maupun dari luar (Erick dkk, 2021).

Respons struktur akibat beban gempa dipengaruhi oleh banyak parameter, baik itu parameter dari tanah maupun parameter dari struktur itu sendiri. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji pengaruh berbagai macam parameter struktur dan tanah akibat beban dinamik gempa sehingga dapat diketahui efek berbagai parameter tersebut terhadap respons struktur. Respons struktur yang difokuskan pada penelitian ini adalah deformasi dinding diafragma. Penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan bantuan program Midas GTS NX dengan memasukkan nilai yang berbeda pada parameter yang diuji. Beban gempa dianalisis menggunakan metode respons spektrum berdasarkan data di wilayah Jakarta. Parameter yang diuji antara lain adalah angka pori tanah, berat jenis tanah, kohesi, kuat geser *undrained*, modulus elastisitas tanah, *poisson ratio* tanah, porositas, *damping ratio* struktur, *damping ratio* tanah, sudut geser tanah, tebal dinding diafragma dan mutu beton dinding diafragma.



Gambar 1. Konstruksi *basement* pada bangunan (Erick dkk., 2021).

Gempa Bumi

Gempa bumi pada umumnya terjadi pada sesar atau patahan (*fault*) akibat adanya pergeseran lempeng bumi hingga mengakibatkan pecahnya pinggiran lempeng tersebut secara tiba-tiba. Sesar atau patahan adalah bidang rekahan atau diskontinuitas dalam batuan yang disertai dengan perpindahan relatif antar bagian sebagai akibat dari gerakan massa batuan. Gempa bumi yang terjadi disebabkan dari pelepasan energi yang dihasilkan oleh tekanan dari lempengan bumi yang bergerak tersebut.

Wilayah Jakarta memang tidak memiliki sumber gempa karena tidak berada pada pertemuan antar lempeng, tetapi gempa yang berasal dari beberapa sumber yang berada disekitarnya mengakibatkan gelombang seismik yang terasa hingga wilayah Jakarta. Berdasarkan Gambar 2, terdapat tiga sumber gempa yang paling berpengaruh terhadap wilayah Jakarta yaitu:

- Selat Sunda, daerah perbatasan Pulau Sumatera dengan Pulau Jawa
Gempa bumi yang terjadi di lokasi ini lebih disebabkan oleh aktivitas vulkanik dari Gunung Krakatau. Gempa tektonik yang pernah terjadi di dekat lokasi ini adalah sebuah gempa dengan magnitudo 6,9 yang melanda Indonesia pada tanggal 2 Agustus 2019, Pukul 19.05 WIB di Samudera Hindia sebelah selatan Selat Sunda. Pusat gempa berjarak 164 km dari Sumur, Kabupaten Pandeglang, Banten dengan kedalaman 48 Km.
- Sebelah selatan Sukabumi-Tasikmalaya
Gempa bumi yang pernah terjadi di lokasi ini adalah gempa bumi Jawa Barat 2009. Gempa ini merupakan gempa tektonik yang terjadi pada Rabu 2 September 2009 pada pukul 14:55:21 WIB dengan pusat gempa di laut sekitar 142 km barat daya Kabupaten Tasikmalaya, Jawa Barat berkekuatan 7,3 pada Skala Richter.
- Sebelah selatan Cilacap
Gempa tektonik yang terjadi di lokasi ini relatif tidak pernah sebesar gempa yang terjadi di Selat Sunda maupun Sukabumi-Tasikmalaya. Gempa yang terjadi di lokasi ini umumnya berkekuatan 4-5 SR.



Gambar 2. Sumber gempa yang paling berpengaruh terhadap Jakarta (United States Geological Survey, 2022)

Respons Spektrum

Salah satu model analisis yang dapat dilakukan untuk menghitung pengaruh gempa terhadap struktur adalah menggunakan respons spektrum. Respons spektrum adalah metode analisis berupa pendekatan yang menggunakan nilai percepatan tanah maksimum akibat gempa yang mungkin terjadi berdasarkan riwayat gempa yang pernah terjadi. Respons spektrum digambarkan dalam sebuah grafik antara periode getar struktur terhadap respon struktur (umumnya percepatan/akselerasi). Perhitungan respons spektrum didasarkan pada SNI 1726:2019. Respons spektrum dapat diperoleh dengan ketentuan sebagai berikut.

- Kategori risiko dapat diperoleh berdasarkan Tabel 3 SNI 1726:2019 sesuai dengan jenis pemanfaatan bangunan.
- Faktor keutamaan gempa (I_e) dapat diperoleh berdasarkan Tabel 4 SNI 1726:2019 sesuai dengan kategori risiko bangunan.
- Kelas situs dapat ditentukan berdasarkan Tabel 5 SNI 1726:2019 sesuai dengan data tanah di lokasi bangunan.
- Parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan (S_s dan S_1) dapat ditentukan berdasarkan Gambar 15 dan 16 SNI 1726:2019 sesuai dengan wilayah yang dianalisis.
- Koefisien situs F_a dan F_v dapat ditentukan berdasarkan Tabel 6 dan 7 SNI 1726:2019.
- Parameter respon spektral percepatan gempa S_{MS} dan S_{M1} berdasarkan SNI 1726:2019 dapat ditentukan sebagai berikut:

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2)$$

dengan S_{MS} = parameter respon spektral percepatan gempa pada periode pendek, S_{M1} = parameter respon spektral percepatan gempa pada periode 1 detik, F_a = faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek, F_v = faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode 1 detik, S_s = parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek, S_1 = parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode 1 detik.

- Parameter percepatan spektral desain S_{DS} dan S_{D1} berdasarkan SNI 1726:2019 dapat ditentukan sebagai berikut:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (4)$$

dengan S_{DS} = parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek, S_{D1} = parameter percepatan spektral desain untuk periode 1 detik.

- Periode getar fundamental struktur (T) dan periode respons spektrum T_0 , T_s , dan T_L berdasarkan SNI 1726:2019 dapat ditentukan sebagai berikut:

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (5)$$

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (6)$$

T_L dapat ditentukan berdasarkan Gambar 20 SNI 1726:2019 sesuai dengan wilayah yang dianalisis.

- Spektrum respons desain berdasarkan SNI 1726:2019 dapat ditentukan sebagai berikut:

- o Untuk $T < T_0$, maka S_a dihitung dengan persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (7)$$

- o Untuk $T_0 \leq T \leq T_s$, maka S_a dihitung dengan persamaan:

$$S_a = S_{DS} \quad (8)$$

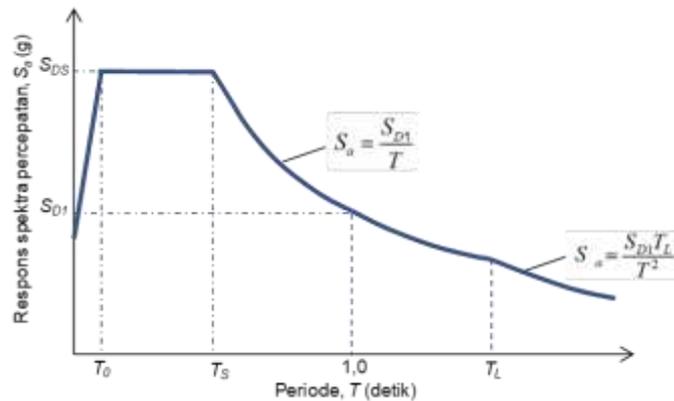
- o Untuk $T_s \leq T \leq T_L$, maka S_a dihitung dengan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (9)$$

- o Untuk $T > T_L$, maka S_a dihitung dengan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \quad (10)$$

- Kategori desain seismik S_{DS} dan S_{D1} dapat ditentukan berdasarkan Tabel 8 dan 9 SNI 1726:2019 sesuai dengan nilai S_{DS} dan S_{D1} .

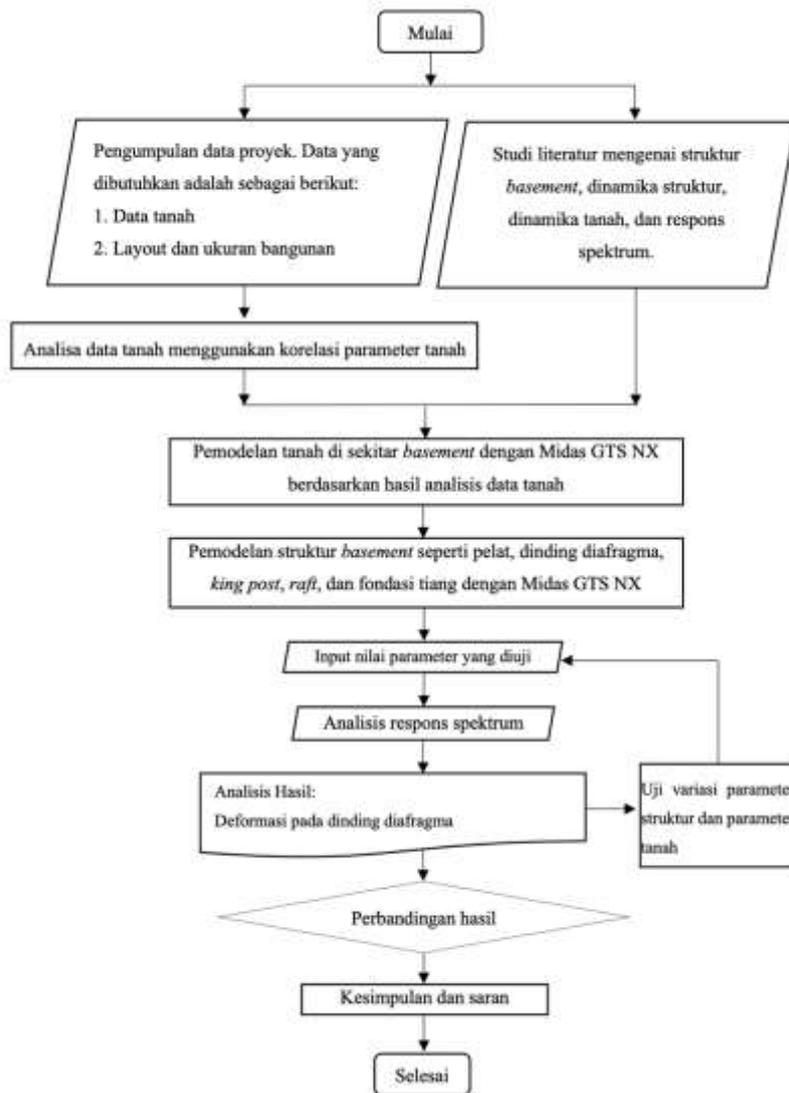


Gambar 3. Respons spektrum desain (SNI 1726:2019)

2. METODE PENELITIAN

Secara garis besar prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini digambarkan pada Gambar 4. Uraian dari diagram alir tersebut adalah sebagai berikut:

- Tahap awal dari penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan data tanah dan *layout* bangunan dari proyek yang akan digunakan dalam penelitian.
- Tahap berikutnya adalah melakukan studi literatur mengenai struktur *flat slab basement*, dinding diafragma, beban gempa dan ledakan serta karakteristik dari parameter tanah dan struktur.
- Lalu dilakukan pengolahan data tanah yang telah didapat dengan menggunakan nilai tipikal dan korelasi parameter tanah dari berbagai sumber.
- Langkah berikutnya adalah pemodelan fondasi tiang, dinding diafragma, *raft*, dan struktur *flat slab basement*. Pemodelan dilakukan dengan program Midas GTS NX.
- Lalu input data material dan nilai-nilai parameter yang akan diuji dalam program Midas GTS NX.
- Setelah pemodelan struktur, dilakukan analisis berdasarkan beban gempa. Analisis gempa menggunakan metode respons spektrum.
- Tahap berikutnya adalah melakukan analisis hasil deformasi yang terjadi pada dinding diafragma.
- Kemudian ubah nilai parameter yang ingin diuji sesuai besaran yang sudah ditentukan, lalu analisis lagi terhadap beban gempa sehingga didapat hasil analisis yang baru. Lakukan langkah tersebut berulang sampai didapat hasil analisis dari semua parameter yang ingin diuji.
- Hasil analisis yang didapat kemudian dibandingkan, sehingga dapat diketahui pengaruh berbagai parameter yang diuji terhadap deformasi dari dinding diafragma.
- Tahapan terakhir adalah memformulasikan kesimpulan dari hasil penelitian ini dan saran untuk penelitian yang akan datang.



Gambar 4. Diagram alir penelitian

Parameter Tanah Desain

Parameter tanah desain diperoleh dari grafik hasil plot parameter tanah yang diperoleh dari data penyelidikan tanah di lapangan, data uji laboratorium dan juga korelasi parameter tanah. Dari grafik tersebut kemudian dicari rata-ratanya sehingga diperoleh parameter tanah desain. Parameter tanah desain diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter tanah desain

Lapisan	Elevasi Lapisan Tanah		Klasifikasi Tanah	Konsistensi	N-SPT	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	e_0	ϕ' (°)
	Atas (m)	Bawah (m)							
1	0	17	Silt	Medium	10	15	15	2	8
2	17	32	Silt	Medium	10	15	15	2	8
3	32	40	Clay	Very Stiff	20	16	16	1,5	6
4	40	52	Clay	Very Stiff	26	17	17	1,1	6
5	52	68	Clay	Very Stiff	28	17	17	1,1	4
6	68	80	Clay	Very Stiff	24	16	16	1,4	4
7	80	92	Clay	Very Stiff	26	17	17	1,2	6
8	92	112	Clay	Very Stiff	26	17	17	1,1	6
9	112	132	Clay	Very Stiff	28	17	17	1,2	3
10	132	144	Silt	Hard	34	18,5	18	0,75	3
11	144	150	Silt	Hard	50	16	15	1,4	3

Tabel 1. Parameter tanah desain (lanjutan)

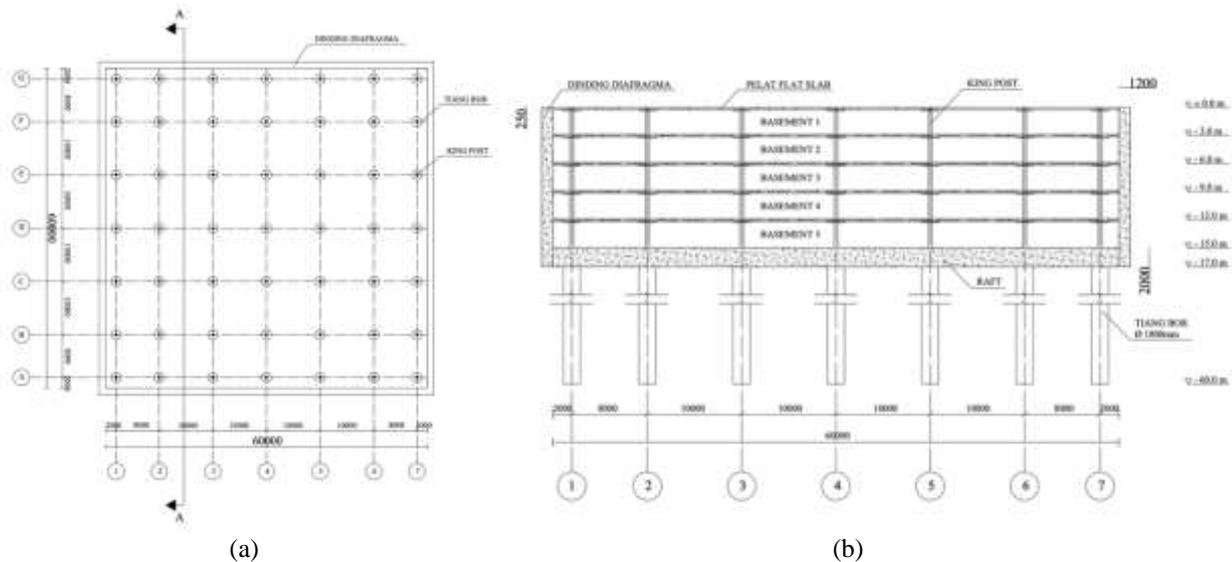
Lapisan	S_u (kPa)	c' (kPa)	OCR	E (MPa)	E_{50} (kPa)	E_{oed} (kPa)	E_{urref} (kPa)	k (m/s)	μ	Ψ (°)	n
1	50	15	2	4	2200	2200	6600	10^{-8}	0,35	0	0,70
2	50	15	1	8	4400	4400	13200	10^{-8}	0,3	0	0,64
3	100	65	1	10	5500	5500	16500	10^{-9}	0,4	0	0,60
4	130	90	1	12	6600	6600	19800	10^{-9}	0,4	0	0,52
5	140	100	0,5	16	8800	8800	26400	10^{-9}	0,4	0	0,52
6	120	80	0,5	14	7700	7700	23100	10^{-9}	0,4	0	0,58
7	130	120	0,5	15	8250	8250	24750	10^{-9}	0,4	0	0,55
8	130	110	0,5	15	8250	8250	24750	10^{-9}	0,4	0	0,52
9	140	120	0,5	16	8800	8800	26400	10^{-9}	0,4	0	0,55
10	170	120	0,5	18	9900	9900	29700	10^{-9}	0,3	0	0,43
11	200	170	0,5	26	14300	14300	42900	10^{-9}	0,3	0	0,58

Properti Basement

Struktur *basement* yang dianalisis adalah *basement* 5 lantai dengan tinggi antar lantai 3m. *Basement* memikul berat dari struktur atas setinggi 32 lantai. Sistem pelat *basement* adalah *flat slab* dengan tebal 0,25m dan dinding penahan tanah yang dianalisis adalah tipe dinding diafragma dengan tebal 1,2m. Ukuran *drop panel* yang digunakan adalah 1,8m x 1,8m dan tebal *drop panel* adalah 100mm. Sistem fondasi pada *basement* adalah *raft-pile foundation* dengan tebal *raft* 2m dan fondasi yang digunakan adalah fondasi tiang bor lingkaran dengan diameter 1,8m. Mutu beton yang digunakan adalah $f'c = 25$ MPa. *King post* menggunakan profil baja H 406 x 403 x 26,5 x 42,9.

Tabel 2. Properti material *basement*

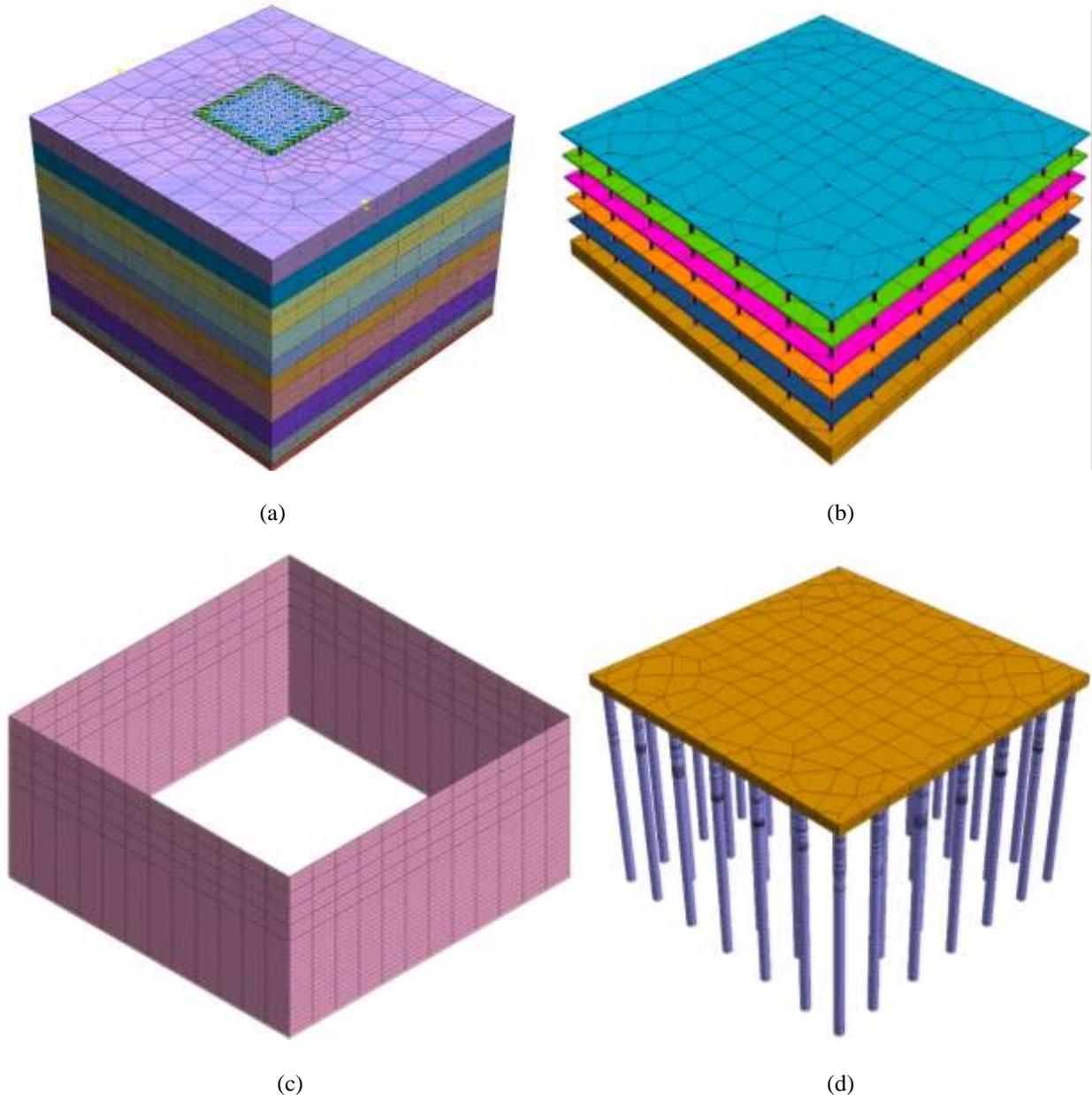
Elemen Struktur	E (MPa)	Poisson ratio, μ
Pelat dan <i>Drop Panel</i>	23500	0,18
Dinding Diafragma	23500	0,18
<i>Raft</i>	23500	0,18
Tiang Bor	23500	0,18
<i>King Post</i>	200000	0,3



Gambar 5. Model *basement* (a) Tampak atas (layout) *basement*, (b) potongan A-A (Erick dkk., 2021).

Pemodelan Program Elemen Hingga

Program elemen hingga yang digunakan pada penelitian ini adalah Midas GTS NX. Material tanah dimodelkan sebagai *Modified Mohr-Coulomb* dan material struktur dimodelkan sebagai *Elastic*. Dinding diafragma dimodelkan sebagai elemen *shell* (2D), sedangkan pelat, *raft*, dan lapisan tanah dimodelkan sebagai elemen *solid* (3D). Untuk tiang bor dan *king post* dimodelkan sebagai *beam* (1D). Beban mati yang akan di-input ke dalam program merupakan berat sendiri struktur dengan memperhitungkan luasan atau volume struktur yang ditinjau dan mengalikannya dengan berat jenis beton yaitu 24 kN/m^3 . Beban hidup akan diasumsikan bahwa semua luasan *basement* digunakan untuk parkir dengan $LL = 4 \text{ kN/m}^2$ sesuai dengan standar SNI 03-1727-1989.



Gambar 6. Pemodelan pada program elemen hingga (a) pemodelan tanah, (b) pemodelan pelat dan *king post*, (c) pemodelan dinding diafragma, (d) pemodelan *raft* dan tiang bor

Parameter Uji

Dalam menguji parameter tanah, maka parameter tanah diubah hanya pada lapisan 1 dan 2 karena pada lapisan tersebut yang mengenai dinding diafragma pada *basement*. Parameter tanah pada lapisan 1 dan 2 dianggap isotropik (bernilai sama) untuk memudahkan analisis. Tiap-tiap parameter diuji dengan 5 (lima) variasi nilai yang berbeda sehingga terdapat 5 *case* pada masing-masing parameter.

Tabel 3. Parameter uji

Case	Parameter yang Diubah											
	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	e_0	n	μ	E (MPa)	S_u (kPa)	ζ_{tanah}	$\zeta_{struktur}$	t (m)	f_c' (MPa)
1	5	5	10	0.5	0,3	0,25	4	50	0,01	0,01	0,5	20
2	15	10	15	1	0,4	0,30	7	100	0,03	0,03	1	25
3	30	20	20	1.5	0,5	0,35	10	150	0,05	0,05	1,5	30
4	45	30	25	2	0,6	0,40	15	200	0,07	0,07	2	35
5	60	40	30	2.5	0,7	0,45	20	300	0,1	0,1	2,5	40

dengan c = kohesi, ϕ = sudut geser tanah, γ = berat jenis tanah, e_0 = angka pori tanah, n = porositas tanah, μ = *poisson ratio* tanah, E = modulus elastisitas tanah, s_u = kuat geser *undrained*, ζ_{tanah} = *damping ratio* tanah, $\zeta_{struktur}$ = *damping ratio* struktur, t = tebal dinding diafragma, dan f_c' = mutu beton dinding diafragma.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Respons Spektrum

Beban gempa akan dimasukkan ke dalam program Midas GTS NX dalam bentuk respons spektrum. Respons spektrum didapatkan melalui situs <http://puskim.pu.go.id/> dengan memasukkan koordinat dan jenis batuan. Koordinat yang dimasukkan adalah koordinat bangunan yaitu bangunan yang ditinjau dalam laporan ini. Selain itu, respons spektrum akan dihitung juga dengan perhitungan manual berdasarkan SNI 1726:2019.

Klasifikasi situs untuk penentuan respons spektrum didapat dengan menghitung nilai N-SPT rata-rata dan kuat geser niralir rata-rata sesuai dengan SNI 1726:2019.

- Data bangunan ini adalah sebagai berikut:
 - Lokasi bangunan : Jakarta
 - Fungsi bangunan : Gedung Apartemen
- Kategori risiko dan faktor keutamaan gempa (I_e)
 - Berdasarkan Tabel 3 SNI 1726:2019, diperoleh kategori risiko II untuk Gedung Apartemen.
 - Berdasarkan Tabel 4 SNI 1726:2019, diperoleh $I_e = 1,0$ untuk kategori risiko II.
- Klasifikasi situs
 - Berdasarkan data tanah yang diperoleh, kelas situs dinyatakan sebagai tanah lunak (kelas situs SE)
- Parameter respon spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan
 - Berdasarkan Gambar 15 SNI 1726:2019, diperoleh $S_S = 0,6 - 0,7$ g untuk Jakarta. Maka diambil $S_S = 0,679$ g
 - Berdasarkan Gambar 16 SNI 1726:2019, diperoleh $S_1 = 0,25 - 0,3$ g untuk Jakarta. Maka diambil $S_1 = 0,298$ g
- Koefisien situs
 - Berdasarkan Tabel 6 SNI 1726:2019, untuk kelas situs SE, diperoleh:
 - $S_S = 0,5$ g $\rightarrow F_a = 1,7$
 - $S_S = 0,75$ g $\rightarrow F_a = 1,3$
 - $S_S = 0,679$ g $\rightarrow F_a = 1,4136$
 - Berdasarkan Tabel 7 SNI 1726:2019, untuk kelas situs SE, diperoleh:
 - $S_1 = 0,2$ g $\rightarrow F_v = 3,3$
 - $S_1 = 0,3$ g $\rightarrow F_v = 2,8$
 - $S_1 = 0,298$ g $\rightarrow F_v = 2,81$
- Parameter respon spektral percepatan gempa
 - $S_{MS} = F_a S_S = 1,4136 (0,679) = 0,96$ g
 - $S_{M1} = F_v S_1 = 2,81 (0,298) = 0,837$ g

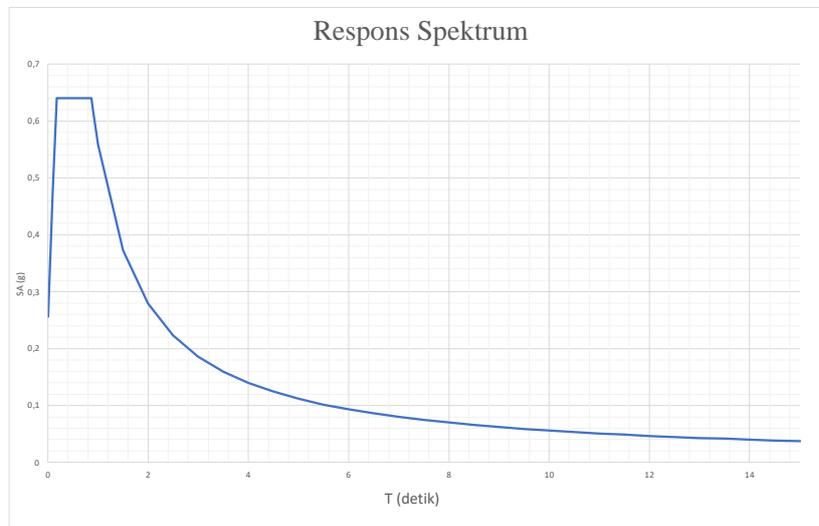
- Parameter percepatan spektral desain
 - $S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} = \frac{2}{3} (0,96) = 0,64 \text{ g}$
 - $S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} = \frac{2}{3} (0,837) = 0,558 \text{ g}$
- Respon spektrum: periode getar fundamental struktur
 - $T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = \frac{0,558\text{g}}{0,64\text{g}} = 0,872 \text{ s}$
 - $T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} = 0,2 \times \frac{0,558\text{g}}{0,64\text{g}} = 0,174 \text{ s}$
 - Berdasarkan Gambar 20 SNI 1726:2019, diperoleh $T_L = 20$ detik untuk Jakarta.
- Respon spektrum: persamaan spektrum percepatan
 - Untuk $T < T_0$, maka S_a dihitung dengan persamaan:

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) = 0,64\text{g} \times \left(0,4 + 0,6 \times \frac{T}{0,174} \right) = (0,256 + 2,2T) \text{ g}$$
 - Untuk $T_0 \leq T \leq T_s$, maka S_a dihitung dengan persamaan:

$$S_a = S_{DS} = 0,64 \text{ g}$$
 - Untuk $T_s \leq T \leq T_L$, maka S_a dihitung dengan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} = \frac{0,558 \text{ g}}{T}$$
 - Untuk $T > T_L$, maka S_a dihitung dengan persamaan:

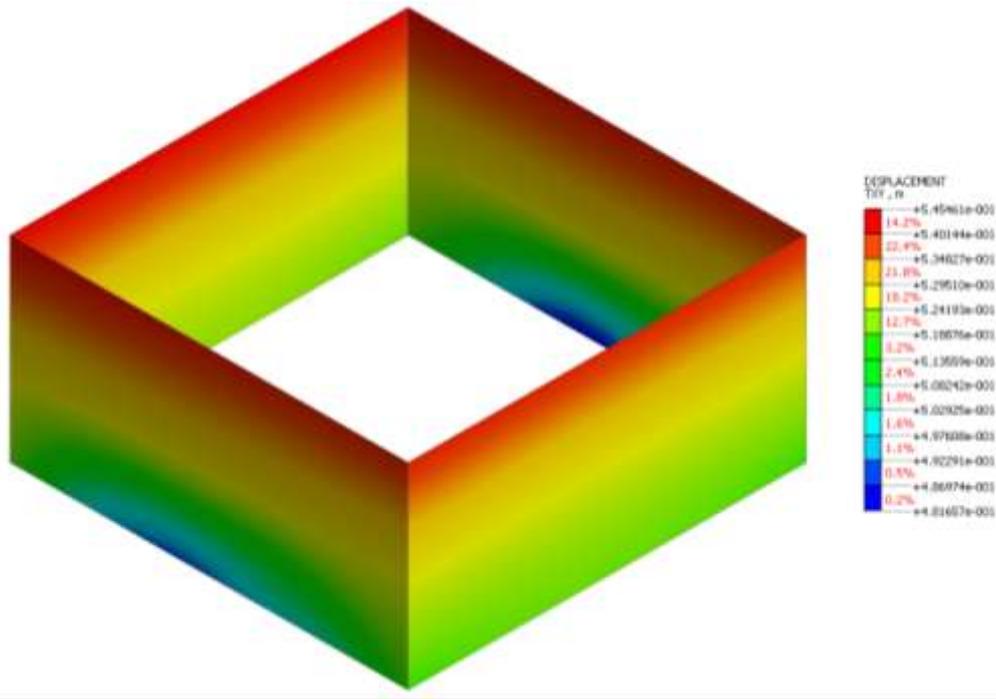
$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} = \frac{0,558(20)}{T^2} = \frac{11,165 \text{ g}}{T^2}$$
- Kategori desain seismik
 - Berdasarkan Tabel 8 dan Tabel 9 SNI 1726:2019, untuk kategori risiko II diperoleh KDS D ($S_{DS} = 0,64 \text{ g} \geq 0,5 \text{ g}$ dan $S_{D1} = 0,558 \text{ g} \geq 0,2 \text{ g}$)



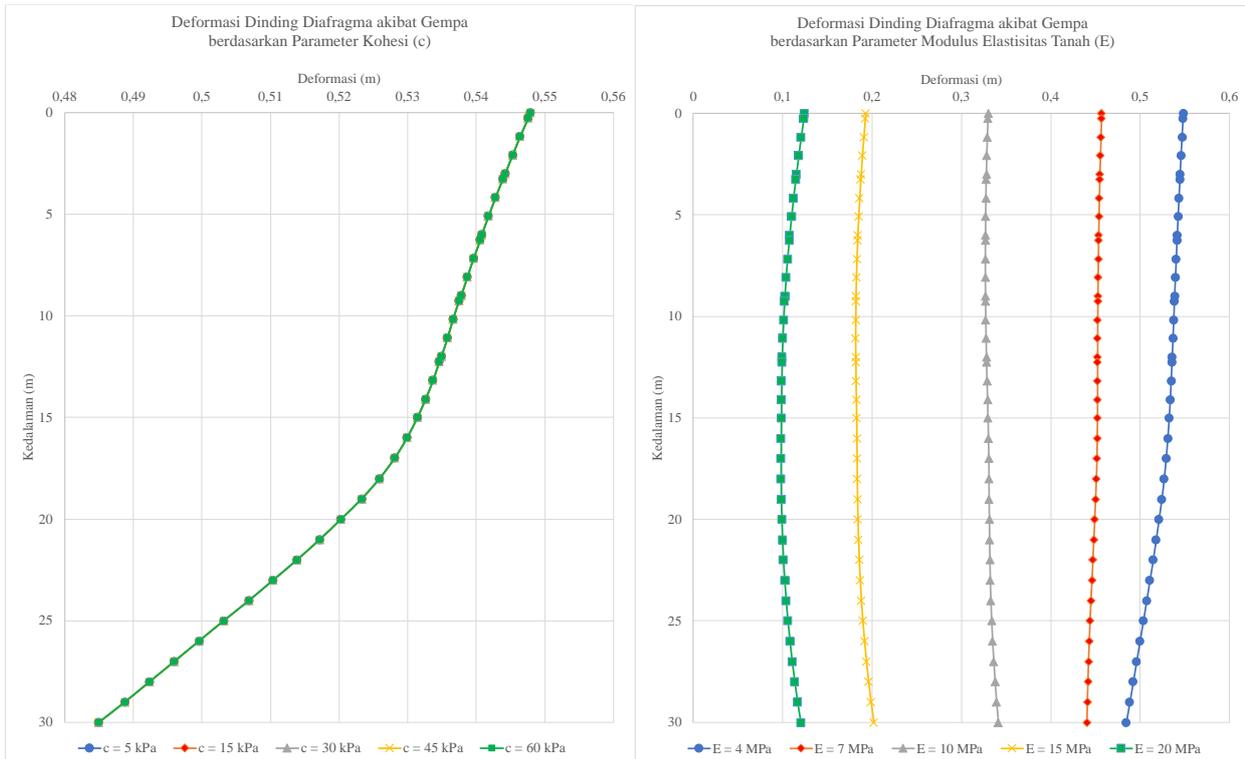
Gambar 7. Respons spektrum gempa

Hasil Uji Parameter

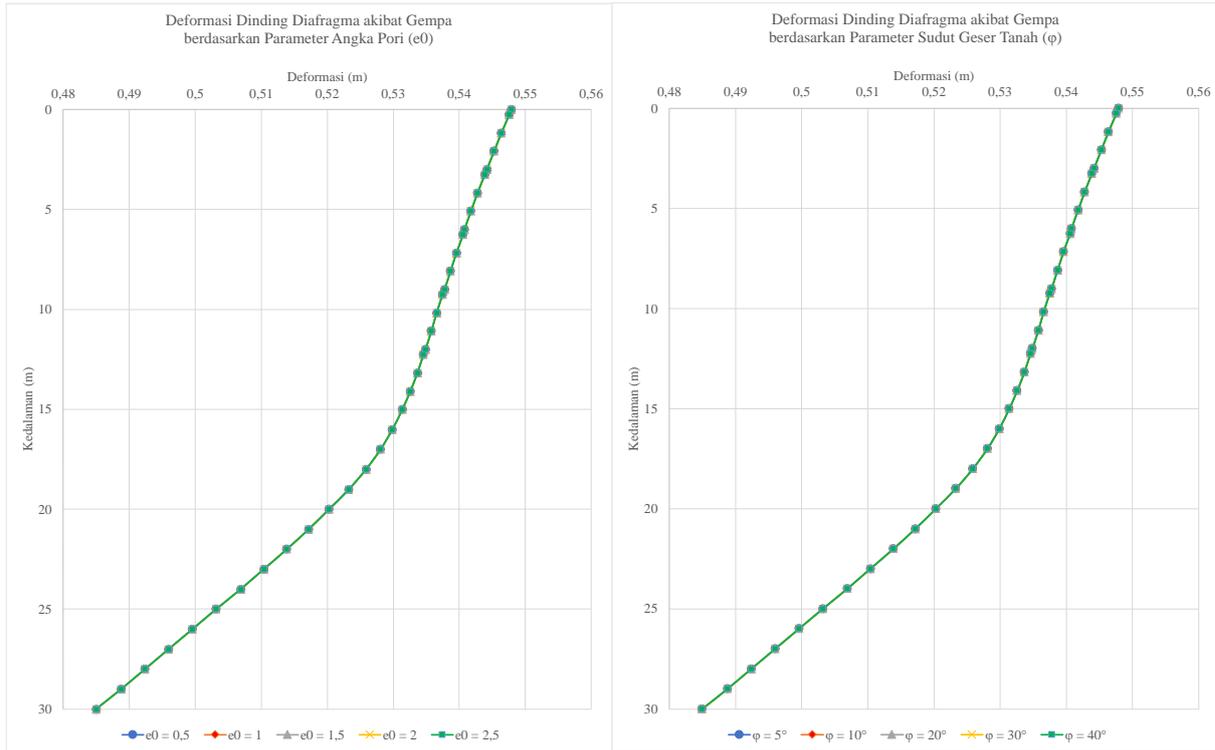
Hasil analisis parametrik terhadap deformasi dinding diafragma akan diberikan dalam bentuk grafik agar dapat dibandingkan secara langsung. Hasil analisis tersebut diberikan pada Gambar 8 sampai dengan Gambar 14.



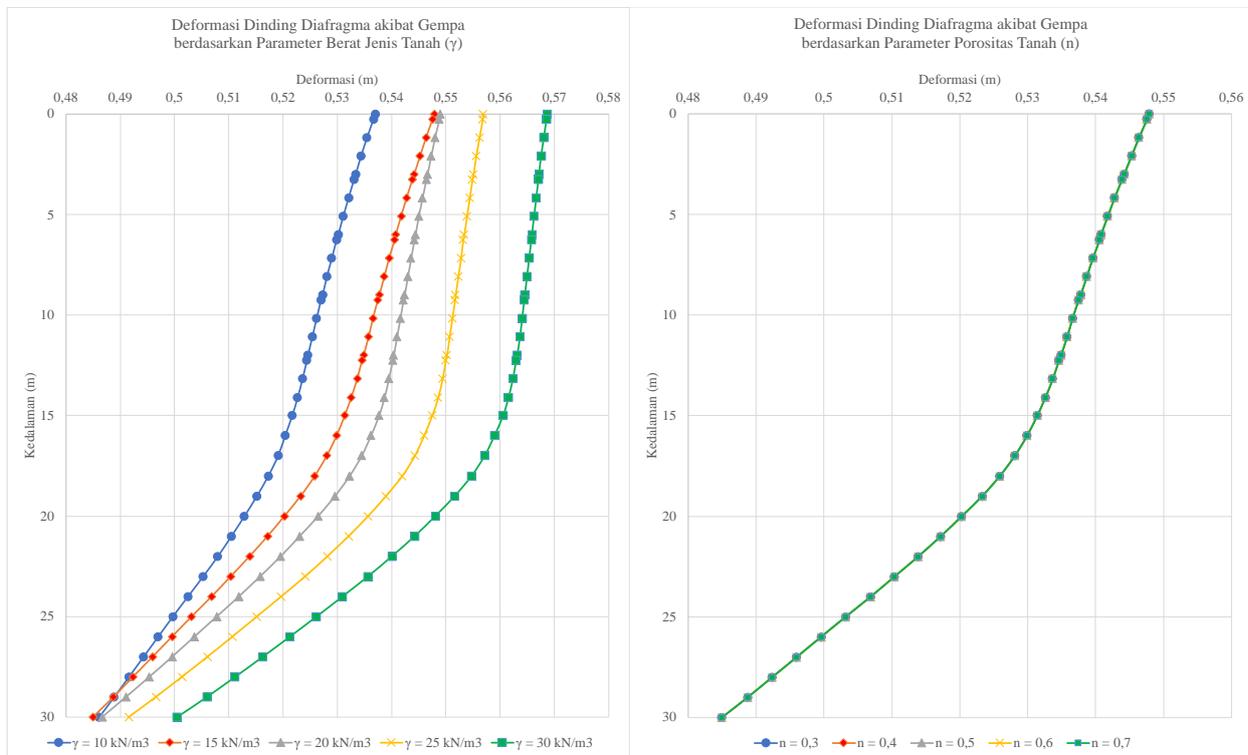
Gambar 8. Kontur deformasi dinding diafragma akibat gempa



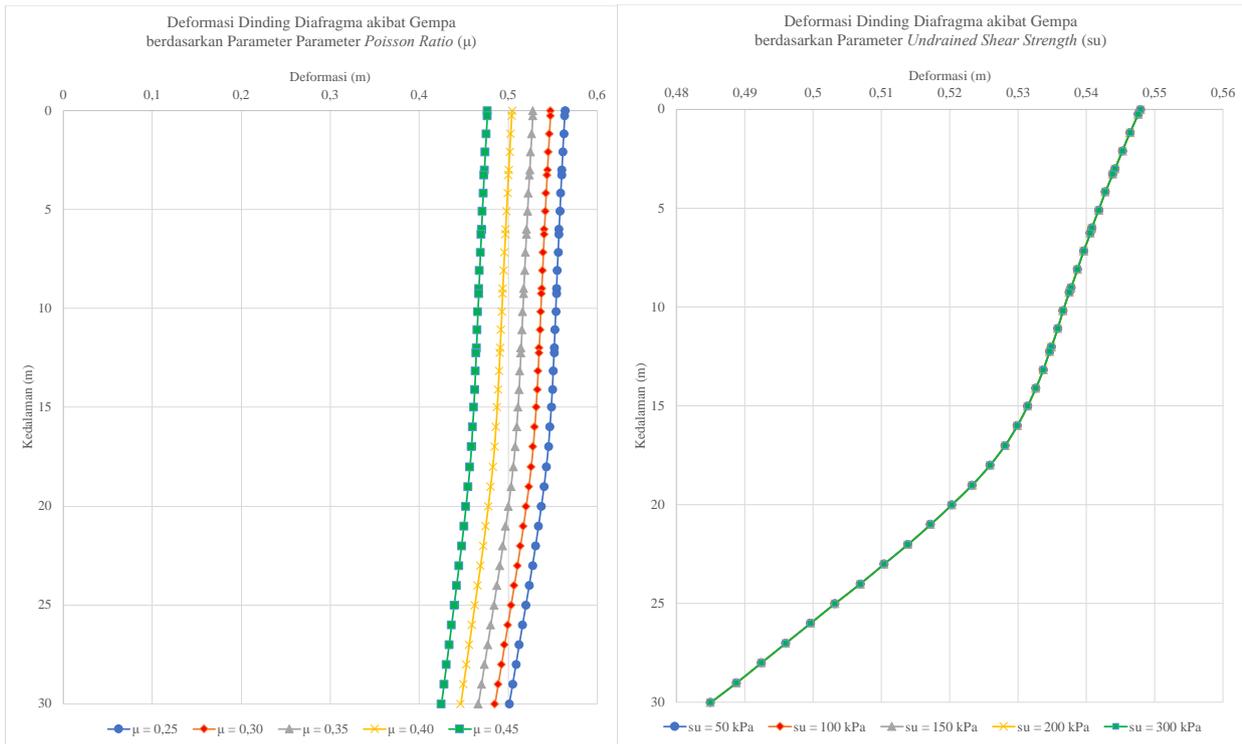
Gambar 9. Deformasi dinding diafragma akibat gempa berdasarkan parameter kohesi (kiri) dan modulus elastisitas tanah (kanan)



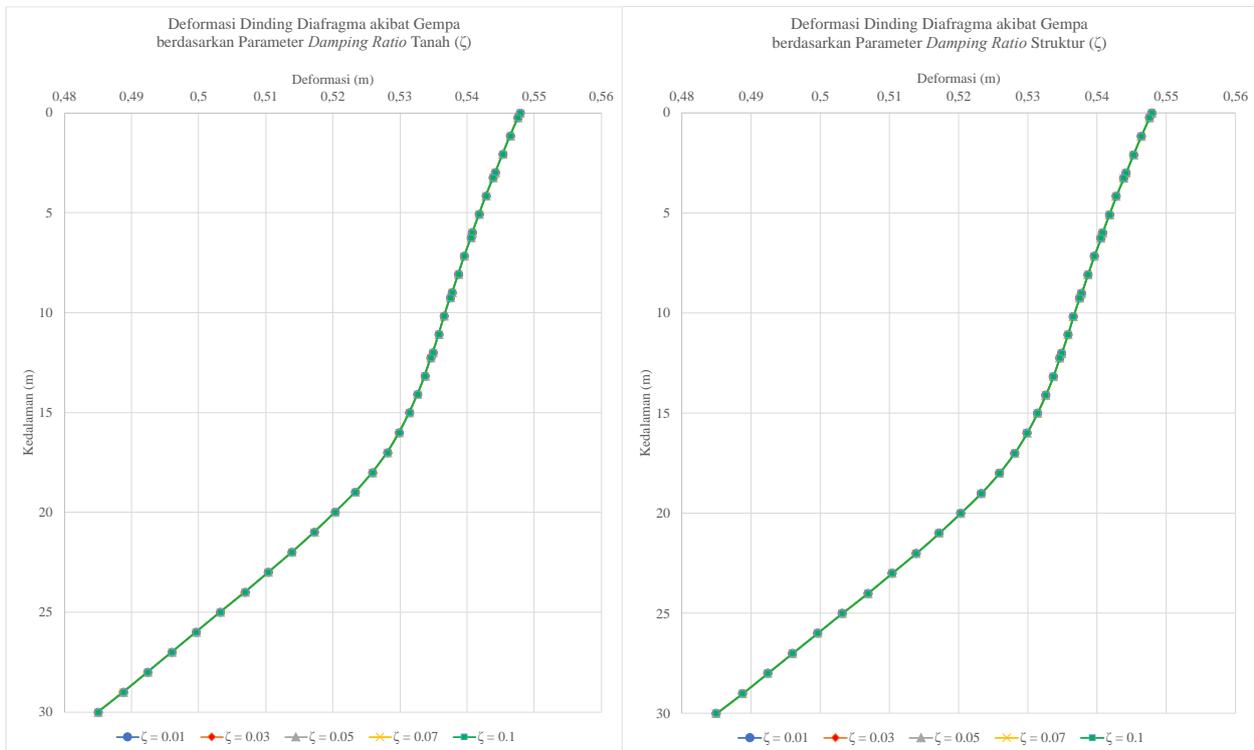
Gambar 10. Deformasi dinding diafragma akibat gempa berdasarkan parameter angka pori tanah (kiri) dan sudut geser tanah (kanan)



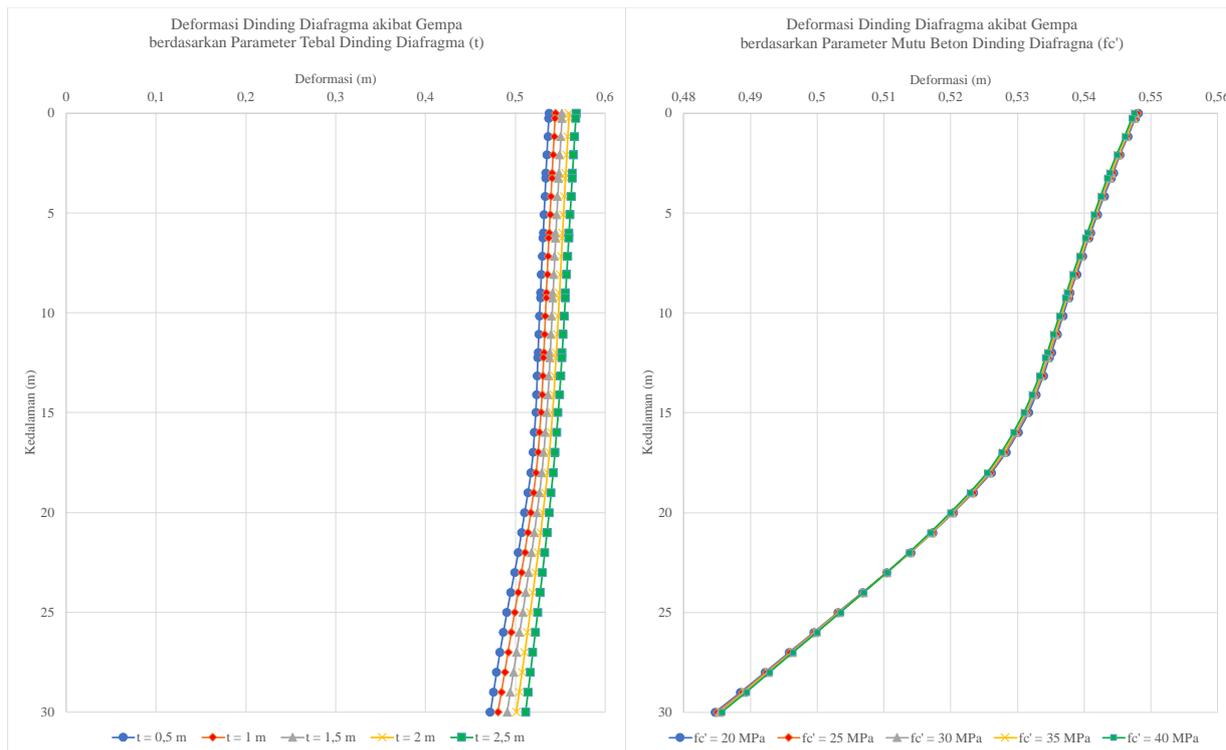
Gambar 11. Deformasi dinding diafragma akibat gempa berdasarkan parameter berat jenis tanah (kiri) dan porositas tanah (kanan)



Gambar 12. Deformasi dinding diafragma akibat gempa berdasarkan parameter *poisson ratio* tanah (kiri) dan kuat geser niralir tanah (kanan)



Gambar 13. Deformasi dinding diafragma akibat gempa berdasarkan parameter *damping ratio* tanah (kiri) dan *damping ratio* struktur (kanan)



Gambar 14. Deformasi dinding diafragma akibat gempa berdasarkan parameter tebal dinding diafragma (kiri) dan mutu beton dinding diafragma (kanan)

Dari hasil analisis menggunakan program Midas GTS NX, kemudian dibandingkan perubahan hasil pada tiap kenaikan nilai parameter yang diuji. Hasil yang dibandingkan adalah perubahan deformasi maksimum dari dinding diafragma akibat gempa. Tanda positif (+) pada persentase perubahan deformasi menunjukkan adanya efek berbanding lurus yaitu adanya kenaikan deformasi dinding diafragma pada saat nilai parameter uji dinaikkan. Sedangkan tanda negatif (-) pada persentase rata-rata perubahan deformasi menunjukkan adanya efek berbanding terbalik yaitu adanya penurunan deformasi dinding diafragma pada saat nilai parameter uji dinaikkan. Besar perubahan deformasi untuk tiap kenaikan nilai parameter diuji diberikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perubahan Deformasi Maksimum Dinding Diafragma

Case	Perubahan Deformasi Maksimum Dinding Diafragma (%)											
	c	ϕ	γ	e_0	n	μ	E	Su	ζ_{tanah}	$\zeta_{struktur}$	t	f'c
1 → 2	0	0	2,03	0	0	-2,89	-16,67	0	0	0	1,3	-0,036
2 → 3	0	0	0,2	0	0	-3,61	-25,27	0	0	0	1,34	-0,037
3 → 4	0	0	1,44	0	0	-4,45	-40,82	0	0	0	1,38	-0,018
4 → 5	0	0	2,12	0	0	-5,53	-38,4	0	0	0	1,41	-0,018
Rata-rata	0	0	1,45	0	0	-4,12	-30,29	0	0	0	1,37	-0,027

Perubahan deformasi maksimum dinding diafragma yang ditunjukkan pada Tabel 4 dilakukan berdasarkan perubahan parameter satu case ke case berikutnya dengan nilai parameter seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah diperoleh, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Beban gempa merupakan beban dinamik yang dapat membuat dinding diafragma bedeformasi secara lateral sehingga mempengaruhi desain struktur bawah bangunan.

- Parameter tanah yang berpengaruh terhadap deformasi dinding diafragma akibat beban gempa adalah Modulus Elastisitas Tanah (E), *Poisson Ratio* Tanah (μ) dan Berat Jenis Tanah (γ).
- Parameter struktur yang berpengaruh terhadap deformasi dinding diafragma akibat beban gempa Tebal Dinding Diafragma (t) dan Mutu Beton Dinding Diafragma ($f'c$).
- Parameter yang tidak berpengaruh terhadap deformasi dinding diafragma akibat beban gempa antara lain adalah Kohesi (c), Angka Pori (e_0), Sudut Geser Tanah (ϕ), Porositas Tanah (n), *Undrained Shear Strength* (su), *Damping Ratio* Tanah (ζ), dan *Damping Ratio* Struktur (ζ).
- Modulus Elastisitas Tanah (E) memiliki efek pada rata-rata perubahan deformasi yang paling besar diantara semua parameter, yaitu sebesar 30,29%. Semakin besar nilai modulus elastisitas tanah maka deformasi dinding diafragma yang terjadi semakin kecil.
- *Poisson Ratio* Tanah (μ) memiliki efek pada rata-rata perubahan deformasi yaitu sebesar 4,12%. Untuk beban gempa, semakin besar nilai poisson ratio tanah maka deformasi yang terjadi semakin kecil.
- Berat Jenis Tanah (γ) memiliki efek pada rata-rata perubahan deformasi yang paling kecil diantara parameter tanah lainnya, yaitu sebesar 1,45%. Semakin besar nilai berat jenis tanah maka deformasi yang terjadi semakin besar.
- Tebal Dinding Diafragma (t) memiliki efek pada rata-rata perubahan deformasi yaitu sebesar 1,37%. Semakin besar tebal dinding diafragma maka deformasi yang terjadi semakin besar.
- Mutu Beton Dinding Diafragma ($f'c$) memiliki efek pada rata-rata perubahan deformasi yang sangat kecil, yaitu sebesar 0,027%. Semakin besar nilai mutu beton dinding diafragma, maka deformasi yang terjadi semakin kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Erick, K., Susilo, A., Prihatiningsih, A., & Sentosa, G. (2021). Analisis Ledakan Pada Struktur Basement Dengan Dinding Diafragma. *25rd Annual National Conference on Geotechnical Engineering* (hal. 547-556). Jakarta: Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.
- United States Geological Survey. (2022). *Earthquake Hazard Program*. Diambil kembali dari USGS: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000gbww/region-info>