

Kaji Banding Respon Struktur dengan Ketidakberaturan Bentuk Akibat Gaya Gempa Sinusoidal dan *Ground Motion* Dengan Metode *Linear Time History Analysis*

Faisal Irfan Adhitama dan Slamet Widodo

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta 55281, Indonesia

Kata Kunci:

Analisis Riwayat Waktu
Gempa Sinusoidal
Ground Motion
Respon Struktur
Simpangan

Keywords:

Time History Analysis
Sinusoidal Earthquake
Ground Motion
Structure Response
Deflection

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk : (1) Mengetahui ketidakberaturan struktur dengan tipe denah berbentuk “U”; (2) Mengetahui respons struktur model bangunan skala 1 : 50 terhadap gaya gempa rencana dengan pendekatan gelombang sinusoidal frekuensi 1,5 Hz; 2,5 Hz; 3,5 Hz; 4,5 Hz; dan 5,5 Hz; (3) Mengetahui respons struktur model bangunan skala 1 : 50 terhadap gaya gempa rencana dengan pendekatan ground motion North Nagano, Tohoku Forshock, dan Tohoku; (4) Mengetahui perbandingan respons struktur terhadap beban gempa rencana berdasarkan pendekatan pembebanan gempa gelombang sinusoidal dan ground motion. Respons struktur ditinjau dari displacement dan simpangan antar tingkat. Penelitian ini merupakan studi kuantitatif menggunakan metode eksperimental dengan skala 1 : 50. Rencana lokasi pembangunan berada di Imogiri Bantul Yogyakarta dengan pembebanan gempa yang mendekati frekuensi meja getar merupakan gelombang sinusoidal menggunakan frekuensi dominan (f_0) di Imogiri, Bantul, Yogyakarta. Analisis struktur model bangunan menggunakan perangkat lunak analisis dengan metode linear time history analysis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa : (1) Model bangunan gedung terjadi ketidakberaturan struktur horizontal sudut dalam; (2) Model bangunan mampu menahan beban gempa sinusoidal frekuensi 1,5 Hz – 5,5 Hz dengan nilai simpangan antar tingkat terbesar terjadi pada frekuensi 3,5 Hz arah X dengan nilai 0,31 mm dan arah Y dengan nilai 0,19 mm; (3) Pembebanan ground motion, simpangan antar tingkat terbesar arah X terjadi pada gempa North Nagano dengan nilai 0,42 mm, sedangkan arah Y gempa Tohoku dengan nilai 0,18 mm; (4) Model bangunan gedung aman karena simpangan antar tingkat yang terjadi kurang dari simpangan izin berdasarkan SNI 1726:2019.

ABSTRACT

This research aims to: (1) Identify the irregularity of the structure with a “U” shaped plan type; (2) Identify the structural response of the 1:50 scale building model to the earthquake force plan with a sinusoidal wave approach with frequencies of 1,5 Hz; 2,5 Hz; 3,5 Hz; 4,5 Hz; and 5,5 Hz; (3) Identify the structural response of the 1:50 scale building model to the earthquake force plan with the North Nagano, Tohoku Forshock, and Tohoku ground motion approaches; (4) Identify the comparison of the structural response to the earthquake load plan based on the sinusoidal wave and ground motion earthquake loading approaches. The structural response is reviewed from displacement and story drift. This research is a quantitative study using experimental methods with a scale of 1: 50. The planned construction site is located in Imogiri Bantul Yogyakarta with earthquake loading close to the frequency of the vibration table is a sinusoidal wave using the dominant frequency (f_0) in Imogiri, Bantul, Yogyakarta. The structural analysis of the building model uses analysis software with linear time history analysis method. The results of this research show that: (1) The building model has an inner angle horizontal structural irregularity; (2) The building model is able to withstand sinusoidal earthquake loads with a frequency of 1,5 Hz – 5,5 Hz with the largest story drift value occurring at a frequency of 3,5 Hz in the X direction with a value of 0,31 mm and in the Y direction with a value of 0,19 mm; (3) Ground motion loading, the largest story drift in the X direction occurred in the North Nagano earthquake with a value of 0,42 mm, while the Y direction of the Tohoku earthquake with a value of 0.18 mm; (4) The building model is safe because the story drift that occurs is less than the limit drift based on SNI 1726: 2019.



This is an open access article under the CC-BY license.

1. Pendahuluan

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Yogyakarta 2024 jumlah penduduk di Daerah Istimewa Yogyakarta pada tahun 2024 diproyeksikan mencapai 4.126.444 jiwa

sedangkan laju pertumbuhan penduduk mencapai 0,58% per tahun. Menurut [1] terjadinya pertambahan jumlah penduduk mempengaruhi proses pembangunan dan

*Corresponding author.

E-mail: faisalirfan.2021@student.uny.ac.id

Available online 31 Maret 2025

perkembangan aktivitas suatu wilayah serta meningkatnya kebutuhan akan ruang/lahan.

Pembangunan infrastruktur pemukiman dan perumahan, terutama gedung, di Indonesia menghadapi tantangan geografis karena negara ini terletak di wilayah Cincin Api Pasifik. Wilayah ini merupakan titik pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia: Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Oleh karena itu, Indonesia menjadi salah satu wilayah yang paling aktif secara seismik di dunia [2].

Saat ini, banyak bangunan yang memiliki desain bentuk asimetris, desain asimetris menawarkan keunikan dan keindahan yang berbeda dari bangunan simetris (Susilo, 2019). Perencanaan bangunan asimetris harus memperhatikan kaidah bangunan tahan gempa, ketika gempa desain terjadi, bangunan diperbolehkan mengalami kerusakan, namun harus dihindarkan terjadinya keruntuhan (*collapse*) [3].

Perencanaan bangunan tahan gempa pada wilayah yang memiliki tingkat kerawanan tinggi seperti Yogyakarta perlu dilakukan dengan metode riwayat waktu. Yogyakarta memiliki sejarah gempa bumi yang signifikan, seperti gempa besar pada tahun 2006. Analisis respons riwayat waktu dilakukan dengan pendekatan minimal tiga data *ground motion* yang disesuaikan respons spektrum pada lokasi yang akan ditinjau. *Ground motion* yang digunakan adalah tiga kejadian gempa besar yang pernah terjadi di dunia dengan kekuatan lebih dari 6,0 magnitudo, yaitu North Nagano, Tohoku Forshock, dan Tohoku. Pemilihan lokasi *ground motion* didasarkan dari gempa *shallow crustal* yaitu dengan kedalaman dangkal, *benioff* yaitu dari kedalaman dangkal hingga 700 km, dan *megathrust* yaitu gempa kekuatan besar yang dapat menimbulkan tsunami. Selanjutnya, teknik pola gelombang periodik sinusoidal digunakan untuk pembebanan gempa 1,5 Hz, 2,5 Hz, 3,5 Hz, 4,5 Hz, dan 5,5 Hz yang kemudian dilakukan penskalaan respon spektrum berlokasi di Imogiri, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Pemilihan lokasi tersebut didasarkan dari nilai frekuensi dominan (f_0) pada wilayah tersebut mirip dengan frekuensi uji eksperimental 5,5 Hz. Untuk mengetahui bagaimana bangunan yang diperiksa bereaksi terhadap anomali struktur seperti perpindahan dan simpangan antar lantai, kita akan membandingkan dua jenis metode pembebanan gelombang sinusoidal dengan *ground motion* tersebut.

Selain didesain tahan gempa, metode konstruksi yang saat ini dikembangkan untuk menekan waktu pelaksanaan di lapangan yaitu pembangunan secara modular dengan material beton pracetak. waktu pelaksanaan menggunakan metode pracetak lebih cepat dibandingkan metode konvensional selain itu material beton pracetak memiliki tingkat keawetan yang tinggi [4]. Bangunan gedung juga perlu didesain menggunakan teknologi dan material yang

ramah lingkungan untuk mendukung pembangunan yang berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif yang menggunakan metode eksperimental dengan skala 1:50. Penelitian ini membandingkan data gelombang sinusoidal frekuensi 1,5 Hz – 5,5 Hz dengan *ground motion* dari gempa North Nagano, Tohoku Forshock, dan Tohoku untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap respon struktur dengan ketidakberaturan struktur.

Studi kasus penelitian diambil dengan lokasi pendekatan beban gempa di Imogiri, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta berdasarkan pendekatan pemilihan respon spektrum yang mengacu pada frekuensi dominan (f_0) di Imogiri, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta terhadap frekuensi meja getar dan kecepatan gelombang geser (V_s).

Sumber data penelitian memanfaatkan data primer yang diperoleh melalui eksperimen laboratorium, yaitu data struktur gedung, data mutu material, data rekaman gempa, dan data pembebanan. Penentuan denah dan sistem struktur bangunan digunakan untuk menentukan beban yang akan ditanggung oleh struktur selama tahap pembebanan.

Penentuan spesifikasi material digunakan sebagai data input pada perangkat lunak analisis. Data input yang diperlukan meliputi berat jenis, modulus elastisitas, rasio Poisson, kuat leleh, dan kuat tarik, serta properti lainnya sesuai dengan jenis material yang digunakan.

Pembebanan pada struktur bangunan mempertimbangkan beban statis dan dinamis. Beban statis meliputi beban mati dan beban hidup, sedangkan beban dinamis adalah beban gempa yang diperoleh dari respons spektrum dan time history yang telah disesuaikan dengan lokasi studi kasus yang dipilih.

Penentuan respons spektrum gempa digunakan untuk menginput beban dinamis pada pemodelan struktur. Respons spektrum gempa dapat diperoleh dari situs RSA Cipta Karya Kementerian PUPR dengan memasukkan koordinat lokasi studi kasus yang digunakan.

Analisis riwayat waktu dilakukan dengan menerapkan pembebanan dinamis akibat gerakan tanah berdasarkan rekaman kejadian gempa yang mendekati kondisi seismotektonik di lokasi studi kasus. Dalam kasus ini, data rekaman kejadian gempa yang digunakan mencakup delapan variasi berdasarkan *ground motion* dan gelombang sinusoidal.

Pemodelan dan analisis struktur menggunakan perangkat lunak digunakan untuk mengetahui gaya-gaya dalam yang

bekerja pada struktur bangunan. Analisis gaya dalam struktur ini bertujuan untuk memahami respons setiap elemen struktur yang ditinjau [5].

Bangunan dengan konfigurasi denah yang tidak teratur lebih sensitif terhadap perubahan sudut respon spektrum masukan dan menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam permintaan respons seismik [6].

2.1 Tinjauan Pustaka

Gempa Bumi

Gempa bumi adalah fenomena alam yang ditandai dengan getaran atau guncangan pada permukaan bumi akibat pelepasan energi secara tiba-tiba di dalam kerak bumi. Getaran ini disebabkan oleh pergerakan mendadak atau pergeseran lapisan batuan di kerak bumi yang diakibatkan oleh pergerakan lempeng tektonik. Penyebab utama gempa bumi adalah pergerakan mendadak dari kerak bumi yang disebabkan oleh akumulasi tegangan tektonik. Proses ini melibatkan pelepasan energi potensial yang tersimpan dalam bentuk energi kinetik yang merambat melalui gelombang seismik.

Sejarah penelitian gempa bumi menunjukkan bahwa pemahaman tentang fenomena ini telah berkembang pesat sejak akhir abad ke-18, dengan kemajuan signifikan dalam bidang seismologi pada paruh kedua abad ke-19. Pengembangan seismograf modern memungkinkan para ilmuwan untuk mengukur dan menganalisis gelombang seismik dengan lebih akurat, sehingga membantu dalam memahami mekanisme dan dampak gempa bumi.

Sejarah Gempa di Indonesia

Secara geografis, Indonesia sering mengalami gempa bumi. Pada 26 Agustus 1883 di Pulau Jawa menyebabkan 36.000 korban, pada 19 Agustus 1977 di Sumbawa menyebabkan 100 korban, pada 26 Desember 2004 di Sumatera menyebabkan 187.000 korban, dan pada 12 September 2007 di Sumatera menyebabkan 187.000 korban. Data ini menunjukkan bahwa Indonesia memerlukan perhatian khusus terkait gempa bumi.

Bangunan Tahan Gempa

Perkembangan desain bangunan tahan gempa telah mengalami kemajuan signifikan sejak pengukuran percepatan tanah dimulai pada tahun 1930-an. Studi kasus gempa Kobe tahun 1995 menunjukkan peningkatan kinerja bangunan dengan perkembangan metodologi desain. Namun, bangunan yang dirancang dengan metodologi lama perlu ditingkatkan, dan rekayasa berbasis kinerja

harus ditekankan untuk melindungi fungsi bangunan setelah gempa sering terjadi [7].

Desain bangunan tahan gempa modern telah berkembang untuk memungkinkan deformasi plastis duktail pada struktur, yang berarti banyak bangunan mungkin mengalami kerusakan signifikan meskipun tidak runtuh. Kerusakan yang dialami oleh bangunan harus memenuhi syarat kerusakan. Berikut merupakan kategori kerusakan yang diizinkan [8]:

- (a) Gempa skala kecil dan sering terjadi, maka struktur utama bangunan harus tetap utuh dan tidak mengalami kerusakan, sementara kerusakan pada elemen non-struktural diperbolehkan.
- (b) Gempa skala menengah dan relatif sering terjadi, maka struktur utama bangunan dapat mengalami kerusakan ringan, sementara elemen non struktural yang rusak dapat diganti.
- (c) Gempa skala besar dan jarang terjadi, bangunan tersebut dapat mengalami kerusakan, namun tidak boleh runtuh sepenuhnya.

Pembebanan Struktur dan Kombinasi Pembebanan

Dalam penelitian ini, beban yang dianalisis meliputi beban vertikal, beban horizontal, serta kombinasi beban yang sesuai dengan ketentuan SNI 1727:2020 dan SNI 1726:2019.

- (a) Beban Mati (Dead Load)
- (b) Beban Hidup (Live Load)
- (c) Beban Gempa (Earthquake Load)
- (d) Kombinasi Beban untuk Metode Ultimit

Analisis Gempa

- (a) Respon Spektrum

Respon spektrum adalah grafik atau plot yang menggambarkan hubungan antara periode getar struktur (T) dengan respon maksimalnya, seperti simpangan maksimum (SD), kecepatan maksimum (SV), atau percepatan maksimum (SA) dari massa struktur tunggal (SDOF), berdasarkan rasio redaman dan beban gempa tertentu [8]. Ada dua jenis respons spektrum yaitu respon spektrum elastik dan respons spektrum inelastik. Untuk bangunan yang tidak beraturan, pengaruh gempa rencana terhadap struktur tersebut harus ditentukan melalui analisis respons dinamik tiga dimensi.

Menurut pasal 7.9.2, struktur yang tidak beraturan dapat dianalisis menggunakan metode analisis ragam spektrum respons atau spektra respons (BSN, 2012).

- Kategori Risiko Bangunan dan Faktor Keutamaan Gempa
- Faktor redundansi, ρ , untuk Kategori Desain Seismik D Sampai F
- Sistem struktur pemikul gaya seismik
- Klasifikasi Situs
- Parameter Percepatan Gempa
- Percepatan Tanah Puncak
- Parameter Percepatan Spektral Desain
- Kategori Desain Seismik
- Pemilihan Sistem Struktur Penahan Beban Gempa
- Batasan Periode Fundamental Struktur (T)
- Reduksi momen inersia struktur
- Koefisien Respon Seismik
- Gaya geser dasar seismik (V)
- Analisis Riwayat Waktu

Analisis riwayat waktu adalah metode di mana struktur bangunan digetarkan menggunakan rekaman gempa tertentu. Metode ini sangat cocok untuk menganalisis struktur yang tidak beraturan terhadap pengaruh gempa, karena gerakan tanah akibat gempa di lokasi tertentu sulit diprediksi. Analisis ini menggunakan rekaman akselerogram gempa sebagai input data percepatan gerakan tanah akibat gempa [9].

Dalam analisis gerak tanah, minimal tiga rekaman gerak tanah yang sesuai harus digunakan. Untuk analisis dua dimensi, setiap rekaman harus terdiri dari riwayat waktu percepatan tanah yang dipilih dari gempa aktual. Untuk analisis tiga dimensi, diperlukan sepasang komponen percepatan tanah horizontal yang sesuai, dipilih dan diskalakan dari rekaman gempa individual. Menurut [10] pembenaran akselerogram untuk mendapatkan nilai yang sesuai dengan spektrum respons yang diinginkan adalah langkah pertama dalam tahap perhitungan teknik riwayat waktu.

Distribusi Gaya Gempa

Gaya lateral akibat gempa (dalam kN) perlu dihitung menggunakan persamaan berikut

$$F_x = C_{vx} \cdot V$$

$$C_{vx} = \frac{(W_x h_x^k)}{(\sum_{i=1}^n W_i h_i^k)}$$

dimana C_{vx} adalah faktor distribusi, V adalah gaya lateral desain total atau geser dasar struktur (kN), w_i dan w_x adalah bagian berat seismik efektif total struktur yang

ditempatkan atau dikenakan pada tingkat I atau x (m), h_i dan h_x adalah tinggi dari dasar sampai Tingkat I atau x (m), k adalah eksponen yang terkait dengan periode struktur*

*untuk struktur yang mempunyai periode sebesar 0,5 detik atau kurang, bernilai $k=1$

*untuk struktur yang mempunyai periode sebesar 2,5 detik atau lebih, bernilai $k=2$

*untuk struktur yang mempunyai periode antara 0,5 dan 2,5 detik, k harus sebesar 2 atau harus ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

Simpangan Antar Tingkat

Simpangan antar tingkat desain (Δ) dihitung sebagai selisih simpangan pada pusat massa di tingkat atas dan bawah dari tingkat yang ditinjau. Jika pusat massa tidak berada dalam satu garis vertikal, simpangan di dasar tingkat dapat dihitung menggunakan proyeksi vertikal pusat massa tingkat di atasnya, yang dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{l_e}$$

Dimana C_d adalah faktor pembesaran simpangan lateral, δ_{xe} adalah simpangan di Tingkat- x pada analisis elastis (mm), dan l_e adalah faktor keutamaan gempa. Sebagai pembaruan dari SNI 1726:2012, SNI 1726:2019 menetapkan nilai batasan struktur untuk SRPMK yang meliputi koefisien modifikasi respons (R), faktor kekuatan sistem (Ω_0), serta faktor amplifikasi lendutan (C_d) [11].

Beban Harmonik Sinusoidal

Beban dalam bentuk getaran pada suatu benda, yang grafik posisi partikelnya sebagai fungsi waktu berbentuk sinus atau cosinus, disebut beban harmonik. Gerakan yang dihasilkan oleh beban ini disebut gerak harmonik atau gerak osilasi. Menurut [9], terdapat gerakan harmonik pada respons struktur terhadap beban luar, yaitu ketika struktur dibebani oleh gaya atau perpindahan yang besarnya dinyatakan sebagai fungsi sinus atau cosinus dari waktu ($p(t) = \sin \omega t$ atau $p(t) = \cos \omega t$)

Ketidakteraturan Struktur

Pertimbangan estetika dan arsitektural dalam perencanaan bangunan sering kali menghasilkan bentuk-bentuk tidak beraturan yang dapat menyebabkan masalah ketidakberaturan dalam kinerja seismik bangunan (Budiono, 2013). Studi menunjukkan bahwa bangunan tidak beraturan umumnya menunjukkan kekakuan yang lebih rendah dibandingkan dengan struktur beraturan, yang

menghasilkan nilai simpangan antar lantai yang bervariasi [12].

Bangunan akan diklasifikasikan sebagai tidak beraturan jika memenuhi satu atau lebih dari kriteria yang ditetapkan.

Ketidakberaturan Horizontal

Ketidakberaturan horizontal, atau yang sering disebut sebagai plan irregularity, adalah ketidakberaturan konfigurasi yang terlihat pada arah horizontal. Menurut SNI 1726:2019, kriteria ketidakberaturan horizontal bangunan meliputi beberapa aspek, antara lain:

1. Ketidakberaturan torsi
 2. Ketidakberaturan torsi berlebihan
 3. Ketidakberaturan sudut dalam
 4. Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma
 5. Ketidakberaturan akibat persegeran tegak lurus terhadap bidang
 6. Ketidakberaturan sistem non-paralel
 7. Ketidakberaturan Vertikal
- Ketidakberaturan vertikal adalah ketidakberaturan konfigurasi yang terlihat pada arah vertikal. Menurut SNI 1726:2019, kriteria ketidakberaturan vertikal bangunan meliputi beberapa aspek, antara lain:
8. Ketidakberaturan kekauan tingkat lunak
 9. Ketidakberaturan kekakuan Tingkat lunak berlebihan
 10. Ketidakberaturan berat (massa)
 11. Ketidakberaturan geometri vertikal
 12. Diskontinuitas arah bidang dalam ketidakberaturan elemen penahan gaya lateral vertikal
 13. Ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral Tingkat
 14. Berlebihan ketidakberaturan Tingkat lemah berlebihan akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Respon Struktur Akibat Gempa Sinusoidal

3.1.1 Gaya Geser Dasar Akibat Gempa Sinusoidal

Menurut SNI 1726-2019, penskalaan gaya untuk metode riwayat waktu diperlukan seperti pada metode respons spektrum. Langkah ini diambil apabila hasil kombinasi

respons untuk gaya geser dasar dari analisis ragam (V_t) lebih kecil dari 100% gaya geser (V) yang dihitung menggunakan metode statik ekuivalen. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya geser dasar inelastik dinamis lebih kecil dibandingkan dengan gaya geser statik, sehingga perlu dilakukan perhitungan faktor skala. Perhitungan faktor skala untuk analisis riwayat waktu linier dilakukan berdasarkan Pasal 7.9.2.5.2 SNI 1726:2019, jika gaya geser statik lebih besar daripada gaya geser dinamis. Hasil gaya geser inelastik setelah dilakukan penskalaan gaya telah memenuhi persyaratan seperti Tabel 1.

Tabel 1. Gaya geser dasar akibat gempa sinusoidal

Load Case		V_{IX} (kN)	V_{IY} (kN)
Statik	EQ _X	0,0213	0
	EQ _Y	0	0,0213
Dinamik	1,5 Hz X	0,171	0,052
	1,5 Hz Y	0,051	0,172
	2,5 Hz X	0,171	0,032
	2,5 Hz Y	0,082	0,171
	3,5 Hz X	0,170	0,047
	3,5 Hz Y	0,055	0,171
	4,5 Hz X	0,171	0,060
	4,5 Hz Y	0,044	0,171
	5,5 Hz X	0,171	0,048
	5,5 Hz Y	0,055	0,171

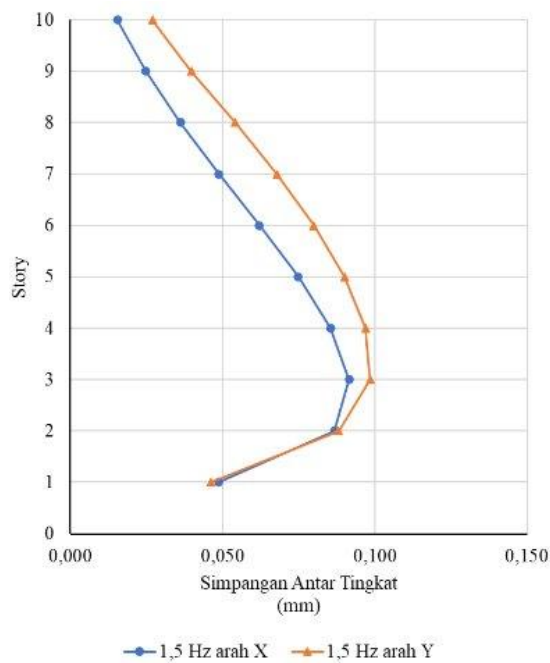
3.1.2 Simpangan Antar Tingkat Akibat Gempa Sinusoidal

Perbandingan simpangan pada gempa sinusoidal frekuensi 1,5 Hz menunjukkan bahwa nilai simpangan arah Y lebih besar daripada simpangan arah X seperti yang terlihat pada Gambar 1. dengan nilai maksimal arah X sebesar 0,092 mm dan nilai maksimal arah Y sebesar 0,098 mm.

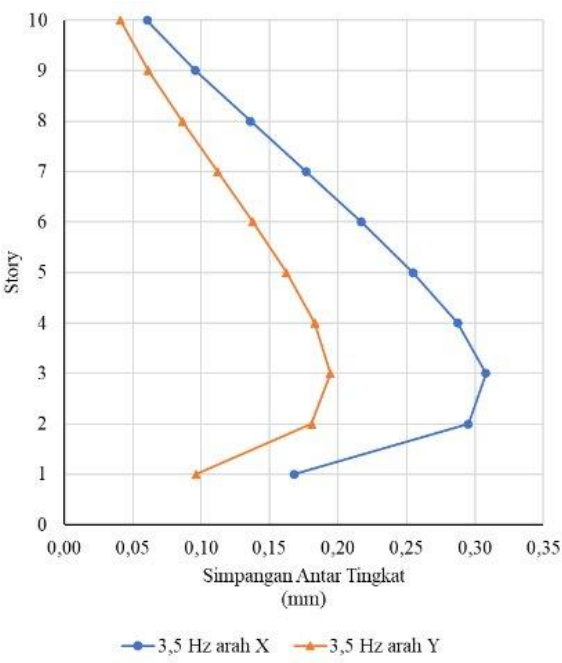
Perbandingan simpangan pada gempa sinusoidal frekuensi 2,5 Hz menunjukkan bahwa nilai simpangan arah X lebih besar daripada simpangan arah Y seperti yang terlihat pada Gambar 2. dengan nilai maksimal arah X sebesar 0,272 mm dan nilai maksimal arah Y sebesar 0,174 mm.

Perbandingan simpangan pada gempa sinusoidal frekuensi 3,5 Hz menunjukkan bahwa nilai simpangan arah X lebih besar daripada simpangan arah Y seperti yang terlihat pada Gambar 3. dengan nilai maksimal arah X sebesar 0,308 mm dan nilai maksimal arah Y sebesar 0,194 mm.

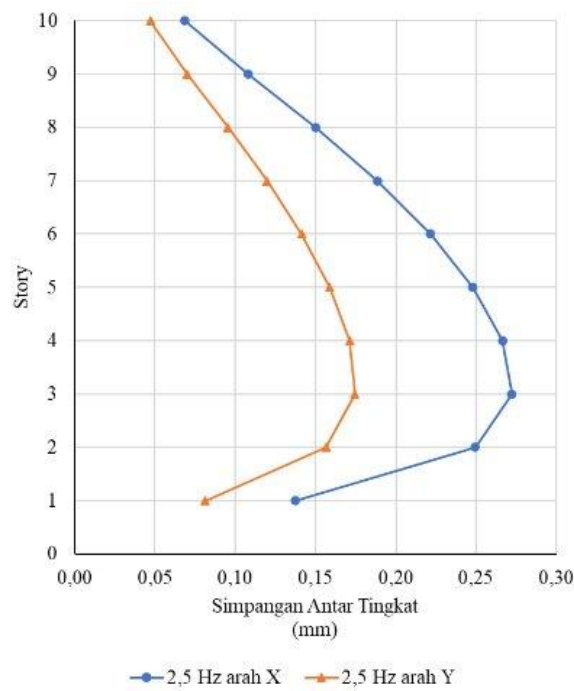
Perbandingan simpangan pada gempa sinusoidal frekuensi 4,5 Hz menunjukkan bahwa nilai simpangan arah X lebih besar daripada simpangan arah Y seperti yang terlihat pada Gambar 4. dengan nilai maksimal arah X sebesar 0,255 mm dan nilai maksimal arah Y sebesar 0,177 mm.



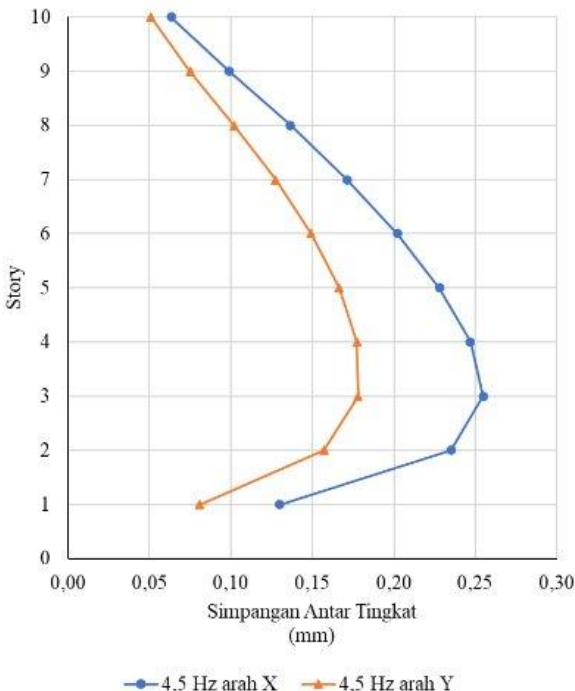
Gambar 1. Grafik perbandingan simpangan antar tingkat arah X dan Y Sinusoidal 1,5 Hz



Gambar 3. Grafik perbandingan simpangan antar tingkat arah X dan Y Sinusoidal 3,5 Hz



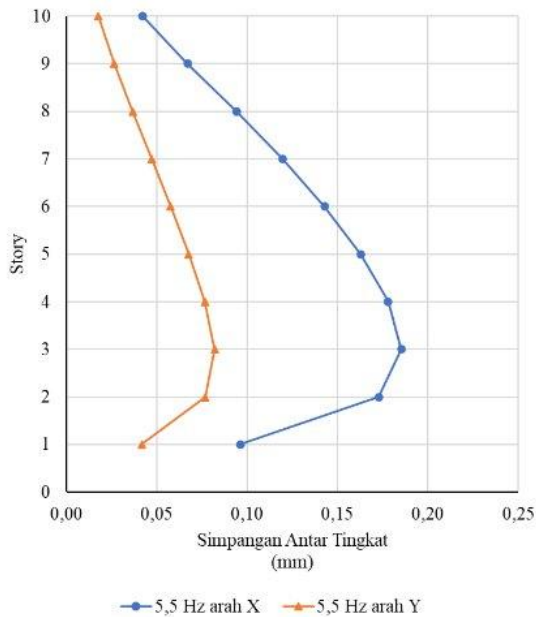
Gambar 2. Grafik perbandingan simpangan antar tingkat arah X dan Y Sinusoidal 2,5 Hz



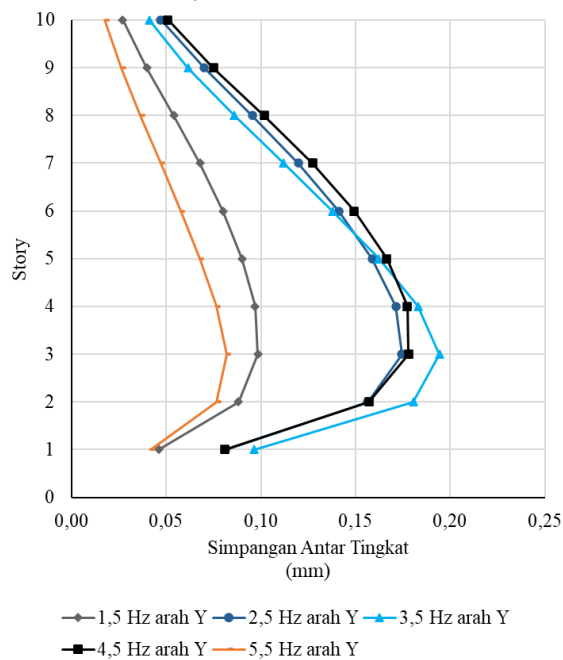
Gambar 4. Grafik perbandingan simpangan antar tingkat arah X dan Y Sinusoidal 4,5 Hz

Perbandingan simpangan pada gempa sinusoidal frekuensi 5,5 Hz menunjukkan bahwa nilai simpangan arah X lebih besar daripada simpangan arah Y seperti yang terlihat pada Gambar 5. dengan nilai maksimal arah X sebesar 0,185 mm dan nilai maksimal arah Y sebesar 0,082 mm.

Berdasarkan hasil perhitungan simpangan antar tingkat akibat beban gempa sinusoidal pada arah X diperoleh simpangan antar tingkat terbesar pada frekuensi 3,5 Hz; 2,5 Hz; 4,5 Hz; 5,5 Hz; dan 1,5 Hz seperti yang tertera pada



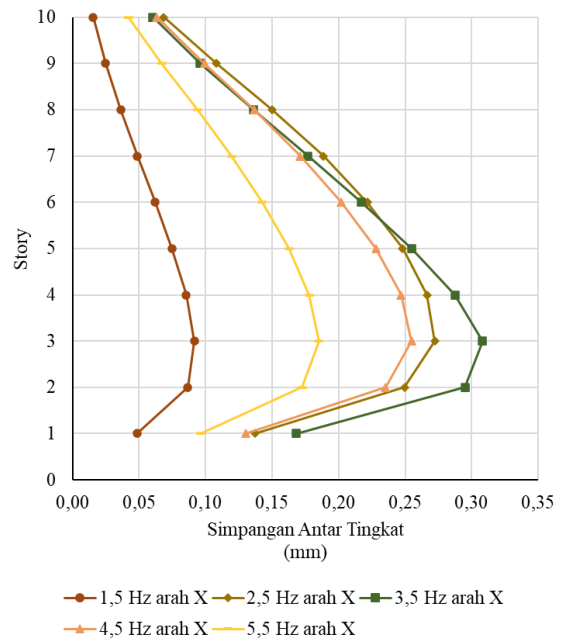
Gambar 5. Grafik perbandingan simpangan antar tingkat arah X dan Y Sinusoidal 5,5 Hz



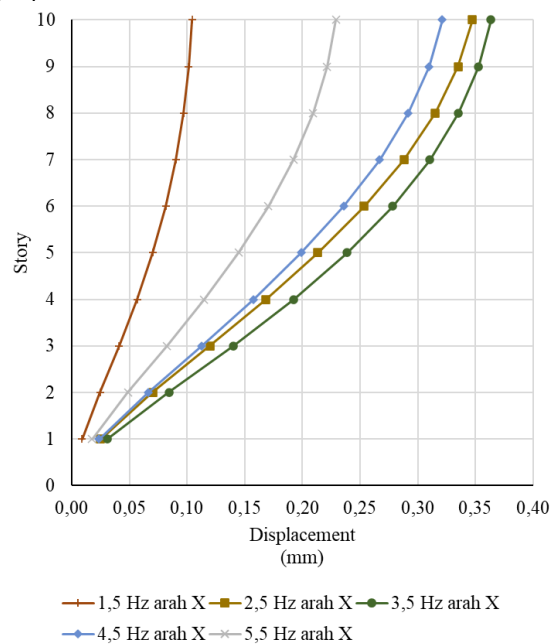
Gambar 7. Perbandingan simpangan antar tingkat arah Y gempa sinusoidal

Gambar 6. Sedangkan simpangan pada arah Y terbesar terjadi pada frekuensi 3,5 Hz; 4,5 Hz; 2,5 Hz; 1,5 Hz; 5,5 Hz seperti pada Gambar 7.

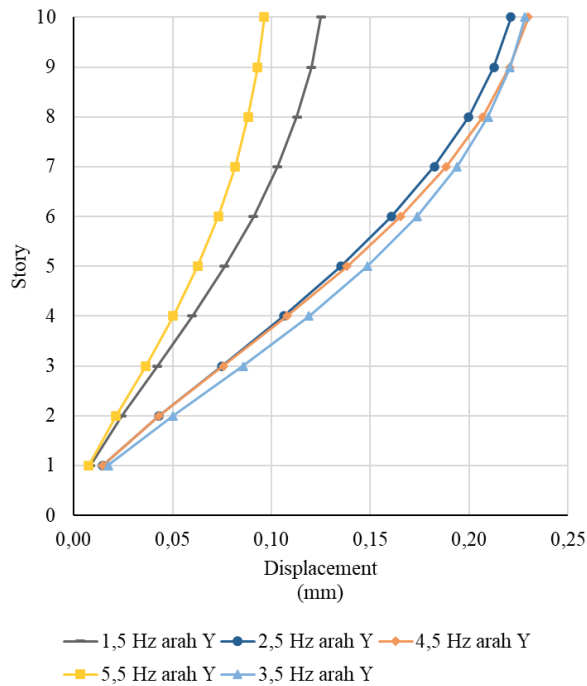
Berdasarkan hasil perhitungan *displacement* akibat beban gempa sinusoidal pada arah X diperoleh *displacement* terbesar pada frekuensi 3,5 Hz; 2,5 Hz; 4,5 Hz; 5,5 Hz; dan 1,5 Hz seperti yang tertera pada Gambar 8.



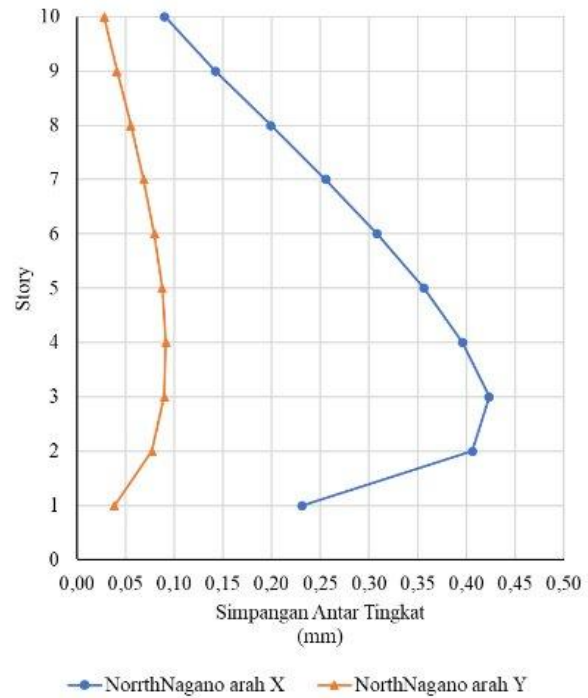
Gambar 6. Perbandingan simpangan antar tingkat arah X gempa sinusoidal



Gambar 8. Perbandingan displacement arah X gempa sinusoidal



Gambar 9. Perbandingan displacement arah Y gempa sinusoidal



Gambar 10. Simpangan antar tingkat ground motion North Nagano

Tabel 2. Gaya geser dasar akibat Ground Motion

Load Case		V_{IX} (kN)	V_{IY} (kN)
Statik	EQ _X	0,0213	0
	EQ _Y	0	0,0213
	North Nagano X	0,1704	0,1994
	North Nagano Y	0,0132	0,1704
Dinamik	Tohoku Forshock X	0,2253	0,1094
	Tohoku Forshock Y	0,034	0,1832
	Tohoku X	0,1624	0,0496
	Tohoku Y	0,0487	0,1651

Sedangkan *displacement* pada arah Y terbesar terjadi pada frekuensi 3,5 Hz; 4,5 Hz; 2,5 Hz; 1,5 Hz; 5,5 Hz seperti pada Gambar 9.

3.2 Respon Struktur Akibat *Ground Motion*

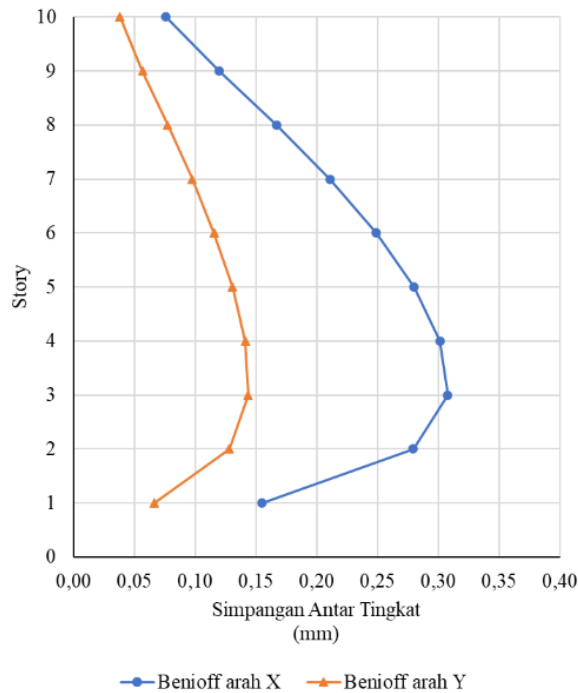
3.2.1 Gaya Geser Dasar Akibat *Ground Motion*

Hasil perhitungan menunjukkan nilai gaya geser dasar inelastik dinamis lebih kecil dari pada gaya geser statik, sehingga diperlukan tahapan perhitungan faktor skala. Adapun perhitungan faktor skala *linear time history* dilakukan berdasarkan pasal 7.9.2.5.2 SNI 1726:2019 apabila nilai gaya geser statik lebih besar dari gaya geser dinamis. Hasil gaya geser inelastik setelah dilakukan penskalaan gaya telah memenuhi persyaratan seperti yang terlihat pada Tabel 2.

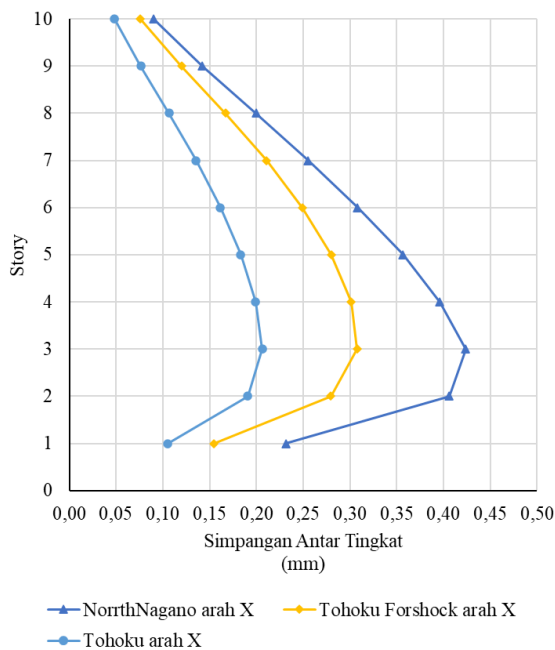
3.2.2 Simpangan Antar Lantai Akibat *Ground Motion*

Perbandingan simpangan pada gempa ground motion *Shallow Crustal* North Nagano menunjukkan bahwa nilai simpangan arah X lebih besar daripada simpangan arah Y seperti yang terlihat pada Gambar 10. dengan nilai maksimal arah X sebesar 0,423 dan nilai maksimal arah Y sebesar 0,091.

Perbandingan simpangan pada gempa *ground motion Benioff* Tohoku Forshock menunjukkan bahwa nilai simpangan arah X lebih besar daripada simpangan arah Y seperti yang terlihat pada Gambar 11. dengan nilai maksimal arah X sebesar 0,308 dan nilai maksimal arah Y sebesar 0,143.



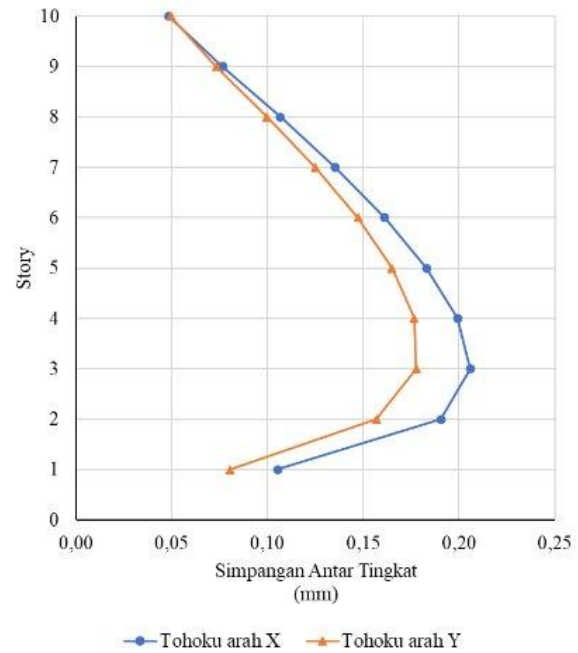
Gambar 11. Simpanan antar tingkat ground motion Tohoku Forshock



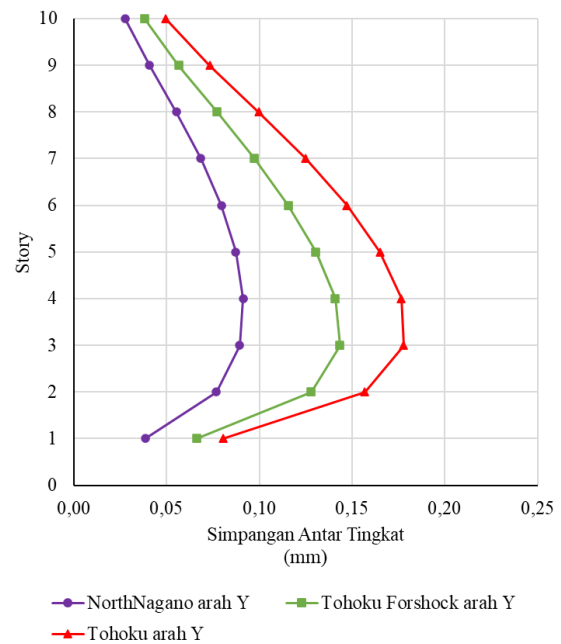
Gambar 13. Grafik perbandingan simpangan antar tingkat ground motion arah X

Perbandingan simpangan pada gempa *ground motion megatrust* Tohoku menunjukkan bahwa nilai simpangan arah X lebih besar daripada simpangan arah Y seperti yang terlihat pada Gambar 12. dengan nilai maksimal arah X sebesar 0,206 dan nilai maksimal arah Y sebesar 0,178.

Berdasarkan hasil perhitungan simpangan antar tingkat akibat beban gempa *ground motion* pada arah X diperoleh simpangan antar tingkat terbesar pada gempa *Shallow*



Gambar 12. Simpanan antar tingkat ground motion Tohoku



Gambar 14. Grafik perbandingan simpangan antar tingkat ground motion arah Y

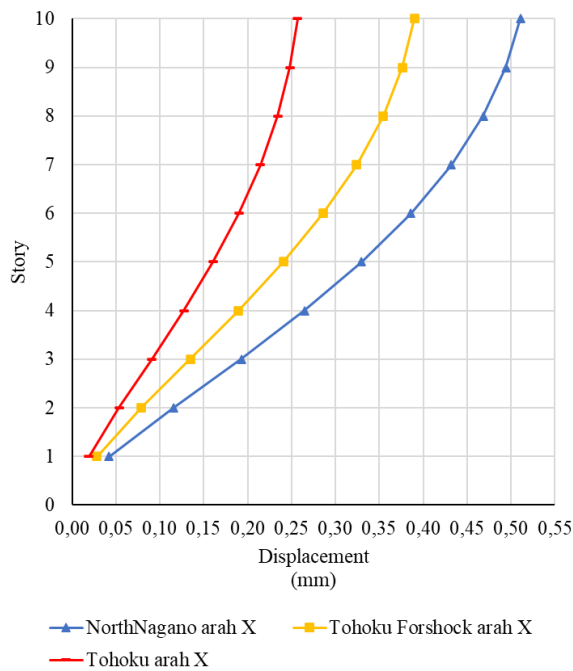
Crustal North Nagano; Benioff Tohoku Forshock; dan Megatrust Tohoku seperti yang tertera pada Gambar 13.

Sedangkan simpangan pada arah Y terbesar terjadi pada *ground motion* gempa *megatrust* Tohoku; *Benioff* Tohoku Forshock; dan *Shallow Crustal North Naganoseperti* pada Gambar 14.

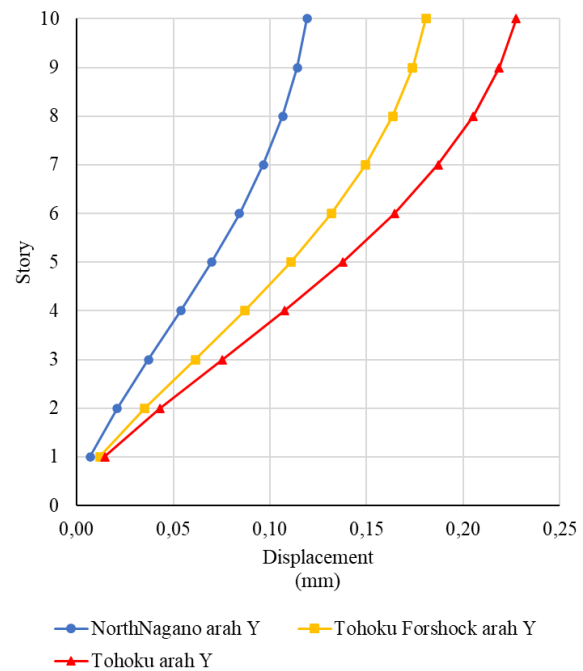
Berdasarkan hasil perhitungan *displacement* akibat beban gempa *ground motion* pada arah X diperoleh *displacement*

terbesar pada gempa *Shallow Crustal* North Nagano; *Benioff* Tohoku Forshock; dan *Megatrast* Tohoku seperti yang tertera pada Gambar 15.

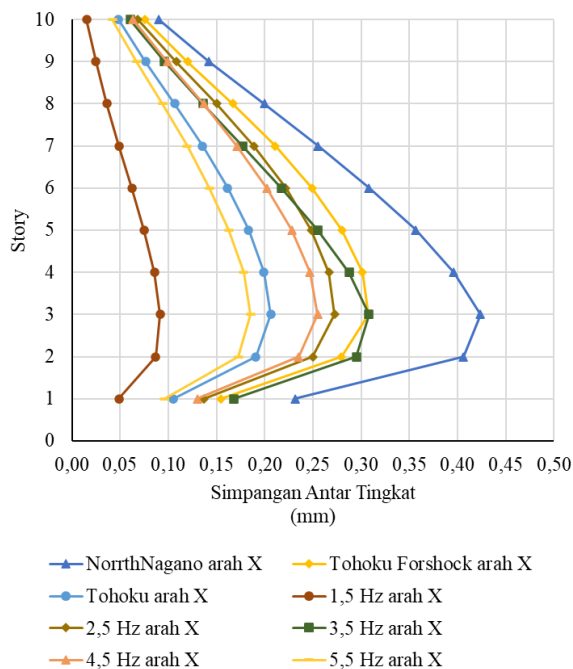
Sedangkan *displacement* pada arah Y terbesar terjadi pada *ground motion* gempa *Megatrast* Tohoku; *Benioff* Tohoku Forshock; dan *Shallow Crustal* North Nagano seperti pada Gambar 16.



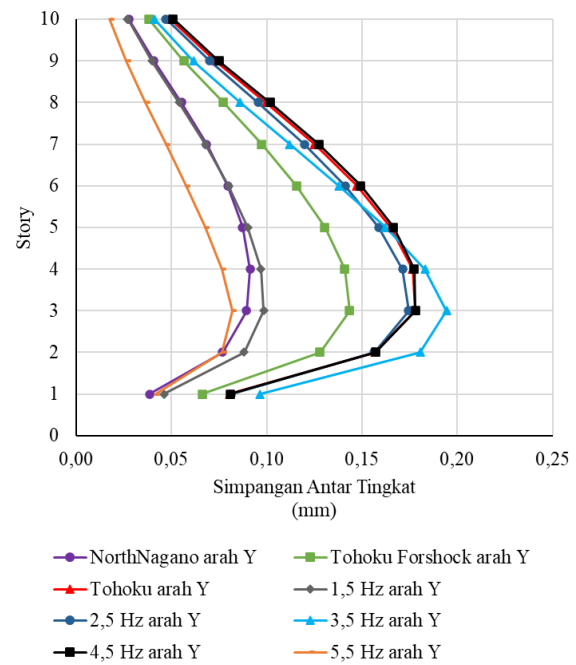
Gambar 15. Grafik perbandingan displacement ground motion arah X



Gambar 16. Grafik perbandingan displacement ground motion arah Y



Gambar 17. Grafik simpangan antar tingkat arah X



Gambar 18. Grafik simpangan antar tingkat arah Y

4. Simpulan

4.1 Perbandingan Simpangan Antar Tingkat Akibat Gelombang Sinusoidal dan *Ground Motion*.

Hasil perbandingan simpangan antar tingkat arah X akibat gempa sinusoidal 1,5 Hz - 5,5 Hz dan akibat gempa *ground motion* dengan lokasi pembebanan gempa *Shallow Crustal* North Nagano, *Benioff* Tohoku Forshock, dan *Megatrast* Tohoku ditunjukkan pada Tabel 3. Berdasarkan analisis pada Tabel 3, simpangan antar tingkat arah X dapat disimpulkan telah memenuhi syarat karena dibawah batas simpangan izin menurut SNI 1726:2019, sedangkan simpangan antar tingkat terbesar pada arah X terjadi pada pembebanan gempa *ground motion* North Nagano; kemudian gempa *ground motion* Tohoku Forshock; sinusoidal 3,5 Hz; sinusoidal 2,5 Hz; sinusoidal 4,5 Hz; *ground motion* Tohoku; sinusoidal 5,5 Hz; dan sinusoidal 1,5 Hz seperti yang terlihat pada Gambar 17.

Berikut merupakan hasil perbandingan simpangan antar tingkat arah Y akibat gempa sinusoidal 1,5 Hz - 5,5 Hz dan akibat gempa *ground motion* dengan lokasi pembebanan gempa *Shallow Crustal* North Nagano, *Benioff* Tohoku Forshock, dan *Megatrast* Tohoku seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Berdasarkan analisis tersebut simpangan antar tingkat arah Y dapat disimpulkan telah memenuhi syarat karena dibawah batas simpangan izin menurut SNI 1726:2019, sedangkan simpangan antar tingkat terbesar pada arah Y terjadi pada pembebanan gempa sinusoidal 3,5 Hz; kemudian gempa sinusoidal 4,5 Hz; *ground motion* Tohoku; sinusoidal 2,5 Hz; *ground motion* Tohoku Forshock; sinusoidal 1,5 Hz; *ground motion* North Nagano; dan sinusoidal 5,5 Hz seperti yang terlihat pada Gambar 18..

4.2 Perbandingan *Displacement* Akibat Gelombang Sinusoidal dan *Ground Motion*

Berikut merupakan hasil perbandingan *displacement* arah X akibat gempa sinusoidal 1,5 Hz - 5,5 Hz dan akibat gempa *ground motion* dengan lokasi pembebanan gempa *Shallow Crustal* North Nagano, *Benioff* Tohoku Forshock, dan *Megatrast* Tohoku seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Berdasarkan analisis tersebut *displacement* terbesar pada arah X terjadi pada pembebanan gempa *ground motion* North Nagano; kemudian gempa *ground motion* Tohoku Forshock; sinusoidal 3,5 Hz; sinusoidal 2,5 Hz; sinusoidal 4,5 Hz; *ground motion* Tohoku; sinusoidal 5,5 Hz; dan sinusoidal 1,5 Hz seperti yang terlihat pada Gambar 19.

Berikut merupakan hasil perbandingan *displacement* arah Y akibat gempa sinusoidal 1,5 Hz - 5,5 Hz dan akibat gempa *ground motion* dengan lokasi pembebanan gempa *Shallow Crustal* North Nagano, *Benioff* Tohoku Forshock, dan *Megatrast* Tohoku seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Berdasarkan analisis tersebut *displacement* terbesar pada arah Y terjadi pada pembebanan gempa sinusoidal 3,5 Hz; kemudian gempa sinusoidal 4,5 Hz; *ground motion* Tohoku; sinusoidal 2,5 Hz; *ground motion* Tohoku Forshock; sinusoidal 1,5 Hz; *ground motion* North Nagano; dan sinusoidal 5,5 Hz seperti yang terlihat pada Gambar 20.

Berdasarkan analisis tersebut *displacement* terbesar pada arah Y terjadi pada pembebanan gempa sinusoidal 4,5 Hz; kemudian gempa *ground motion* Tohoku; sinusoidal 5,5 Hz; sinusoidal 2,5 Hz; *ground motion* Tohoku Forshock; sinusoidal 1,5 Hz; *ground motion* North Nagano; sinusoidal 3,5 Hz.

Tabel 3. Perbandingan simpangan antar tingkat arah X

LT	Δ_x Arah X							
	1,5 Hz	2,5 Hz	3,5 Hz	4,5 Hz	5,5 Hz	North Nagano	Tohoku Forshock	Tohoku
10	0,02	0,07	0,06	0,06	0,04	0,09	0,08	0,05
9	0,02	0,11	0,10	0,10	0,07	0,14	0,12	0,08
8	0,04	0,15	0,14	0,14	0,09	0,20	0,17	0,11
7	0,05	0,19	0,18	0,17	0,12	0,26	0,21	0,14
6	0,06	0,22	0,22	0,20	0,14	0,31	0,25	0,16
5	0,07	0,25	0,25	0,23	0,16	0,36	0,28	0,18
4	0,09	0,27	0,29	0,25	0,18	0,40	0,30	0,20
3	0,09	0,27	0,31	0,25	0,19	0,42	0,31	0,21
2	0,09	0,25	0,30	0,24	0,17	0,41	0,28	0,19
1	0,05	0,14	0,17	0,13	0,10	0,23	0,15	0,11

Tabel 4. Perbandingan simpangan antar tingkat arah Y

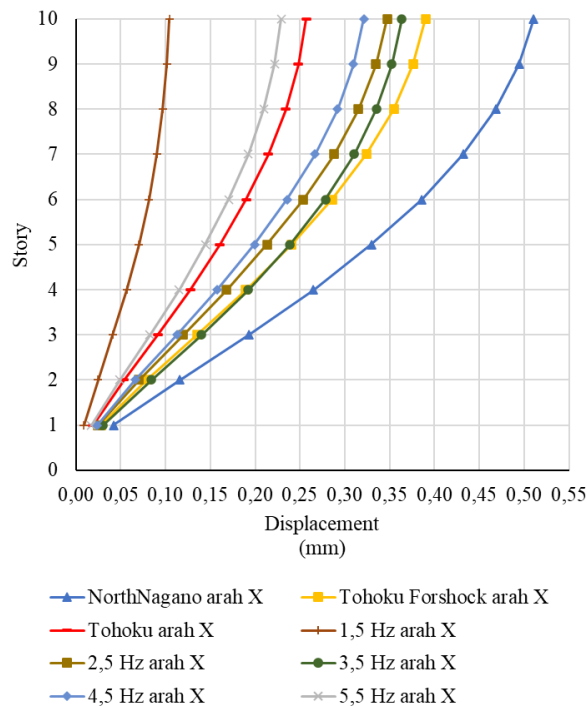
LT	Simpangan antar tingkat (mm)							
	Δ_Y Arah Y							
	1,5 Hz	2,5 Hz	3,5 Hz	4,5 Hz	5,5 Hz	North Nagano	Tohoku Forshock	Tohoku
10	0,03	0,05	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,05
9	0,04	0,07	0,06	0,07	0,03	0,04	0,06	0,07
8	0,05	0,10	0,09	0,10	0,04	0,06	0,08	0,10
7	0,07	0,12	0,11	0,13	0,05	0,07	0,10	0,12
6	0,08	0,14	0,14	0,15	0,06	0,08	0,12	0,15
5	0,09	0,16	0,16	0,17	0,07	0,09	0,13	0,17
4	0,10	0,17	0,18	0,18	0,08	0,09	0,14	0,18
3	0,10	0,17	0,19	0,18	0,08	0,09	0,14	0,18
2	0,09	0,16	0,18	0,16	0,08	0,08	0,13	0,16
1	0,05	0,08	0,10	0,08	0,04	0,04	0,07	0,08

Tabel 5. Displacement arah X

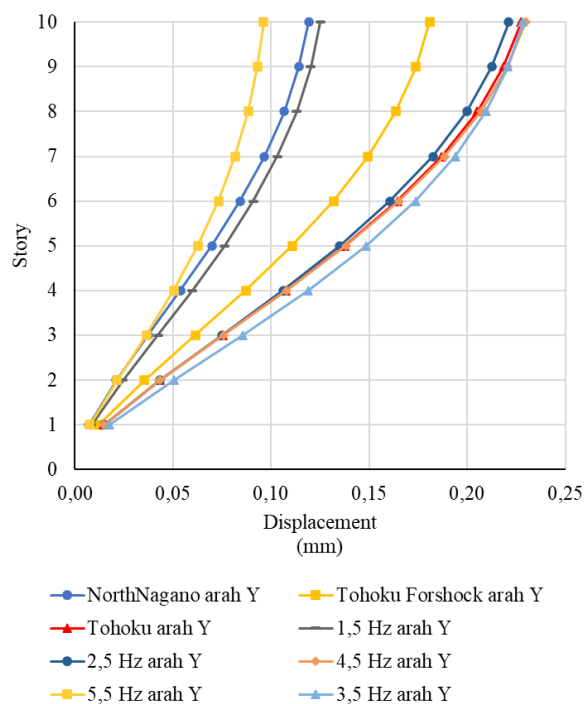
LT	Displacement (mm)							
	δ_{ex} Arah X							
	1,5 Hz	2,5 Hz	3,5 Hz	4,5 Hz	5,5 Hz	North Nagano	Tohoku Forshock	Tohoku
10	0,104	0,35	0,36	0,32	0,23	0,51	0,39	0,26
9	0,102	0,33	0,35	0,31	0,22	0,49	0,38	0,25
8	0,097	0,32	0,34	0,29	0,21	0,47	0,35	0,23
7	0,090	0,29	0,31	0,27	0,19	0,43	0,32	0,21
6	0,082	0,25	0,28	0,24	0,17	0,39	0,29	0,19
5	0,070	0,21	0,24	0,20	0,14	0,33	0,24	0,16
4	0,057	0,17	0,19	0,16	0,11	0,26	0,19	0,13
3	0,041	0,12	0,14	0,11	0,08	0,19	0,13	0,09
2	0,025	0,07	0,08	0,07	0,05	0,12	0,08	0,05
1	0,009	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,02

Tabel 6. Displacement arah Y

LT	Displacement (mm)							
	δ_{ey} Arah Y							
	1,5 Hz	2,5 Hz	3,5 Hz	4,5 Hz	5,5 Hz	North Nagano	Tohoku Forshock	Tohoku
10	0,13	0,22	0,23	0,23	0,10	0,12	0,18	0,23
9	0,12	0,21	0,22	0,22	0,09	0,11	0,17	0,22
8	0,11	0,20	0,21	0,21	0,09	0,11	0,16	0,21
7	0,10	0,18	0,19	0,19	0,08	0,10	0,15	0,19
6	0,09	0,16	0,17	0,17	0,07	0,08	0,13	0,16
5	0,08	0,13	0,15	0,14	0,06	0,07	0,11	0,14
4	0,06	0,11	0,12	0,11	0,05	0,05	0,09	0,11
3	0,04	0,07	0,09	0,08	0,04	0,04	0,06	0,08
2	0,02	0,04	0,05	0,04	0,02	0,02	0,04	0,04
1	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01



Gambar 19. Grafik perbandingan displacement arah X



Gambar 20. Grafik perbandingan displacement arah Y

5. Kesimpulan

Hasil penelitian dan pembahasan mengenai "Kaji Banding Respon Struktur dengan Ketidakberaturan Bentuk Akibat Gaya Gempa Sinusoidal Dan *Ground Motion* dengan Metode *Linear Time History Analysis*" menunjukkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan analisis ketidakberaturan struktur horizontal dan vertikal, model bangunan terjadi ketidakberaturan horizontal sudut dalam.
2. Berdasarkan hasil analisis struktur, gedung dinyatakan aman terhadap beban gempa sinusoidal dan *ground motion*. Hal ini karena simpangan antar tingkat yang dihasilkan lebih kecil dari batas simpangan yang diizinkan sesuai dengan SNI 1726:2019.
3. Hasil respon struktur pada bangunan model dengan pembebanan gelombang sinusoidal, simpangan antar tingkat terbesar arah X terjadi pada frekuensi 3,5 Hz dengan nilai 0,31 mm, sedangkan pada arah Y terjadi pada frekuensi 3,5 Hz dengan nilai 0,19 mm.
4. Hasil respon struktur pada bangunan model dengan pembebanan *ground motion*, simpangan antar tingkat terbesar arah X terjadi pada gempa North Nagano dengan nilai 0,42 mm, sedangkan pada arah Y terjadi pada gempa Tohoku dengan nilai 0,18 mm.
5. Berdasarkan analisis tersebut simpangan antar tingkat arah X dapat disimpulkan telah memenuhi syarat karena dibawah batas simpangan izin menurut SNI 1726:2019, sedangkan simpangan antar tingkat terbesar pada arah X terjadi pada pembebanan gempa *ground motion* North Nagano; kemudian gempa *ground motion* Tohoku Forshock; sinusoidal 3,5 Hz; sinusoidal 2,5 Hz; sinusoidal 4,5 Hz; *ground motion* Tohoku; sinusoidal 5,5 Hz; dan sinusoidal 1,5 Hz.
6. Berdasarkan analisis tersebut simpangan antar tingkat arah Y dapat disimpulkan telah memenuhi syarat karena dibawah batas simpangan izin menurut SNI 1726:2019, sedangkan simpangan antar tingkat terbesar pada arah Y terjadi pada pembebanan gempa sinusoidal 3,5 Hz; kemudian gempa sinusoidal 4,5 Hz; *ground motion* Tohoku; sinusoidal 2,5 Hz; *ground motion* Tohoku Forshock; sinusoidal 1,5 Hz; *ground motion* North Nagano; dan sinusoidal 5,5 Hz.

Daftar Rujukan

- [1] N. U. R. Arini, "Penunjang Permukiman Di Kecamatan Banyumanik Kota Semarang Program Studi Diploma Iii," 2009.
- [2] D. I. Prihantony, A. Afrizal, R. A. Hadiguna, and T. Ophiyandri, "Penerapan Standar Bangunan Tahan Gempa Dalam Detailed Engineering Design Di Sumatera Barat," *J. Rekayasa Sipil*, vol. 16, no. 3, p. 166, 2020.
- [3] A. U. Hibatulloh and N. G. Yuli, "Komparasi Prinsip Bangunan Rumah Rakyat Tahan Gempa Terhadap Hunian Pasca Gempa Di Desa Babadan Rt049 Kecamatan ...," pp. 272–284, 2019.

- [4] C. H. Najoan, J. Tjakra, and P. A. K. Pratas, "Analisis metode pelaksanaan plat precast dengan plat konvensional ditinjau dari waktu dan biaya (Studi Kasus Markas Komando Daerah Militer Manado)," *J. Sipil Statik*, vol. 4, no. 2016, pp. 319–327, 2016.
- [5] M. F. W. Pratama and E. F. N. Hidayatullah, "Perancangan Ulang Struktur Atas Gedung Kantor Otoritas Jasa Keuangan Surakarta Menggunakan Baja Konvensional," *INERSIA Informasi dan Ekspose Has. Ris. Tek. Sipil dan Arsit.*, vol. 17, no. 2, pp. 141–152, 2021.
- [6] B. Khanal and H. Chaulagain, "Seismic elastic performance of L-shaped building frames through plan irregularities," *Structures*, vol. 27, no. May, pp. 22–36, 2020.
- [7] S. Otani, "Earthquake resistant design of reinforced concrete buildings past and future," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 3–24, 2004.
- [8] Widodo, *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Belajar, 2012.
- [9] Kevin and Sanci Barus, "Kajian Perbandingan Respon Dinamik Linier dengan Analisis Riwayat Waktu (Time History Analysis) Menggunakan Modal Analisis (Mode Superposition Method) dan Integrasi Langsung (Direct Time Integration Method)," Universitas Sumatera Utara, 2014.
- [10] B. C. Ertanto, I. Satyarno, and B. Suhendro, "Performance Based Building Design for Operational Performance Levels," *Inersia*, vol. 13, no. 2, pp. 189–204, 2017.
- [11] I. R. Suyanto, "Perbandingan Perilaku Bangunan Bertingkat Menengah Dengan Material Cross-Laminated Timber (CLT) Berdasarkan Sni 1726:2012 Dan Sni 1726:2019," *INERSIA Informasi dan Ekspose Has. Ris. Tek. Sipil dan Arsit.*, vol. 16, no. 2, pp. 130–143, 2020.
- [12] A. A. Maulidani, D. F. Muhammad, M. A. Rahman, and E. Santoso, "Studi Perbandingan Performa Ketidakberaturan Horizontal Bangunan Terhadap Beban Gempa," *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 8, no. 2, pp. 932–940, 2024.