

Analisis Perpindahan Gedung Beton Bertulang Tingkat Rendah Terhadap Beban Gempa Sesuai Peta Gempa 2017 dengan Analisis Riwayat Waktu

Displacement Analysis of Low-rise Concrete Buildings Against Earthquake Load According to Earthquake Map 2017 with Time History Analysis

Retno Rafidah Sudaryati, Taufiq Ilham Maulana

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Indonesia merupakan salah satu negara yang sering terjadi gempa bumi dan mengakibatkan kegagalan struktur. Struktur yang digunakan dalam penelitian ini berupa gedung tingkat rendah yang diteliti dengan meletakkan gedung tersebut pada 99 kota besar di Indonesia dengan kelas situs tanah SC, SD dan SE. Penelitian ini menggunakan metode analisis riwayat waktu dalam mengkaji perpindahan antar lantai struktur ketika menerima 3 riwayat gempa pada setiap kota dan kelas situs tanahnya. Rekaman gempa yang digunakan dalam penelitian didapatkan dari *website peerberkeley.edu* yang kemudian disesuaikan dengan respon spektrum pada setiap kota dan kelas situs tanah dengan bantuan program *SeismoMatch*. Rekaman gempa yang digunakan ialah gempa Parkfield (1966), Parkfield (1996), dan Southern Calif (1952) untuk tanah SC, gempa Humbolt Bay (1937), Imperial Valley (1938), dan Northwest Calif (1941) untuk tanah SD, dan gempa Imperial Valley-06 (1979), Youtnville (2000), dan Imperial Valley-07 (1979) untuk tanah SE. Penelitian ini menggunakan program SAP2000 versi 21 dalam memodelkan struktur tinjauan. Pondasi pada penelitian ini diasumsikan sebagai pondasi telapak dan dimodelkan sebagai *joint springs* pada program SAP2000. Perpindahan antar lantai yang diperoleh dari struktur dibatasi dengan simpangan izin sebesar 2% dari tinggi antar lantai sesuai dengan SNI 1726:2012 Tabel 16. Hasil penelitian ini menunjukkan terdapat 2 kota dengan kelas situs tanah SE yang menghasilkan perpindahan pada lantai dasar melebihi perpindahan izin, yaitu pada kota Padang Sidempuan dan kota Sungai Penuh.

Kata-kata kunci: Perpindahan, bangunan tingkat rendah, riwayat waktu, gempa bumi

Abstract. *Indonesia is one of the countries that frequently experiences earthquakes and results in structural failure. The structure used in this study was in the form of a low-rise building which was studied by placing the building in 99 major cities in Indonesia with a class of SC, SD and SE soil sites. This study uses a time history analysis method in assessing the inter-floor displacement of structures when receiving 3 earthquake histories in each city and the class of soil sites. The earthquake recordings used in the study were obtained from the peerberkeley.edu website which was then adjusted for spectrum response in each city and soil site class with the help of the SeismoMatch program. The earthquake recordings used were the Parkfield earthquake (1966), Parkfield (1996), and Southern Calif (1952) for SC soil, Humbolt Bay earthquake (1937), Imperial Valley (1938), and Northwest Calif (1941) for SD soil, and earthquake Imperial Valley-06 (1979), Youtnville (2000), and Imperial Valley-07 (1979) for soil SE. This study uses the SAP2000 version 21 program in modeling the review structure. Foundation of this study is assumed to be the foundation of foot plate and modeled as a joint springs in the SAP2000 program. The inter-floor displacement obtained from the structure is limited by a permit displacement of 2% from the inter-floor height in accordance with SNI 1726: 2012 Table 16. The results of this study indicate that there are 2 cities with SE land class sites that produce displacement on the ground floor beyond permits, namely in the city of Padang Sidempuan and the city of Sungai Penuh.*

Keywords: Displacement, low-rise buildings, time history, earthquakes

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terdiri dari 34 provinsi dan berbagai kota besar yang seringkali terjadi gempa bumi. Gempa bumi merupakan bencana alam yang menimbulkan getaran yang dikarenakan oleh pelepasan energi secara tiba-tiba dari pecah atau slipnya massa batuan di lapisan kerak bumi, dampak dari getaran gempa bumi ini membuat struktur bangunan menjadi tidak stabil sehingga dapat mengakibatkan keruntuhan pada struktur bangunan. Peraturan Daerah Khusus Ibukota Jakarta Nomor 7 Tahun 2010 menyebutkan bahwa bangunan bertingkat rendah (*low rise building*) merupakan bangunan gedung yang memiliki jumlah lantai bangunan gedung sampai dengan 4 (empat) lantai. Pusat Studi Gempa Nasional tahun 2016 menyebutkan gempa Pidie Jaya 6,5M pada tanggal 7 Desember 2016 mengakibatkan kerusakan infrastruktur dan kerusakan tersebut umumnya terjadi pada bangunan-bangunan 2-3 lantai dengan ketinggian sedang, hal tersebut menimbulkan berbagai pertanyaan terkait keamanan dan kekuatan bangunan tingkat rendah (*low rise*) di wilayah lain yang rawan akan bahaya gempa. Penelitian ini dilakukan terhadap sebuah gedung tingkat rendah (*low rise*) yang ditempatkan pada 99 kota besar di Indonesia dengan tiga jenis kelas situs tanah yang diberi 3 rekaman gempa dengan analisis riwayat waktu dan dibantu oleh *software* SAP2000 untuk mendesain dan menganalisis perpindahan struktur. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk memperoleh tingkat keamanan struktur bangunan tingkat rendah (*low rise*) apabila diletakkan pada 99 kota besar di Indonesia dengan 3 kelas situs tanah sesuai Peta Gempa Indonesia 2017 dengan analisis riwayat waktu, dan memperoleh persentase ketidakamanan struktur dari parameter perpindahan yang melebihi batasan izin.

Anggen dkk. (2014) melakukan penelitian pada gedung 18 lantai di daerah Karanganyar dilakukan menggunakan analisis dinamik dengan bantuan program ETABS dengan tujuan memperoleh kinerja struktur yang berdasarkan nilai *drift* dan *interstory drift* yang dipengaruhi gempa rencana dan gempa aktual, berbeda dengan Sari dkk. (2013) yang melakukan penelitian pada gedung 23 lantai

dengan tujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur yang ditinjau berdasarkan *displacement*, *drift*, dan *base shear* menggunakan metode analisis riwayat waktu, sedangkan Bayyinah dan Faimun (2017) melakukan penelitian dengan membandingkan antara analisis respon spektra dan riwayat waktu sesuai dengan SNI 1726:2012 dalam mendesain gedung 13 lantai di daerah Padang dengan bantuan program SAP2000 untuk memodelkan struktur. Pratiwi dan Widodo (2017) melakukan penelitian pada gedung tidak beraturan 9 lantai di wilayah Yogyakarta dengan membandingkan antara analisis respon spektrum dan analisis dinamik riwayat waktu menggunakan program ETABS, penelitian ini menggunakan beberapa rekaman gempa diantaranya gempa El Centro 1979 (frekuensi tinggi), El Centro 1940 (frekuensi menengah), dan gempa Duzce (frekuensi rendah) yang disesuaikan dengan respon spektra kota Yogyakarta. Penelitian Anggen dkk. (2014) menggunakan dua analisis dinamik sebagai pembanding yaitu riwayat waktu dan statik ekuivalen pada gempa rencananya, analisis riwayat waktu pada gempa rencana digunakan 7 gempa aktual yang telah dipilih yaitu gempa Taiwan, gempa Superstition, gempa Parkfield, gempa Northridge, gempa Imperial Valley, gempa Victoria, dan gempa Chalfant Vally, sedangkan Bayyinah dan Faimun (2017) mendesain gedung menggunakan analisis respon spektra yang kemudian desain gedung tersebut dievaluasi menggunakan analisis riwayat waktu dengan 3 rekaman gempa dan kemudian diambil data gempa yang paling besar diantara gempa Kobe (Jepang, 1995), Imperial Valley (California, 1979), dan gempa Tabas (Iran, 1978). Sari dkk. (2013) menggunakan 4 rekaman gempa yaitu gempa El Centro, gempa Kobe, gempa Hokkaido dan gempa Sanriku yang dibantu oleh program ETABS dalam menganalisis struktur sehingga didapatkan nilai perpindahan, *base shear*, dan *drift* pada struktur tersebut jika diberikan 4 rekaman gempa. Hasil akhir dari penelitian Anggen dkk. (2014) yaitu analisis yang diakibatkan gempa rencana memperoleh struktur aman dan termasuk dalam kategori *immediate occupancy*, sedangkan analisis yang diakibatkan gempa aktual terdapat struktur yang tidak aman yaitu pada Lantai 1 – Lantai

Atap dan struktur termasuk dalam kategori *damage control* terjadi pada gempa Elcentro, Struktur tidak aman pada Lt 10 – Lt Atap tetapi masih termasuk dalam kategori *immediate occupancy* terjadi pada gempa Northridge, dan struktur aman termasuk dalam kategori *immediate occupancy* terjadi pada gempa Mentawai, sedangkan dari penelitian Sari dkk. (2013) didapatkan hasil dari kontrol *displacement* bahwa jika struktur gedung dianalisis dengan masing-masing rekaman gempa, maka *displacement* yang ditimbulkan masih memenuhi batas *displacement* maksimum dan hasil dari control *base shear* didapatkan hasil bahwa jika struktur gedung dianalisis dengan 4 (empat) rekaman gempa, *base shear* yang ditimbulkan memenuhi syarat *base shear* minimum dan hasil dari penelitian Bayyinah dan Faimun (2017) dengan analisis respon spektra didapatkan simpangan struktur aman dan tidak melebihi simpangan ijin, kemudian dievaluasi dengan analisis riwayat waktu dan struktur tersebut masih termasuk dalam kategori aman, akan tetapi gempa Imperial Valley pada simpangan arah x melebihi simpangan respon spektra dan simpangan arah y di beberapa lantai juga melebihi simpangan respon spektra. Hasil akhir dari penelitian Pratiwi dan Widodo (2017) diperoleh Nilai *displacement* akibat beban respons spektrum mempunyai nilai yang lebih kecil dari beban gempa dinamik riwayat waktu El Centro 1940 (frekuensi menengah), simpangan antar lantai akibat beban respons spektrum mempunyai nilai yang lebih kecil dari beban gempa El Centro 1940 (frekuensi menengah). Afriandini dan Saputro (2018) melakukan penelitian pada gedung beton bertulang 7 lantai yang diletakkan pada kelas situs tanah SD di 6 ibukota provinsi di Pulau Jawa yang berpotensi terjadinya gempa seperti kota Jakarta, Banten, Bandung, Semarang, Yogyakarta, dan Surabaya, berbeda dengan Nurhadi dkk. (2014) yang melakukan penelitian mengenai evaluasi kinerja gaya gempa pada gedung 12 lantai di wilayah Karanganyar dengan analisis *pushover* menggunakan bantuan program ETABS, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja gedung berdasarkan hubungan *base shear* dengan *displacement* pada kurva *pushover* dan kurva *seismic demand*.

Pemodelan dalam penelitian Afriandini dan Saputro (2018) dibantu dengan program SAP2000 dan metode analisis menggunakan metode statik ekuivalen. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari perubahan peraturan dari SNI 03-1726-2002 menjadi SNI 1726:2012 dimana peraturan tersebut merupakan peraturan tentang ketahanan terhadap gempa di Indonesia, dengan gaya geser dasar seismik dan simpangan antar lantai sebagai tolak ukur dari penelitian ini. Hasil dari analisis yang telah dilakukan Afriandini dan Saputro (2018) didapatkan nilai gaya geser dasar seismik dan simpangan antar lantai pada struktur yang diletakkan pada 6 kota tersebut menunjukkan nilai yang lebih besar jika menggunakan persamaan SNI 1726:2012 dibandingkan menggunakan persamaan SNI 1726:2002, sedangkan hasil akhir dari penelitian Nurhadi dkk. (2014) diperoleh struktur gedung 12 lantai di wilayah Karanganyar tersebut dinyatakan aman terhadap syarat evaluasi kinerja batas layan dan batas ultimit sesuai ATC-40. Agus dan Gushendra (2015) melakukan perbandingan analisa struktur pada gedung 7 (tujuh) lantai yang berfungsi sebagai gedung perkantoran di Padang berdasarkan SNI 1726:2012 dengan beban gempa dihitung secara analisis statik ekuivalen pemodelan struktur dalam 3D dianalisa dengan program SAP2000 Versi 14, berbeda dengan Purba (2014) yang melakukan perbandingan kinerja struktur gedung ketidakberaturan horizontal dan gedung beraturan dilihat dari *displacement*, *drift ratio*, *base shear*, level kinerja berdasarkan ATC-40, perbedaan berat beton dan tulangan, penelitian ini menggunakan metode statik ekuivalen dalam menganalisis struktur gedung dengan menggunakan bantuan program SAP2000. Hasil penelitian Agus dan Gushendra (2015) menunjukkan bahwa simpangan antar lantai pada masing-masing model struktur masih dalam batas izin, dengan perpindahan (*displacement*) dan gaya dalam struktur open frame lebih besar dari model struktur portal yang menggunakan bresing dan dinding geser, sehingga didapatkam model struktur menggunakan bresing dan dinding geser merupakan model struktur yang efektif, karena *displacement* dan gaya dalam elemen struktur yang lebih kecil dibandingkan model struktur

open frame dalam menahan beban gempa, sedangkan hasil penelitian Purba (2014) menunjukkan *displacement* terbesar untuk arah-x yaitu pada gedung tidak beraturan model B dimana persentase selisih terhadap gedung beraturan adalah 32,57% dan untuk arah-y yaitu gedung tidak beraturan model A dengan persentase selisih 27,45%. Haryanto dkk. (2015) melakukan kajian kinerja model struktur gedung 5 (lima) lantai pada kondisi tanah keras di wilayah Banyumas akibat beban gempa SNI 03-1726-2002 dan SNI 1726:2012 menggunakan program SAP2000 dengan analisis beban dorong (*pushover*), berbeda dengan Samanta dan Swain (2019) melakukan penelitian analisis kerentanan seismik terhadap bangunan beton bertulang 3 lantai, 6 lantai dan 9 lantai di Patna India menggunakan program SAP2000 dengan dan tanpa SSI (*Soil Structure Interaction*). Hasil yang didapatkan dari penelitian Samanta dan Swain (2019) yaitu periode getaran fundamental untuk model SSI adalah 1,5 sampai 2 kali lebih tinggi dari model tanpa SSI, Puncak perpindahan total lantai yang diperoleh dari model tanpa SSI jauh lebih rendah dibandingkan dengan model SSI, Akselerasi lantai puncak dan nilai percepatan lantai rata-rata yang diperoleh oleh model SSI menurun sekitar 60% dan 50%, dibandingkan dengan model tanpa SNI untuk bangunan rendah dan menengah, tapi untuk bangunan bertingkat tinggi lantai percepatan puncak dan percepatan rata-rata lantai untuk model SSI meningkat hingga 300% dan 50%, secara berurutan dibandingkan dengan model tanpa SSI, sedangkan hasil yang didapatkan dari penelitian Haryanto dkk. (2015) menunjukkan bahwa terjadi peningkatan gaya geser dasar sebesar 1,48% pada model struktur gedung saat tercapai titik kinerja (*performance point*), *displacement* yang terjadi mengalami peningkatan sebesar 19,61% sedangkan daktilitas mengalami penurunan sebesar 43,14% dan kinerja model struktur gedung tidak mengalami perubahan yaitu tetap pada level Immediate Occupancy dimana tidak terdapat kerusakan yang berarti pada struktur, kekuatan dan kekakuannya kira-kira hampir sama dengan kondisi sebelum gempa. Soelarso dan Baehaki (2017) melakukan evaluasi simpangan struktur pada gedung 3 lantai yang dilakukan *re-design* dengan penambahan 3 lantai di atasnya

menggunakan metode analisis statik ekuivalen dan analisis dinamik repon spektrum dengan bantuan program ETABS, berbeda dengan Putera dkk. (2018) yang melakukan evaluasi perbandingan simpangan struktur SRPM 10 lantai dengan tiga model struktur yang berbeda yaitu 1 model strktur tanpa dinding geser, dan 2 model struktur dengan dinding geser (model dinding geser *solid element* dan model dinding geser *line element*), penelitian ini menggunakan analisis respon spektrum dan dibantu dengan program SAP2000. Hasil dari penelitian Soelarso dan Baehaki (2017) menunjukkan simpangan maksimum yang terjadi sebesar 298,65 mm akibat beban gempa arah X, 249,59 mm akibat beban gempa arah Y, nilai simpangan tersebut telah melampaui batas simpangan yang diizinkan yaitu sebesar 186 mm, sehingga struktur existing tidak mampu menahan beban yang bekerja akibat penambahan lantai sesuai standar perancangan SNI 1726:2012, sedangkan hasil dari penelitian Putera dkk. (2018) menunjukkan bahwa akibat dari perbedaan cara pemodelan elemen struktur maka akan terjadi perbedaan pada perioda getar struktur, gaya geser dasar dan gaya-gaya dalam, perbedaan juga terjadi pada lamanya waktu *run analysis* pada program analisa struktur.

2. Dasar Teori

Beban Gravitasi

Penelitian ini menggunakan beberapa standarisasi dan spesifikasi yang terdapat pada peraturan Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk menentukan beban gravitasi yang dibutuhkan dalam perencanaan gedung. Beban gravitasi tersebut meliputi beban mati, beban hidup dan beban gempa. Standarisasi dan spesifikasi yang digunakan berupa SNI 03-1727-1989 mengenai Pedoman Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung, SNI 1727:2013 mengenai beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain dan SNI 1726:2012 tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung.

a. Beban Mati

Beban mati adalah berat dari semua bagian suatu struktur bangunan yang bersifat tetap, termasuk beban tambahan seperti beban

finishing, peralatan tetap, serta mesin-mesin yang menyatu terhadap struktur tersebut

b. Beban Hidup

Beban hidup adalah beban yang berasal dari pengguna atau penghuni bangunan atau struktur tersebut, termasuk beban-beban dari barang-barang atau mesin yang dapat berpindah, tidak termasuk beban konstruksi dan beban lingkungan seperti beban hujan, beban angin, beban gempa, beban banjir, ataupun beban mati.

c. Beban Gempa

Beban gempa adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada gedung atau bagian gedung dan menirukan pengaruh gerakan tanah akibat gempa yang terjadi (PPURG, 1987). Beban gempa menimbulkan gaya-gaya vertikal, horizontal, atau kombinasi antara gaya vertikal dan gaya horizontal.

Analisis Riwayat Waktu

Pembebanan gempa pada penelitian ini dihitung berdasarkan SNI 1726:2012 dan Peta Gempa 2017 yang disesuaikan dengan Google Maps untuk mendapatkan parameter S_s dan S_l pada setiap kotanya. Analisis gempa yang digunakan pada penelitian ini ialah analisis riwayat waktu dengan 3 (tiga) rekaman gempa yang diperoleh dari *website peer.berkeley.edu* dengan cara menginput data-data gempa seperti *magnitude*, jarak *epicenter*, jarak *hypocenter*, V_s dari 3 kelas situs tanah, serta durasi gempa yang telah diperoleh dari Buku Peta Gempa 2017 dan berbagai informasi dari media massa, dari *website peer.berkeley.edu* ketiga rekaman gempa tersebut dianalisis menggunakan program *Seismomatch* dengan tujuan untuk mengkonvergenkan antara rekaman gempa yang telah didapatkan dengan respon spektrum pada 99 kota besar di Indonesia.

Simpangan Antar Lantai

Simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) bisa dihasilkan dari software SAP2000. Simpangan antar lantai tidak boleh melebihi simpangan antar lantai ijin (Δ_a) menurut kategori risiko struktur tersebut seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Simpangan Antar Lantai Ijin (BSN,2012)

Tipe struktur	Kategori Risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat/kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai tingkat.	$0,025 h_{sx}$	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever dengan batu bata	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$
Struktur dinding geser dengan batu bata lainnya	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$	$0,007 h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020 h_{sx}$	$0,015 h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara sistematis dengan tahapan yang teratur dan jelas guna mendapatkan hasil sesuai dengan yang diharapkan sehingga penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahapan sebagai berikut.

a. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan untuk penelitian ini berupa data struktur dan menentukan 99 kota besar di Indonesia yang kemudian mencari nilai S_s (percepatan spektrum respons pendek) dan S_l (percepatan spektrum respons 1 detik) berdasarkan Peta Gempa Indonesia 2017.

b. Studi Pustaka

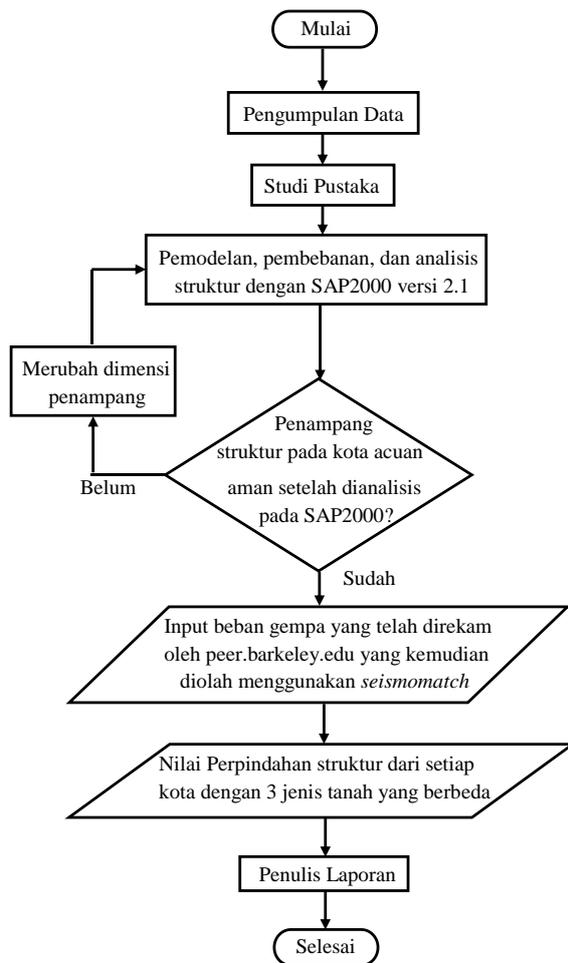
Studi pustaka dilakukan untuk mencari referensi yang berkaitan dengan penelitian ini, seperti peraturan-peraturan, jurnal, bahkan laporan penelitian.

c. Pemodelan dan Pembebanan

Pada tahap ini dilakukan pemodelan menggunakan software SAP2000 versi 21 dari gambar kerja yang telah dimiliki. Karena bangunan ini merupakan bangunan tingkat rendah, maka digunakan *joint springs* sebagai tumpuan struktur yang dimodelkan, dengan koefisien *springs* yang berbeda pada setiap kelas situs tanah.

d. Nilai Perpindahan Struktur dan Penulisan Laporan

Setelah dilakukan analisis struktur dari pemodelan pada program SAP2000 didapatkan hasil mentah output perpindahan yang kemudian diolah secara manual menggunakan program Microsoft Excel. Data output yang telah diolah oleh program Microsoft Excel tersebut disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan pembaca melihat nilai *displacement* pada setiap kota dengan 3 kelas situs tanah yang berbeda. Setelah didapatkan hasil perpindahan pada setiap kota maka dilakukan penulisan laporan tugas akhir. *Flowchart* tahapan penelitian pada tugas akhir ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 *Flowchart* garis besar tahapan penelitian

Data Teknis Bangunan

Bangunan yang digunakan pada penelitian ini yaitu gedung dengan struktur beton bertulang 3 lantai dengan tinggi 12,9 meter dan berfungsi sebagai gedung

perkantoran pemerintahan. Data spesifik gedung ini yaitu menggunakan mutu beton (f_c') 25 MPa, mutu baja tulangan yang digunakan sebesar 400 MPa untuk tulangan baja > 12 mm dan 240 MPa untuk tulangan baja < 12 mm dan untuk dimensi elemen struktur penelitian ini ialah sebagai berikut.

- a. Dimensi kolom
 - K1 = 820 mm × 820 mm
 - K2 = 700 mm × 700 mm
- b. Dimensi balok
 - B1 = 650 mm × 700 mm
 - B2 = 250 mm × 450 mm
 - Balok Sloof 1 = 500 mm × 800 mm
 - Balok Sloof 2 = 200 mm × 400 mm
- c. Plat lantai yang digunakan setebal 120 mm

Penentuan Kontanta Pegas (Springs)

Jenis tumpuan pada SAP2000 yang digunakan dalam penelitian ini ialah tumpuan pegas (*joint springs*), tumpuan ini diasumsikan sebagai pondasi telapak yang biasanya digunakan pada bangunan bertingkat rendah. Berikut ini merupakan langkah-langkah perhitungan untuk memperoleh nilai konstanta pegas.

- a. Penentuan Nilai SPT

Salah satu data yang digunakan dalam menentukan koefisien pegas ialah nilai SPT (*Standard Penetration Test*) pada setiap kelas situs tanah. Pada penelitian ini nilai SPT didapatkan dari SNI 1726:2012 Tabel 3.

$$\begin{aligned}
 N_{SPT\ SC} &= 51 \\
 N_{SPT\ SD} &= 32 \\
 N_{SPT\ SE} &= 14
 \end{aligned}$$

- b. Penentuan Nilai Daya Dukung Tanah

N_{SPT} pada setiap kelas situs tanah akan digunakan untuk menentukan nilai daya dukung tanah (Q_u).

$$Q_u = 4,5769 N \quad (1)$$

dengan N adalah nilai SPT, (Gunawan, 2014).

$$\begin{aligned}
 Q_u \text{ tanah SC} &= 4,5769 \times 51 \\
 &= 233,4219 \text{ kg/cm}^2 \\
 &= 22.890,86876 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_u \text{ tanah SD} &= 4,5769 \times 32 \\
 &= 146,4608 \text{ kg/cm}^2 \\
 &= 14.362, 89804 \text{ kN/cm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_u \text{ tanah SE} &= 4,5769 \times 14 \\
 &= 64,0766 \text{ kg/cm}^2
 \end{aligned}$$

$$= 6.283,767894 \text{ kN/cm}^2$$

c. Penentuan Konstanta Pegas Vertikal

Pondasi yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk persegi, sehingga dibutuhkan penentuan diameter pondasi guna menentukan konstanta pegasnya.

$$A_p = P \times L \quad (2)$$

dengan A_p adalah luas pondasi, P adalah panjang pondasi, dan L adalah lebar pondasi.

$$\begin{aligned} A_p &= 1500 \times 1500 \\ &= 2.250.000 \text{ mm}^2 \\ &= 2,25 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$D = \sqrt{(4 A_p) \times \pi} \quad (3)$$

dengan D adalah diameter pondasi.

$$\begin{aligned} D &= \sqrt{(4 \cdot 2.250.000) \times 3.14} \\ &= 1692,568751 \text{ mm} \\ &= 1,6926 \text{ m} \end{aligned}$$

Diameter pondasi yang telah diperoleh kemudian digunakan untuk menentukan konstanta pegas vertikal sebagai berikut.

Diketahui $f'_c = 25 \text{ MPa}$

$$E_p = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

Dengan E_p adalah modulus elastisitas dan f'_c adalah kuat mutu beton.

$$\begin{aligned} E_p &= 4.700 \sqrt{25} \\ &= 23.500 \text{ MPa} = 23.500.000 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$S = \frac{D}{100} + \frac{Q_u \cdot L}{A_p \cdot E_p} \quad (5)$$

$$K_p = \frac{Q_u}{S} \quad (6)$$

Dengan S adalah *corresponding settlement* dari pondasi, Q_u adalah daya dukung tanah dan K_p adalah konstanta pegas vertikal. Berikut ini merupakan perhitungan konstanta pegas vertikal pada masing-masing kelas situs tanah (Winkler, 1867).

Tanah SC

$$S = \frac{1,6926}{100} + \frac{22.890,86876 \cdot 1,5}{2,25 \cdot 23.500.000}$$

$$= 0,017575074 \text{ m}$$

$$K_p = \frac{22.890,86876}{0,017575074}$$

$$= 1.302.462,166 \text{ kN/m}$$

Tanah SD

$$S = \frac{1,6926}{100} + \frac{14.362,89804 \cdot 1,5}{2,25 \cdot 23.500.000}$$

$$= 0,017333146 \text{ m}$$

$$K_p = \frac{14.362,89804}{0,017333146}$$

$$= 828.637,7077 \text{ kN/m}$$

Tanah SE

$$S = \frac{1,6926}{100} + \frac{6.283.767894 \cdot 1,5}{2,25 \cdot 23.500.000}$$

$$= 0.01710395 \text{ m}$$

$$K_p = \frac{6.283.767894}{0.01710395}$$

$$= 367.386.9333 \text{ kN/m}$$

d. Konstanta Pegas Horizontal

Perhitungan konstanta pegas horizontal membutuhkan nilai modulus elastisitas (E) dan *poisson ratio* (ν) dalam persamaannya. Nilai modulus elastisitas (E) dan nilai *poisson ratio* (ν) per kelas situs tanah yang telah didapatkan ialah sebagai berikut.

$$E_{SC} = 90.000$$

$$E_{SD} = 60.000$$

$$E_{SE} = 40.000$$

$$\nu_{SC} = 0,3$$

$$\nu_{SD} = 0,15$$

$$\nu_{SE} = 0,25$$

Nilai-nilai tersebut kemudian dihitung kedalam persamaan dan menghasilkan nilai koefisien pegas horizontal (K_h) per kelas situs tanah sebagai berikut.

$$K_h = \frac{E}{I_p (1-\nu^2) B} \quad (7)$$

dengan I_p adalah koefisien bentuk (untuk lingkaran ($I_p = 0,79$)) dan B adalah diameter pondasi (Terzaghi, 1943).

$$K_h \text{ tanah SC} = \frac{90000}{0,79 (1-0,3^2) \cdot 1.692568751}$$

$$= 73965.24625 \text{ kN/m}$$

$$K_h \text{ tanah SD} = \frac{60000}{0,79 (1-0,15^2) \cdot 1.692568751}$$

$$= 45905.11447 \text{ kN/m}$$

$$K_h \text{ tanah SE} = \frac{60000}{0,79 (1-0,25^2) \cdot 1.692568751}$$

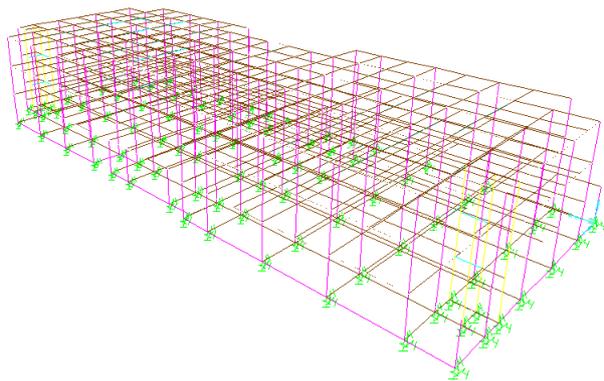
$$= 31909.15512 \text{ kN/m}$$

Nilai konstanta pegas vertikal (K_p) dan konstanta pegas horizontal (K_h) digunakan sebagai data *joint springs* pada SAP2000. Nilai K_p digunakan sebagai data *spring* arah X dan Y, sedangkan nilai K_h sebagai data *spring* arah Z.

Pemodelan Struktur

Penelitian ini menggunakan program SAP2000 versi 21 untuk pemodelan dan menganalisis struktur. Pondasi yang digunakan diasumsikan sebagai pondasi telapak yang dimodelkan sebagai *joint springs* (tumpuan pegas) pada program SAP2000 dengan

koefisien *springs* yang berbeda pada setiap kelas situs tanah. Pemilihan *joint springs* sebagai pemodelan pondasi ini karena menyesuaikan ketinggian gedung dan jenis pondasi telapak di lapangan yang tidak tetap/memiliki perlawanan dari arah horizontal maupun vertikal. Semua beban yang telah dihitung diinput kedalam SAP2000 termasuk 3 rekaman gempa setiap kelas situs tanah dengan analisis riwayat waktu, setelah tahap pemodelan dan pembebanan telah selesai, kemudian lakukan analisis struktur. Hasil dari analisis struktur tersebut didapatkan output yang diinginkan berupa *displacement* pada setiap joint struktur, pemodelan struktur pada program SAP2000 ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Pemodelan Struktur pada Program SAP2000

4. Hasil dan Pembahasan

Analisis Displacement (Perpindahan)

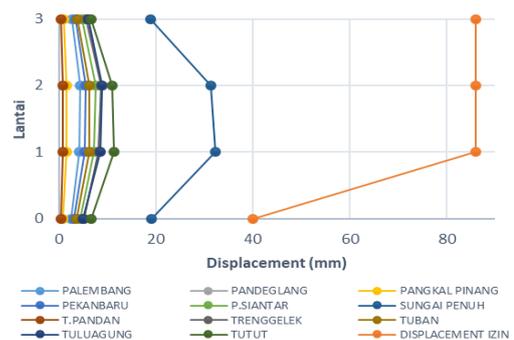
Displacement merupakan perpindahan setiap lantai pada sebuah struktur yang diukur dari lantai paling bawah/dasar. Displacement ini didapatkan dari hasil analisis struktur pada SAP2000 yaitu berupa parameter *U1* dan *U2* yang kemudian dilakukan pengolahan data untuk mendapatkan nilai perpindahan maksimal pada setiap sudut antar lantai struktur tersebut pada setiap kota dan 3 kelas situs tanah.

Simpangan Izin

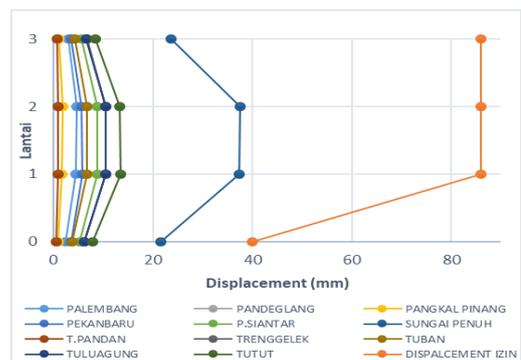
Simpangan izin ini dihitung sesuai dengan SNI 1726:2012 Tabel 16 dimana dalam peraturan ini terdapat batasan untuk simpangan antar lantai yaitu tidak boleh melebihi $0,020h_x$. Pada Tabel 2 berikut merupakan nilai yang diperoleh untuk simpangan izin antar lantai.

No.	Lantai	Simpangan Izin (mm)
1	Dasar	40
2	1	120
3	2	180
4	3	240

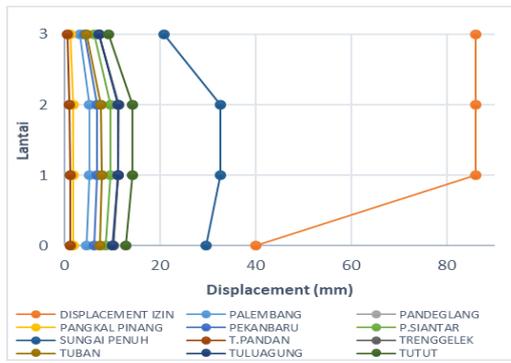
Hasil akhir perpindahan pada 99 kota disajikan dalam 9 grafik per kelas situs tanah dan arah gempanya, dalam 1 grafik tersebut terdapat 11 kota tinjauan, dimana grafik tersebut merupakan hubungan antara perpindahan dengan jumlah lantai bangunan dan batas simpangan izin yang digunakan sebagai acuan apakah bangunan tersebut aman atau tidak jika diletakkan pada kota tertentu, grafik perpindahan setiap kelas situs tanah tersebut ditunjukkan pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 8. Nilai perpindahan dalam penelitian ini juga disajikan dalam bentuk tabel dengan data perpindahan pada setiap kota yang diurutkan dari nilai perpindahan terkecil sampai dengan nilai perpindahan terbesar, nilai perpindahan setiap kota pada tabel tersebut diberikan gradasi warna yang berbeda pada setiap kenaikan perpindahan 10 mm, tabel urutan kota berdasarkan nilai perpindahan tersebut ditunjukkan pada Tabel 3 sampai dengan Tabel 8.



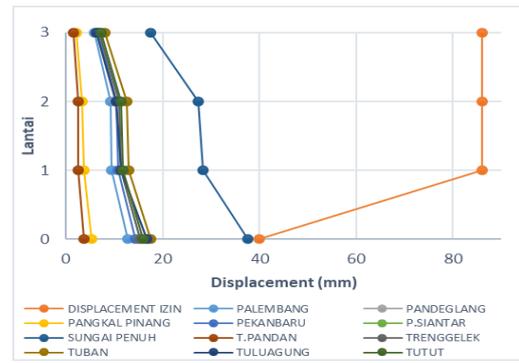
Gambar 3 Grafik perpindahan kelas situs SC arah X



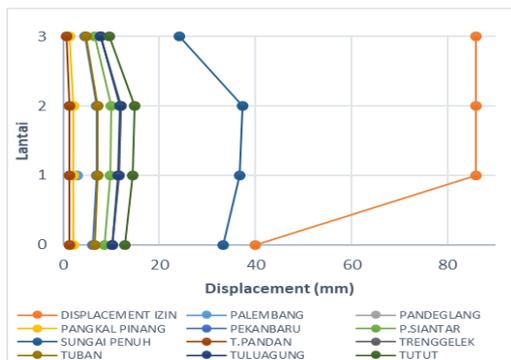
Gambar 4 Grafik perpindahan kelas situs SC arah Y



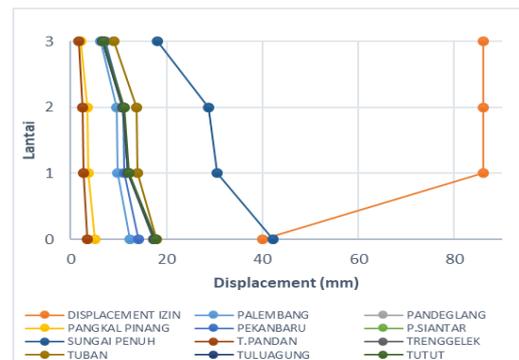
Gambar 5 Grafik perpindahan kelas situs SD arah X



Gambar 7 Grafik perpindahan kelas situs SE arah X



Gambar 6 Grafik perpindahan kelas situs SD arah Y



Gambar 8 Grafik perpindahan kelas situs SE arah Y

Tabel 3 Urutan Kota berdasarkan Nilai Perpindahan pada Tanah SC Arah X

No.	Nama Kota dan Nilai Perpindahan										
1	Tanjung Pandan	Pangkal Pinang	Samarinda	Makassar	Dumai	Palembang	Jambi	Jepara	Pekanbaru	Pekalongan	Pamekasan
	1.309	2.497	2.739	2.871	6.6275	6.809	7.6725	8.0685	8.613	9.4325	9.4325
2	Kendari	Indramayu	Blora	Pemalang	Tuban	Singkarang	Kudus	Tegal	Fakfak	Tangerang Selatan	Pasuruan
	9.4765	9.5975	9.658	9.801	9.856	9.856	9.955	10.0705	10.142	10.219	10.384
3	Probolinggo	Langsa	Cirebon	Bondowoso	Situbondo	Purwodadi	Metro	Wonosobo	Medan	Banyuwangi	Purwakarta
	10.406	10.571	10.8405	10.978	11.132	11.1705	11.253	11.275	11.319	11.396	11.396
4	Jakarta Timur	Jakarta Pusat	Pematang Siantar	Serang	Bekasi	Cilegon	Jakarta Barat	Surakarta	Jember	Jakarta Utara	Ngawi
	11.539	11.671	11.671	11.6875	11.748	11.8415	11.946	11.9625	11.979	11.9845	12.133
5	Tangerang	Purwokerto	Bima	Jakarta Selatan	Genteng	Malang	Magelang	Surabaya	Ambon	Madiun	Tomohon
	12.1495	12.1715	12.21	12.254	12.32	12.364	12.452	12.4575	12.5455	12.6225	12.738
6	Depok	Brebes	Kediri	Banjarnegara	Kebumen	Tasikmalaya	Bogor	Denpasar	Cilacap	Pandeglang	Ponorogo
	12.76	12.7655	12.914	13.0625	13.189	13.3265	13.332	13.332	13.4475	13.4585	13.464
7	Trenggalek	Bandar Lampung	Tulauagung	Kupang	Lahat	Lumajang	Semarang	Tidore Kepulauan	Salatiga	Mataram	Mojokerto
	13.475	13.486	13.5575	13.838	13.871	13.8765	13.959	14.2835	14.905	14.9215	15.389
8	Manado	Cimahi	Pagar Alam	Tutut	Lhokseumawe	Kotamobagu	Pacitan	Padang	Bandung	Sukabumi	Sorong
	15.4275	17.006	17.8695	18.128	19.008	19.338	20.2565	22.5995	23.089	23.342	23.826
9	Yogyakarta	Gorontalo	Banda Aceh	Gunung Sitoli	Bengkulu	Palu	Bukittinggi	Tual	Jayapura	Sungai Penuh	Padang Sidempuan
	27.0985	28.171	30.4865	30.5965	32.2245	34.881	37.1965	38.3295	48.6915	51.4635	54.571



Gambar 9 Petunjuk Warna Nilai Perpindahan Tanah SC Arah X

Tabel 4 Urutan Kota berdasarkan Nilai Perpindahan pada Tanah SC Arah Y

No.	Nama Kota dan Nilai Perpindahan										
1	Tanjung Pandan 0.5555	Pangkal Pinang 0.9405	Samarinda 0.968	Makassar 0.9845	Dumai 2.4145	Palembang 2.4585	Jambi 2.7665	Jepara 3.08	Pekanbaru 3.476	Indramayu 3.6795	Tuban 3.7455
2	Pamekasan 3.8885	Pekalongan 3.8885	Kendari 3.9765	Bloora 4.0645	Pemalang 4.07	Singkang 4.1855	Kudus 4.191	Situbondo 4.213	Fakfak 4.2405	Tegal 4.323	Pasuruan 4.4385
3	Probolinggo 4.5155	Langsa 4.5815	Cirebon 4.697	Bondowoso 4.7135	Surabaya 4.7685	Brebes 4.851	Medan 4.873	Wonosobo 4.9115	Purwodadi 4.917	Metro 4.9335	Banyuwangi 5.148
4	Purwakarta 5.1755	Jakarta Pusat 5.181	Pematang Siantar 5.1865	Bekasi 5.2085	Lumajang 5.225	Semarang 5.2305	Jakarta Timur 5.2525	Serang 5.2745	Jakarta Barat 5.28	Jakarta Utara 5.324	Cilegon 5.346
5	Tangerang Selatan 5.401	Jember 5.4065	Ngawi 5.4065	Jakarta Selatan 5.412	Tidore Kepulauan 5.4285	Surakarta 5.434	Purwokerto 5.4395	Tangerang 5.4505	Malang 5.544	Magelang 5.577	Ambon 5.632
6	Madiun 5.6375	Bima 5.654	Salatiga 5.6595	Genteng 5.665	Mataram 5.665	Depok 5.709	Kupang 5.7145	Tomohon 5.731	Mojokerto 5.8135	Manado 5.8685	Kediri 5.907
7	Banjar 5.9565	Bogor 5.9785	Tasikmalaya 5.995	Kebumen 6.017	Denpasar 6.0885	Tuluagung 6.0995	Pandeglang 6.1105	Trenggalek 6.116	Ponorogo 6.116	Cilacap 6.1215	Bandar Lampung 6.2645
8	Lahat 6.435	Lhokseumawe 7.073	Kotamobagu 7.2765	Cimahi 7.4415	Pacitan 7.579	Tutut 7.7935	Pagar Alam 7.821	Padang 8.47	Bandung 10.1365	Sukabumi 10.4225	Sorong 10.6095
9	Yogyakarta 11.4235	Bengkulu 12.1	Gorontalo 12.188	Gunung Sitoli 12.8315	Palu 13.0075	Banda Aceh 13.0515	Bukittinggi 13.332	Tual 15.895	Jayapura 20.482	Sungai Penuh 21.505	Padang Sidempuan 22.9405



Gambar 10 Petunjuk Warna Nilai Perpindahan Tanah SC Arah Y

Tabel 5 Urutan Kota berdasarkan Nilai Perpindahan pada Tanah SD Arah X

No.	Nama Kota dan Nilai Perpindahan										
1	Tanjung Pandan 1.243	Samarinda 1.672	Pangkal Pinang 1.793	Makassar 2.1175	Dumai 4.2295	Palembang 4.7355	Jambi 5.555	Pekanbaru 6.1765	Jepara 6.292	Indramayu 6.457	Pekalongan 6.6495
2	Pamekasan 6.677	Bloora 6.9135	Pemalang 6.9135	Fakfak 7.172	Kudus 7.2215	Singkang 7.3975	Tuban 7.5185	Tegal 7.5405	Pasuruan 7.6835	Probolinggo 7.744	Kendari 7.7495
3	Langsa 7.7935	Cirebon 7.909	Bondowoso 8.074	Situbondo 8.173	Medan 8.2225	Wonosobo 8.3765	Purwodadi 8.3985	Metro 8.415	Pematang Siantar 8.635	Jakarta Pusat 8.646	Bekasi 8.734
4	Purwakarta 8.8275	Banyuwangi 8.833	Jakarta Utara 8.855	Jakarta Timur 8.888	Jakarta Barat 8.899	Serang 8.9375	Ngawi 8.965	Brebes 9.0805	Jakarta Selatan 9.1245	Cilegon 9.1465	Tangerang Selatan 9.163
5	Purwokerto 9.1795	Surakarta 9.1905	Tangerang 9.2015	Jember 9.2345	Magelang 9.2895	Surabaya 9.295	Malang 9.3445	Madiun 9.4325	Depok 9.482	Tomohon 9.636	Kediri 9.68
6	Banjar 9.768	Lumajang 9.8945	Denpasar 9.8945	Kebumen 9.933	Ponorogo 9.955	Tasikmalaya 9.9715	Bogor 10.01	Tuluagung 10.1035	Cilacap 10.12	Bandar Lampung 10.1365	Trenggalek 10.175
7	Pandeglang 10.1915	Semarang 10.208	Kupang 10.296	Tidore Kepulauan 10.373	Lahat 10.4005	Bima 10.4995	Salatiga 10.6425	Genteng 10.6535	Mataram 10.6535	Ambon 10.8295	Mojokerto 10.967
8	Manado 10.978	Kotamobagu 11.506	Pacitan 11.572	Lhokseumawe 12.078	Cimahi 12.672	Tutut 12.8205	Padang 12.9085	Pagar Alam 13.387	Sukabumi 15.367	Bukittinggi 15.5595	Sorong 15.862
9	Bandung 16.0655	Yogyakarta 16.819	Gorontalo 18.271	Bengkulu 19.2775	Banda Aceh 19.492	Gunung Sitoli 22.792	Palu 24.1725	Tual 24.937	Jayapura 28.0115	Sungai Penuh 29.645	Padang Sidempuan 30.932



Gambar 11 Petunjuk Warna Nilai Perpindahan Tanah SD Arah X

Tabel 6 Urutan Kota berdasarkan Nilai Perpindahan pada Tanah SD Arah Y

No.	Nama Kota dan Nilai Perpindahan										
1	Tanjung Pandan	Samarinda	Makassar	Pangkal Pinang	Dumai	Palembang	Jambi	Pekanbaru	Indramayu	Jepara	Tuban
	1.3255	1.7545	1.9965	2.145	4.3505	4.6695	5.5	6.1545	6.391	6.435	6.4515
2	Pekalongan	Pamekasan	Blora	Pemalang	Fakfak	Kudus	Kendari	Tegal	Singkang	Pasuruan	Probolinggo
	6.622	6.6385	6.8805	6.8805	7.1115	7.1775	7.2325	7.5185	7.5845	7.645	7.711
3	Langsa	Brebes	Cirebon	Surabaya	Bondowoso	Medan	Wonosobo	Purwodadi	Metro	Situbondo	Jakarta Pusat
	7.744	7.744	7.843	7.8815	8.0685	8.1455	8.3545	8.3985	8.3985	8.4865	8.6295
4	Pematang Siantar	Bekasi	Jakarta Utara	Tidore Kepulauan	Banyuwangi	Purwakarta	Jakarta Barat	Jakarta Timur	Ngawi	Serang	Jakarta Selatan
	8.657	8.6955	8.8055	8.833	8.855	8.8605	8.8605	8.9155	8.9155	8.9705	9.1355
5	Purwokerto	Cilegon	Tangerang Selatan	Surakarta	Tangerang	Magelang	Jember	Bima	Salatiga	Mataram	Malang
	9.1355	9.174	9.2015	9.2125	9.218	9.2345	9.2565	9.284	9.317	9.361	9.383
6	Genteng	Depok	Maduin	Manado	Ambon	Tomohon	Kediri	Banjarnegara	Denpasar	Kebumen	Ponorogo
	9.394	9.4325	9.438	9.504	9.537	9.669	9.713	9.757	9.8835	9.911	9.9275
7	Tasikmalaya	Bogor	Tuluagung	Cilacap	Bandar Lampung	Kupang	Semarang	Trenggalek	Pandeglang	Lahat	Lumajang
	10.0595	10.0705	10.1805	10.1915	10.197	10.2025	10.2355	10.2795	10.285	10.4335	10.516
8	Lhokseumawe	Mojokerto	Kotamobagu	Pacitan	Cimahi	Tutut	Padang	Pagar Alam	Bukittinggi	Sukabumi	Sorong
	10.615	11.2145	11.583	11.6435	12.6885	12.8205	13.002	13.4035	15.0095	15.477	15.9555
9	Bandung	Yogyakarta	Gorontalo	Banda Aceh	Bengkulu	Gumung Sitoli	Pahu	Tual	Jayapura	Sungai Penuh	Padang Sidempuan
	16.159	16.907	18.6835	20.174	20.383	24.0735	26.6145	27.6045	31.042	33.352	34.4795



Gambar 12 Petunjuk Warna Nilai Perpindahan Tanah SD Arah Y

Tabel 7 Urutan Kota berdasarkan Nilai Perpindahan pada Tanah SE Arah X

No.	Nama Kota dan Nilai Perpindahan										
1	Makassar	Tanjung Pandan	Pangkal Pinang	Samarinda	Palembang	Dumai	Jambi	Pekanbaru	Jepara	Indramayu	Kendari
	3.432	3.6685	5.225	7.8705	12.749	13.3485	13.728	14.41	14.41	15.1415	15.147
2	Jakarta Selatan	Langsa	Maduin	Purwodadi	Medan	Brebes	Depok	Magelang	Jakarta Barat	Jakarta Timur	Tangerang
	15.2185	15.224	15.224	15.224	15.235	15.257	15.2625	15.2625	15.2625	15.2625	15.2625
3	Purwokerto	Purwakarta	Surakarta	Fakfak	Probolinggo	Pasuruan	Bandar Lampung	Metro	Ngawi	Pematang Siantar	Bogor
	15.268	15.2735	15.2735	15.2845	15.3395	15.3505	15.356	15.3615	15.367	15.367	15.367
4	Bekasi	Kediri	Surabaya	Jakarta Utara	Manado	Tangerang Selatan	Trenggalek	Malang	Mojokerto	Bondowoso	Wonosobo
	15.367	15.367	15.367	15.367	15.367	15.367	15.3725	15.3725	15.3725	15.378	15.378
5	Cirebon	Tidore Kepulauan	Kudus	Tegal	Pemalang	Tutut	Blora	Pekalongan	Singkang	Pamekasan	Lahat
	15.3945	15.4935	15.6475	15.6475	15.8125	15.917	15.9555	16.335	16.357	16.5275	16.7365
6	Situbondo	Pandeglang	Banyuwangi	Cilegon	Tuluagung	Tasikmalaya	Kebumen	Ambon	Jember	Banjarnegara	Kupang
	16.7585	16.775	16.786	16.797	16.797	16.797	16.797	16.797	16.8025	16.8025	16.8025
7	Cilacap	Genteng	Lumajang	Mataram	Tomohon	Serang	Ponorogo	Salatiga	Semarang	Bima	Denpasar
	16.808	16.8135	16.8135	16.8135	16.8135	16.819	16.819	16.819	16.83	16.8355	16.841
8	Tuban	Jakarta Pusat	Lhokseumawe	Kotamobagu	Cimahi	Pagar Alam	Pacitan	Gorontalo	Sukabumi	Padang	Yogyakarta
	17.5065	17.5725	19.162	19.4645	19.6955	20.1245	20.3445	21.2795	21.736	22.077	22.187
9	Sorong	Bandung	Banda Aceh	Bengkulu	Gumung Sitoli	Pahu	Bukittinggi	Jayapura	Sungai Penuh	Tual	Padang Sidempuan
	22.5995	23.43	25.0305	26.9335	27.016	29.1885	29.2325	34.9305	37.587	37.8895	39.138



Gambar 13 Petunjuk Warna Nilai Perpindahan Tanah SE Arah X

Tabel 8 Urutan Kota berdasarkan Nilai Perpindahan pada Tanah SE Arah Y

No.	Nama Kota dan Nilai Perpindahan										
1	Makassar	Tanjung Pandan	Pangkal Pinang	Samarinda	Palembang	Dumai	Jambi	Jepara	Pekanbaru	Jakarta Pusat	Indramayu
	3.5475	3.564	5.0105	7.524	12.4465	12.991	13.288	13.673	14.168	14.718	14.894
2	Fakfak	Pemalang	Kudus	Singkarang	Blora	Pekalongan	Kendari	Situbondo	Pamekasan	Cirebon	Medan
	14.905	15.092	15.1855	15.246	15.4715	15.587	15.6585	16.082	16.2635	17.0995	17.204
3	Madiun	Langsa	Jakarta Selatan	Purwodadi	Jakarta Timur	Brebes	Tangerang	Purwokerto	Jakarta Barat	Depok	Magelang
	17.2205	17.226	17.2315	17.237	17.2425	17.2865	17.2975	17.2975	17.303	17.314	17.325
4	Pasuruan	Purwakarta	Surakarta	Probolinggo	Metro	Bandar Lampung	Bekasi	Surabaya	Tegal	Kediri	Jakarta Utara
	17.325	17.3305	17.3305	17.3415	17.347	17.3525	17.3525	17.358	17.3635	17.3635	17.3635
5	Bogor	Trenggalek	Tangerang Selatan	Ngawi	Manado	Mojokerto	Pematang Siantar	Bondowoso	Malang	Wonosobo	Lahat
	17.369	17.38	17.3855	17.391	17.391	17.3965	17.402	17.4075	17.413	17.413	17.468
6	Pandeglang	Banyuwangi	Cilegon	Tasikmalaya	Tulungagung	Kebumen	Ambon	Jember	Banjarnegara	Cilacap	Kupang
	17.49	17.501	17.5065	17.512	17.5175	17.5175	17.5175	17.523	17.523	17.523	17.5285
7	Genteng	Mataram	Tomohon	Serang	Lumajang	Salatiga	Ponorogo	Semarang	Bima	Denpasar	Tutut
	17.534	17.534	17.534	17.534	17.5395	17.5395	17.545	17.556	17.5615	17.5615	17.7045
8	Tuban	Pacitan	Lhokseumawe	Kotamobagu	Sukabumi	Cimahi	Pagar Alam	Sorong	Padang	Yogyakarta	Gorontalo
	17.8255	19.789	20.2125	20.548	20.8285	20.9715	21.285	21.7745	23.298	23.606	25.025
9	Tidore Kepulauan	Banda Aceh	Bandung	Gunung Sitoli	Bengkulu	Bukittinggi	Palu	Tual	Jayapura	Padang Sidempuan	Sungai Penuh
	26.2955	26.5705	27.5275	30.877	31.229	33.693	33.781	39.4295	39.6385	40.7	42.2235



Gambar 14 Petunjuk Warna Nilai Perpindahan Tanah SE Arah Y

Tabel urutan kota berdasarkan nilai perpindahan pada setiap lantai dan grafik hubungan antara perpindahan dengan jumlah lantai diatas menunjukkan terdapat 2 kota dari 99 kota besar serta 3 kelas situs tanah di Indonesia yang mengalami perpindahan rencana melebihi batas simpangan izin yang sudah ditetapkan yaitu kota Padang Sidempuan dan Kota Sungai Penuh. Kedua kota yang tergolong tidak aman untuk didirikan bangunan tersebut kemudian dihitung persentase ketidak amanannya dengan cara selisih antara nilai perpindahan yang melebihi perpindahan izin dengan nilai batasan simpangan izin dibagi dengan nilai perpindahan izin kemudian dikalikan 100% yang dapat dilihat pada tabel 3, sedangkan persentase tidak aman dari kedua kota tersebut dapat dilihat pada tabel 4 berikut ini.

Tabel 9 Perhitungan Persentase Tidak Aman

Lantai	Simpangan Izin Antar Lantai (Δ_a)	Parameter Perpindahan (D)	Persentase Tidak Aman (%)	Keterangan
3	298	18,0235	-93,952	$(D - \Delta_a) \times 100\%$
2	212	28,798	-86,416	
1	126	30,503	-75,791	
0	40	42,2235	5,559	

Tabel 10 Persentase Tidak Aman Struktur terhadap Beban Gempa

No.	Nama Kota	Kelas Situs Tanah	Persentase Tidak Aman (%)
1	Padang Sidempuan	Tanah SE arah Y	1,75
2	Sungai Penuh	Tanah SE arah Y	5,56

5. Kesimpulan

- Dari hasil penelitian ini didapatkan parameter-parameter hubungan antara perpindahan dengan jumlah lantai bangunan yang menunjukkan bahwa bangunan tersebut aman ditempatkan pada 99 kota besar di Indonesia kecuali pada kota Padang Sidempuan dan kota Sungai Penuh dengan kelas situs tanah SE.
- Kota-kota tersebut melebihi persentase tidak aman sebesar 1,75% untuk kota Padang Sidempuan, dan 5,56% untuk kota Sungai Penuh.

6. Daftar Pustaka

Afriandi, B., dan Saputro, D.N., 2018, Analisis Gaya Geser Dasar Seismik Berdasarkan

- SNI 03-1726-2002 dan SNI 1726:2012 Pada Struktur Gedung Bertingkat, *Jurnal Nasional*, 19, 95-102.
- Agus, dan Gushendra, R., 2015, Perbandingan Analisa Struktur Model Portal *Open Frame*, *Bresing* dan Dinding Geser pada Struktur Gedung Beton Bertulang terhadap Beban Gempa, *Jurnal Momentum*, 17, 6-13.
- Anggen, W.S., Budi, A.S. dan Gunawan, P., 2014, Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat dengan Analisis Dinamik Time History Menggunakan Etabs (Studi Kasus: Hotel Di Daerah Karanganyar), *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 313, 1-8.
- Bayyinah, D.A.L.N. dan Faimun, 2017, Studi Perbandingan Analisis Respon Spektra dan Time History untuk Desain Gedung, *Jurnal Teknik ITS*, 6, 33-38.
- BSN, 2012, SNI 1726:2012: *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 2013, SNI 1727:2013: *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- BSN, 1989, SNI 17277:1989: *Tata Cara Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah Dan Gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Gunawan, S., 2014, Korelasi Nilai CPT dan SPT pada Lokasi Ring Road Utara Yogyakarta. Konferensi Nasional Teknik Sipil 8 (KoNTekS 8). Institut Teknologi Nasional, Bandung, 16-18 Oktober.
- Haryanto, Y., Sudibyo, G. H., dan Wariyatno, N. G., 2015, Kinerja Model Struktur Gedung Lima Lantai pada Kondisi Tanah Keras Di Wilayah Banyumas Akibat Beban Gempa SNI 03-1726-2002 dan SNI 03-1726-2012, *Dinamika Rekayasa*, 11, 80-84.
- Nurhadi, M., Budi, A. S., dan Supardi, 2014, Evaluasi Kinerja Gaya Gempa pada Struktur Gedung Bertingkat dengan Analisis *Pushover* Berdasar Pada Drift dan *Displacement* Menggunakan *Software* Etabs (Studi Kasus : Hotel Di Wilayah Karanganyar), *Matriks Teknik Sipil*, 1.
- Pemerintah Daerah Khusus Ibukota Jakarta, 2010, *Peraturan Daerah Provinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta Nomor 7 Tahun 2010 tentang Bangunan Gedung*, Jakarta.
- Pratiwi, G. A., dan Widodo, 2017, Analisis dan Desain Struktur Beton Bertingkat Banyak Berdasarkan Perbandingan Analisis Respon Spektrum dan Dinamik Riwayat Waktu, *Jurnal Teknisia*, XXII, 281-293.
- Purba, H. L., 2014, Analisis Kinerja Struktur pada Bangunan Bertingkat Beraturan dan Ketidak Beraturan Horizontal sesuai SNI 1726:2012, *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 2, 710-717.
- Pusat Studi Gempa Nasional, 2017, *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*, Bandung: BPPKPUPR.
- Pusat Studi Gempa Nasional, 2017, *Kajian Gempa Pidie Jaya Provinsi Aceh Indonesia 7 Desember 2016 (M6.5)*, Bandung: BPPKPUPR.
- Putera, T. A., Faisal, A., dan Suprayetno, 2018, Evaluasi Perbandingan Simpangan Struktur SRPM Akibat Permodelan Struktur yang Berbeda, *Education Building*, 4, 18-24.
- Samanta, A. dan Swain, A., 2019, Seismic Response and Vulnerability Assessment of Representative Low, Medium and High-rise Buildings in Patna, India, *Structures*, 19, 110-127.
- Sari, D.A.A., Purwanto, E. dan Wibowo, 2013, Evaluasi Kinerja Struktur Pada Gedung Bertingkat dengan Analisis Riwayat Waktu Menggunakan Software Etabs V 9.5 (Studi Kasus : Gedung Solo Center Point), *Matriks Teknik Sipil*, 1, 1-7.
- Soelarso dan Baehaki, 2017, Evaluasi Simpangan Struktur Akibat Penambahan Lantai dengan Metode Analisis Statik dan Dinamik *Response Spectrum* (Studi Kasus: Pembangunan Gedung Dekanat Fakultas Teknik Untirta), *Jurnal Spektran*, 5, 88-95.
- Terzaghi, K., 1943, *Theoretical Soil Mechanics*, USA: John Wiley and Sons.
- Winkler, E., 1867, *Die Lehre Von Elasticitaet Und Festigkeit*, 1st Edn., H. Dominicus, Prague.

