

ANALISIS RIWAYAT WAKTU FONDASI TIANG TUNGGAL DAN KELOMPOK DI TANAH LUNAK

Albert Gandarasa¹, HENDY WIJAYA², dan AMELIA YUWONO³

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
albert.325170039@stu.untar.ac.id

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

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
ameliayuwono@yahoo.com

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

ABSTRACT

Indonesian territory has high earthquake possibility because it lays on two seismic gaps. Earthquake can cause a great damage for mankind, therefore interventions are needed to prevent it by analyzing the effect of earthquake towards the foundation stability. The most common analysis method is time history analysis, which is a step by step method to find out the respond that given by a structure by simulating an earthquake record to the structure model. This method needs a ground motion from an accelerogram and spectral response from the area where the infrastructure will be built. This journal will analyze the time history on the single and group pile using geotechnical-based programme which is Midas GTS NX that will resulting the displacement and the internal force caused by the seismic load. This journal is expected to assist the planning of a building by calculating the earthquake effects and minimalizing the possibility of pile foundation failure. Based on the 11 earthquakes' analysis results, single pile tend to have bigger value on axial force, shear force Y and bending moment Z. Meanwhile the pile group tend to have bigger value on shear force Z, bending moment Y, translation and rotation displacement.

Keywords: time history analysis, ground motion, foundation, earthquake, spectral response

ABSTRAK

Wilayah Indonesia memiliki potensi gempa yang cukup besar karena dilewati oleh dua jalur seismik. Gempa bumi dapat mengakibatkan kerugian besar bagi umat manusia, maka dari itu dibutuhkan langkah-langkah untuk mencegah hal tersebut dengan menganalisis efek gempa terhadap kestabilan fondasi. Salah satu analisis yang biasa digunakan adalah analisis riwayat waktu, yang merupakan suatu metode langkah demi langkah untuk mengetahui respons yang diberikan suatu struktur dengan cara pemberian rekaman gempa terhadap model struktur tersebut. Metode ini membutuhkan rekaman gerak tanah dari sebuah akselerogram dan respon spektra daerah dimana infrastruktur tersebut akan dibangun. Pada jurnal ini akan dilakukan analisis riwayat waktu pada tiang tunggal dan kelompok menggunakan program berbasis geoteknik yaitu Midas GTS NX yang akan menghasilkan nilai perpindahan dan gaya dalam akibat beban gempa. Jurnal ini diharapkan dapat membantu perencanaan sebuah bangunan dengan memperhitungkan pengaruh beban gempa dan meminimalisir kemungkinan terjadinya kegagalan fondasi tiang. Dari 11 gempa yang sudah dianalisis, tiang tunggal cenderung memiliki nilai gaya dalam normal, geser arah Y dan momen arah Z yang lebih besar. Sementara tiang grup memiliki gaya dalam geser arah Z, momen arah Y, serta perpindahan translasi dan rotasi yang lebih besar.

Kata kunci: analisis riwayat waktu, gerak tanah, fondasi, gempa, respon spektra.

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Setiap struktur konstruksi yang dibangun secara umum dibagi menjadi dua bagian, yaitu struktur bawah dan struktur atas. Struktur atas adalah bagian dari suatu bangunan yang berada di atas muka tanah, sedangkan struktur bawah adalah bagian penopang struktur atas yang biasa disebut juga dengan fondasi. Fondasi biasa diartikan atau didefinisikan sebagai bagian paling bawah dari suatu konstruksi yang dapat menahan semua gaya atau beban yang diterima dari struktur yang berada di atasnya kemudian meneruskannya ke dalam tanah ataupun batuan sehingga bangunan yang berada di atasnya berdiri secara aman (Widojoko, 2015).

Pada konstruksi yang memerlukan daya dukung sangat besar misalnya bangunan *high rise*, fondasi yang sering dipakai adalah fondasi tiang (Widojoko, 2015). Fondasi tiang sering digunakan karena memiliki beberapa kelebihan. Kelebihannya antara lain adalah fondasi jenis ini memerlukan biaya awal yang relatif rendah, pilihan terbaik untuk *friction piles*, dan pembuatannya yang mudah. Sedangkan kelemahannya antara lain adalah daya tahannya akan berkurang apabila terlalu kering maupun basah dan rentan terhadap kerusakan (Magar, Kudtarkar, Pachpohe, & Nagargoje, 2020).

Gempa bumi adalah suatu peristiwa yang terjadi apabila batuan pada kerak bumi melepaskan sejumlah energi. Umumnya gempa bumi terjadi secara tiba-tiba dan setelah terjadi peristiwa tersebut akan muncul sesar/patahan. Pada saat terjadinya gempa bumi, muncul sebuah energi gelombang yang dipancarkan ke segala arah yang diakibatkan oleh kerusakan atau patahan batuan. Hasil dari getaran dari gempa bumi dapat dilihat pada rekaman gempa. Kondisi geologi batuan yang berbeda pada setiap tempat akan menghasilkan hasil rekaman gempa yang tidak sama (Sumantri, 2020).

Ada dua jalur seismik yang melewati Indonesia. Hal inilah yang membuat Indonesia menjadi negara yang rawan gempa. Gempa bumi biasanya terjadi hanya terjadi dalam hitungan detik atau puluhan detik, dan pada kasus tertentu dengan kemungkinan kecil terjadi dalam waktu lebih dari satu menit, namun kerusakan yang ditimbulkan dari peristiwa ini bisa sangat merugikan dan mengakibatkan korban jiwa maupun bangunan. Maka untuk mengetahui efek gempa pada bangunan yang dapat meminimalisir korban jiwa atau bangunan, dilakukanlah analisis struktur bangunan dengan beberapa cara yang salah satunya adalah metode analisis riwayat waktu (Kevin & Barus, 2014).

Analisis riwayat waktu merupakan suatu metode analisis yang dilakukan langkah demi langkah pada suatu pembebanan seismik/gempa untuk mengetahui respon dari sebuah struktur konstruksi (Tallapalem, Shaik, & Valluri, 2019). Analisis riwayat waktu menggunakan rekaman gempa tertentu untuk menggetarkan suatu bangunan untuk melihat efeknya pada konstruksi tersebut. Karena beban bersifat dinamik, maka hitungan/penyelesaian respon struktur mungkin dilakukan ratusan kali atau bahkan ribuan kali. Metode ini sangat cocok untuk menganalisis suatu konstruksi yang tidak beraturan akibat efek dari gempa rencana. Rekaman biasa diambil dari akselerogram dan input gempanya didekati dengan gerakan tanah yang disimulasikan karena sulitnya memperkirakan gerakan tanah akibat gempa di suatu lokasi (Kevin & Barus, 2014).

Dari semua latar belakang yang sudah digambarkan diatas, maka dapat dikatakan bahwa penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya *displacement* pada tiang tunggal dan kelompok akibat beban *time history*. Selain itu, penelitian ini juga dilakukan untuk mendapat besar gaya dalam yang dialami oleh tiang tunggal dan kelompok akibat beban *time history*.

Gempa

Daniel L. Schodek (1999) mengemukakan bahwa fenomena getaran dengan guncangan yang terdapat pada kerak bumi adalah penyebab dari gempa bumi. Faktor utama yang menyebabkan peristiwa ini adalah tumbukan dan gesekan kerak bumi yang berpengaruh terhadap permukaan bumi. Gempa bumi menjalar dalam bentuk sebuah gelombang yang menghasilkan sebuah energi untuk menggetarkan permukaan bumi dan struktur yang berdiri di atasnya. Akibat dari sifat bangunan yang cenderung melindungi dirinya dari gerakan, getaran yang berasal dari gempa bumi akan menyebabkan munculnya gaya-gaya pada struktur bangunan tersebut.

Chen dan Lui (2006) mengatakan bahwa definisi gempa bumi secara umum ialah getaran yang terjadi di permukaan bumi yang diakibatkan oleh vulkanisme, aktivitas tektonik, bahan peledak, ataupun longsoran. Hal yang harus dijadikan perhatian dalam kajian tentang bahaya gempa dan merupakan penyebab utama terjadinya kerusakan struktur adalah aktivitas tektonik (Wibowo, 2011).

Gempa dapat dibedakan menjadi gempa akibat sesar dan non sesar. Gempa akibat sesar biasanya dianggap gempa dangkal, sementara gempa non sesar dianggap gempa dalam yang biasa terjadi di zona subduksi. Gempa yang terjadi di zona subduksi terdiri dari:

1. Gempa *Megathrust*
2. Gempa Wadati-Benioff / Intraslab

Gempa *Megathrust*

Gempa *megathrust* adalah jenis gempa terbesar di bumi yang umumnya memiliki magnitudo lebih besar dari 8-9. Gempa jenis ini juga biasanya mengakibatkan tsunami sehingga dapat menimbulkan banyak sekali korban jiwa. Salah satu contoh nyata dari gempa jenis ini ialah Gempa dan Tsunami Andaman dan Kepulauan Nicobar bermagnitudo 9.3 yang terjadi pada tahun 2004. Kejadian ini menyebabkan lebih dari 300.000 orang meninggal ataupun hilang. Gempa jenis ini pun bisa menimbulkan penurunan, likuifaksi, kegagalan tanah lainnya ataupun pergerakan tanah kuat yang dapat berimbas pada kerusakan besar infrastruktur hingga memakan korban jiwa yang tidak sedikit. Oleh karena itu,

gempa *megathrust* menimbulkan kemungkinan bahaya yang besar bagi berbagai kota di pesisir serta menyebabkan kekhawatiran massal bagi para ilmuwan maupun masyarakat umum.

Tekanan pada gempa *megathrust* biasanya terbentuk selama ratusan tahun sebelum akhirnya keluar pada suatu bagian yang pecah pada sebuah gempa hebat atau besar. Pada suatu gempa bumi yang sangat besar, tercatat pecahan pada zona subduksi bisa mencapai sepanjang lebih dari 1000 km menyebar di zona subduksi dan bertahan selama 10 menit. Setelah kejadian itu terjadi, pembentukan tekanan kembali berlangsung.

Pada masa kini, studi tentang gempa, pemodelan termal suatu data aliran panas, dan pemodelan dislokasi suatu data geodesi berperan besar dalam menyimpulkan apa yang kita ketahui tentang gempa *megathrust*. Meskipun membutuhkan waktu observasi yang sangat lama, namun studi tentang gempa dapat memberikan informasi yang detail mengenai daerah-daerah yang pecah pada gempa besar serta kemungkinan waktu dan tempat terulangnya kejadian serupa. Terulangnya suatu gempa yang sangat besar biasanya terjadi ratusan tahun sekali (Nedimovic, 2006).

Gempa Wadati-Benioff / Intraslab

Gempa Wadati-Benioff atau Intraslab terjadi di lempeng di dalam lautan yang menunjam dan tercatat mencapai kedalaman hiposentral yang besarnya kurang lebih 680 km dan magnitudo hingga kurang lebih 8.3 menurut Silver et al., (1995) dalam Nedimovic (2006). Meskipun gempa jenis ini memiliki magnitudo yang lebih kecil daripada gempa *megathrust* dan terjadi pada lokasi yang lebih dalam, namun gempa benioff masih memberikan bahaya dan kekhawatiran yang cukup besar, terlebih lagi bagi daerah yang terdapat di area Pacific Rim.

Gempa benioff dapat dikelompokkan berdasarkan kedalaman hiposentralnya menjadi sebagai berikut:

1. Gempa benioff dangkal: 40-60 km
2. Gempa benioff menengah: 60-300 km
3. Gempa benioff dalam: 300-680 km

Namun masih muncul berbagai perdebatan tentang jangkauan kedalaman dari 3 klasifikasi gempa benioff ini terkait dengan asal-usul mekanisme terjadinya gempa menengah dan dalam.

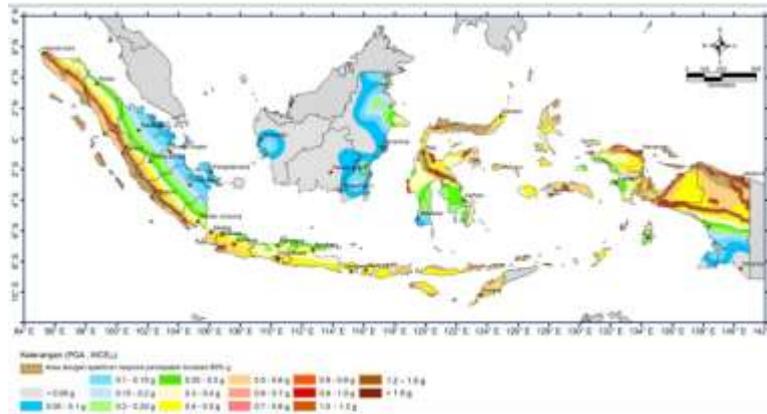
Peacock (2001) mengatakan bahwa semakin banyak bukti yang menyatakan bahwa reaksi metamorfik kemungkinan menjadi kunci terjadinya gempa menengah dan gempa dalam terkait dengan kontroversi ataupun perdebatan yang mengelilingi topik ini. Menurut Kirby et al., (1991), patahan yang terkait dengan reaksi metastabil zat *olivine* menjadi *spinel* mungkin adalah penyebab terjadinya gempa dalam. Sedangkan pada tahun 1996, ia mengemukakan bahwa gempa menengah mungkin terjadi akibat dari dua kondisi diantaranya adalah dehidrasi *embrittlement* terkait dengan perubahan metabasalt dan metagabbro menjadi eklogit yang terjadi kerak zona subduksi pada lempeng di dalam lautan atau dehidrasi *serpentine* yang terjadi di bagian teratas mantel zona subduksi menurut Meade dan Jeanloz (1991).

Meskipun gempa benioff dangkal dan menengah memiliki mekanisme pemicu yang berbeda, namun keduanya terlihat memiliki pecahan-pecahan yang berada di sepanjang zona lemah yang sudah ada sebelumnya. Zona lemah gempa benioff dangkal adalah bidang patahan yang terbentuk di pegunungan tengah laut selama terjadinya penambahan kerak di zona subduksi. Sementara itu untuk zona lemah gempa benioff menengah ialah bidang patahan yang sama dengan gempa benioff dangkal dan patahan lain yang terbentuk di daerah punggung laut yang berdekatan dengan suatu palung akibat dari pembengkokan zona subduksi.

Pengetahuan pada masa kini tentang kegempaan intraslab kebanyakan diketahui dari pengamatan seismologi dan studi laboratorium P-T (tekanan-suhu). Namun hal ini memiliki batas resolusi seperti halnya dengan tomografi gempa atau memerlukan ekstrapolasi dari hasil laboratorium yang berskala kecil ke pengaturan alam yang berskala besar. Keterbatasan inilah yang membuat informasi yang terkumpul pada saat ini membatasi kemampuan kita untuk mengerti sepenuhnya tentang natur dari gempa benioff ini (Nedimovic, 2006).

Beban Gempa

Beban gempa adalah salah satu contoh dari beban dinamik. Widodo (2001) menemukan bahwa beban dinamik menimbulkan respon yang terus berganti berdasarkan waktu, sehingga bangunan yang berdiri pun akan ikut bergetar. Untuk membangun struktur yang stabil terhadap beban gempa, maka perlu dilakukan analisis struktur untuk menahan beban tersebut. Analisis struktur yang dipakai pun harus berbentuk analisis dinamik. Pada analisis dinamik, gaya geser gempa akan dibagi di seluruh tingkat yang diperoleh dengan memperhitungkan efek dinamis yang ditimbulkan oleh gerakan tanah kepada struktur. Selain itu, dibutuhkan juga data percepatan gerak tanah gempa pada daerah yang akan dibangun. Pada gambar 1 dapat terlihat macam-macam nilai percepatan gerak tanah gempa maksimum di daerah Indonesia pada tahun 2017.



Gambar 1. Peta PGA gempa maksimum Indonesia 2017 (Badan Standardisasi Nasional, 2019)

Analisis Riwayat Waktu Non Linier

Analisis riwayat waktu non linier adalah pendekatan analisis suatu struktur yang semakin sering digunakan oleh *engineers* untuk tujuan desain dan evaluasi berbasis kinerja. Analisis jenis ini adalah analisis terancang yang tersedia pada saat ini. Analisis riwayat waktu non linier dilakukan dengan pemberian *ground motion* kepada suatu model komputasi struktur yang kemudian memodelkan gaya non linier dan respon deformasi komponen struktural secara eksplisit (Morris, Thompson, Dismuke, & Bradley, 2019).

Menurut SNI 1726:2019 pasal 11.2.2 dan SNI 8899:2020 pasal 7.2, gerak tanah yang dipilih minimal adalah 11 pasang untuk setiap respon spektra suatu daerah dan setiap gerak tanah harus terdiri dari dua komponen horizontal yang saling tegak lurus. Rentang periode getar yang diambil adalah rentang yang paling menentukan diantara $T_{lower} - 2T_{1max}$ atau $0.2T_{1min} - 2T_{1max}$. Analisis ini dapat dilakukan dengan cara penskalaan amplitudo ataupun pencocokan spektral seperti pada analisis riwayat waktu linier. Efek p-delta tetap dimasukkan dalam analisis dan beban gempa serta beban gravitasi tidak dapat dihitung terpisah. Model yang digunakan dalam analisis ini juga adalah model 3 dimensi dari sebuah struktur. Perbedaan dari analisis riwayat waktu linier dan non linier dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Perbedaan analisis riwayat waktu linier dan non linier (Badan Standardisasi Nasional, 2019)

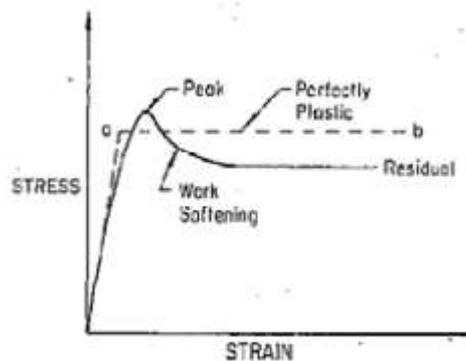
	Analisis Riwayat Waktu Linier	Analisis Riwayat Waktu Non Linier
Jumlah Ground Motion	• 3 Pasang	• 11 Pasang
Rentang Periode Getar	• $0,8 T_{lower} - 1,2T_{1max}$ T_{lower} : Periode getar yang mencakup 90% partisipasi massa T_{1max} : Periode getar fundamental translasi terbesar	• $T_{lower} - 2T_{1max}$ • $0,2T_{1min} - 2T_{1max}$ Digunakan rentang yang paling menentukan T_{lower} : Periode getar yang mencakup 90% partisipasi massa T_{1max} : Periode getar fundamental translasi terbesar T_{1min} : Periode getar fundamental translasi terkecil
Teknik Modifikasi yang diizinkan	• Pencocokan spektral	• Pencocokan spektral • Penskalaan amplitudo Rata-rata arah maksimum atau RotD100 (maximum response value) dari semua gerak > 90% target spektra.
Pencocokan Spektral	• Spektrum respons masing-masing komponen dicocokkan terhadap target • 100% target \pm 10% • Target adalah $2/3 \times MCE_R$ (RotD100)	• 110% target • Spektrum respons RotD100 (maximum response value) dicocokkan terhadap target • Target adalah MCE_R (RotD100)

Penerapan input akselerogram	<ul style="list-style-type: none"> • Diterapkan secara independen untuk masing-masing komponen akselerogram • Kombinasi beban sesuai peraturan diterapkan untuk pertimbangan dua arah komponen 	<ul style="list-style-type: none"> • Diterapkan secara simultan untuk dua komponen akselerogram
------------------------------	--	--

Model Tanah Mohr-Coulomb

Model Mohr-Coulomb digunakan untuk mensimulasikan kebanyakan medan tanah dan model ini menghasilkan hasil analisis non linier yang cukup terpercaya (Midas GTS NX *Analysis Reference*). Model Mohr-Coulomb adalah model plastis elastis sempurna yang berfungsi sebagai model orde pertama dan biasanya dipakai untuk menggambarkan perilaku tanah secara umum. Pada saat kondisi umum tegangan, tegangan-regangan model tanah ini berhubungan secara linier dalam jangkauan elastis, dengan pengaruh dari dua parameter Hukum Hooke yaitu modulus Young (E) dan rasio Poisson (ν). Kriteria keruntuhan pada model Mohr-Coulomb didefinisikan oleh dua parameter, diantaranya adalah sudut gesek (ϕ) dan nilai kohesi (c). Sementara itu, aturan aliran pada model ini dipengaruhi oleh sudut dilatansi (ψ) (Ti, Huat, Noorzaei, Jaafar, & Sew, 2009).

Pada teori tanah plastis konvensional, aturan aliran dipakai sebagai hukum evolusi bagi laju regangan plastis. Aturan aliran dibagi menjadi aturan aliran terkait dan tidak terkait. Aturan aliran terkait adalah aturan yang dipakai apabila fungsi potensial plastis sama dengan fungsi leleh. Sementara aturan aliran tidak terkait merupakan aturan yang dipakai apabila fungsi potensial plastis tidak sama dengan fungsi leleh. Dalam mekanika tanah, aturan terkait digunakan untuk memodelkan perilaku tanah yang mempunyai nilai dilatansi negatif yang signifikan, misalnya pada model Cam-clay tanah lempung yang terkonsolidasi normal. Sedangkan aturan aliran tidak terkait banyak digunakan untuk memodelkan perilaku tanah pasir yang mempunyai nilai dilatansi negatif dan positif (Ti, Huat, Noorzaei, Jaafar, & Sew, 2009). Asumsi plastis elastis sempurna yang digunakan pada model Mohr-Coulomb dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Asumsi plastis elastis sempurna model Mohr-Coulomb (Ti, Huat, Noorzaei, Jaafar, & Sew, 2009)

Mohr (1900) mengemukakan bahwa nilai keruntuhan dapat dicari dengan persamaan:

$$|\tau| = c - \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

Dengan: c = kohesi, ϕ = sudut gesek dalam

Persamaan diatas memperlihatkan bahwa kegagalan atau keruntuhan material terjadi pada saat lingkaran Mohr melewati bidang keruntuhan gesek Coulomb. Hal ini juga menunjukkan bahwa tegangan utama menengah σ_2 tidak berpengaruh terhadap kondisi kegagalan. Oleh karena itu, fungsi leleh pada bidang keruntuhan Mohr-Coulomb dapat dicari dengan persamaan:

$$f = |\tau| + \sigma_n \tan \phi - c = 0 \quad (2)$$

Keakuratan hasil dan kemudahan pemakaian rumus Mohr-Coulomb membuat persamaan ini menjadi persamaan yang paling sering dipakai untuk menganalisis suatu material tanah (Midas GTS NX *Analysis Reference*).

Program Berbasis Geoteknik

Pada kesempatan kali ini, program yang dipakai untuk menganalisis data tanah yang telah ditentukan adalah Midas GTS NX. Midas GTS NX adalah *software* berbasis FEM yang dipakai untuk memodelkan suatu struktur ataupun tanah. GTS NX biasa digunakan untuk menganalisis pengaruh tekanan lateral maupun penurunan yang tidak seragam pada stabilitas suatu fondasi (Saini & Goyal, 2019). Midas GTS NX memungkinkan penggunaannya untuk

menggunakan metode *finite element* secara efektif. Karena program ini bersifat geoteknik, maka program ini memiliki cukup banyak model matematika untuk menggambarkan perilaku tanah berdasarkan sifat fisik dan mekanis masing-masing tanah (Sekisov, Varvarkina, Gura, Savenko, & Shikhovstov, 2019). Sementara untuk berbagai tipe analisis yang ditawarkan Midas GTS NX dapat dilihat pada gambar 3.

Analysis Types
Linear static analysis
Nonlinear static analysis
Construction stage analysis
Consolidation analysis
Fully Coupled Stress-Seepage analysis
Seepage(steady-state) analysis
Seepage(transient) analysis
Eigenvalue analysis
Response spectrum analysis
Linear time history(modal/direct) analysis
Nonlinear time history analysis
1D/2D equivalent linear analysis
Slope stability(SRM/SAM)
Nonlinear time history + SRM
Heat Transfer(steady-state) analysis
Heat Transfer(transient) analysis
Thermal stress analysis
Fully Coupled (Thermal-Hydro-Mechanical) analysis

Gambar 3. Berbagai tipe analisis yang ditawarkan Midas GTS NX (Midas GTS NX Analysis Reference)

Physical quantity	English	SI
Position, Length, Displacement	Inch	meter
Modulus of Elasticity	lbf/inch ²	Newton/meter ²
Moment	inch-lbf	Newton-meter
Force	lbf	Newton
Mass	lbf-sec ² /inch	kilogram
Time	second	second
Stress	lbf/inch ²	Newton/meter ²

Gambar 4. Satuan yang dipakai dalam sistem SI dan English Unit System (Midas GTS NX Analysis Reference)

Hal hal yang berkaitan dengan penginputan data seperti ukuran struktur, *properties* untuk *material*, dan lain-lain perlu didefinisikan dengan mengacu kepada suatu sistem unit tertentu. Pada Midas GTS NX, konversi sebuah unit seperti panjang/waktu/gaya dapat dilakukan selama pemodelan. Satuan unit harus dikonversi menjadi suatu sistem unit yang sama sebelum dilakukan analisis. Satuan unit yang tersedia didalam Midas GTS NX adalah sistem SI dan *English Unit System*. Setelah menyatukan satuan menjadi suatu sistem unit, hasil analisis juga akan keluar dengan satuan yang dipakai pada saat pemodelan (Midas GTS NX Analysis Reference). Satuan yang dipakai dalam Midas GTS NX dapat dilihat pada Gambar 4.

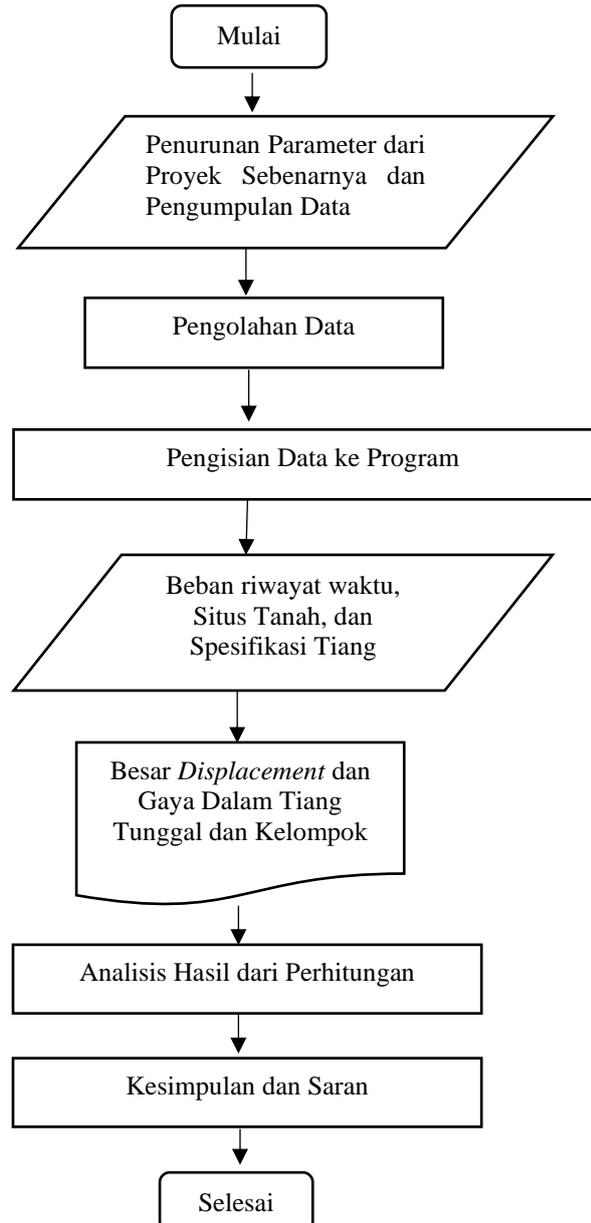
Pada program ini disediakan beberapa fase yang digunakan untuk memisahkan pemodelan model perencanaan yang berbeda, diantaranya adalah:

1. *Geometry*
Fase *Geometry* adalah fase dimana tanah dan struktur dimodelkan kedalam Midas GTS NX.
2. *Mesh*
Mesh adalah fase dimana *properties* dari material didefinisikan dan pemodelan geometri yang sudah dibuat diubah ke pemodelan elemen hingga.
3. *Analysis*
Pada fase ini, dapat dipilih tipe analisis yang diinginkan seperti *static/slope analysis*, *seepage/consolidation analysis*, *dynamic analysis*, ataupun *thermal analysis*. *Water level* dan *construction stage* juga dimasukkan pada fase ini.
4. *Results*

Setelah tanah dimodelkan dengan metode elemen hingga dan dipilih tipe analisis yang diinginkan, maka kita dapat melihat hasil analisis yang telah dilakukan.

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, metode penelitian yang digunakan adalah studi literatur. Studi literatur dilakukan dengan mencari dasar-dasar teori yang dianggap relevan terhadap penelitian ini. Kemudian diambil data tanah dari penurunan proyek sebenarnya yang berlokasi di Tangerang. Setelah itu diambil 11 rekaman percepatan gempa agar sesuai dengan ASCE 7:16 dan SNI 1726:2019 pasal 11.2.2. Data gempa yang digunakan pada penelitian ini adalah data gempa yang diambil dari *library* Midas GTS NX dan *website Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Ground Motion Database*. Sedangkan spesifikasi tiang pancang yang digunakan pada penelitian ini diambil dari brosur JHS. Sementara itu, pada gambar 5 dapat dilihat diagram alir yang digunakan di penelitian ini.



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, digunakan data tanah yang diambil dari proyek sebenarnya yang berlokasi di Tangerang. Tanah digolongkan sebagai tanah lunak (SE) karena memiliki nilai N-SPT yang relatif kecil, nilai $PI > 20$, dan nilai kadar air $\geq 40\%$ yang dapat dilihat pada parameter tanah dalam tabel 2. Untuk mendapat nilai penurunan parameter tanah

dilakukan dengan cara korelasi. Pengujian ini dilakukan pada tiang tunggal dan tiang kelompok yang terdiri dari 4 tiang dengan jarak 3 m dan jarak tiang ke pile cap adalah 1 m. Untuk parameter tiang dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 2. Parameter Tanah

Korelasi Parameter Tanah						
Elevasi [m]	0 s/d 12	12 s/d 20	20 s/d 26	26 s/d 36	36 s/d 48	48 s/d 61
Jenis Tanah	<i>Clay</i>	<i>Clay</i>	<i>Sandy Silt</i>	<i>Silty Clay</i>	<i>Clayey Silt</i>	<i>Clayey Silt</i>
Material Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Elastic Modulus (E) [kN/m²]	11820	39320	38110	35720	30190	24660
γ_{wet} [kN/m³]	15,175	14,131	15,968	16,908	16,859	16,727
γ_{sat} [kN/m³]	15,371	15,813	15,913	17,034	17,265	16,881
e_0	2,216	1,815	1,899	1,337	1,265	1,465
Cohesion (C) [kN/m²]	27,365	89,691	80,909	58,272	52,761	59,4

Tabel 3. Parameter Tiang

Parameter Tiang	
Elastic Modulus (E) [kN/m²]	30568071
Unit Weight (γ) [kN/m³]	24
Pile Type	<i>Solid Rectangle</i>
Diameter (D) [m]	0,5
Area (A) [m²]	0,25
Moment of Inertia (I) [m⁴]	0,005208333

Daya dukung dari tiang yang diperhitungkan untuk dimasukkan kedalam program berbasis geoteknik dibagi menjadi 2, yaitu:

1. Daya Dukung Selimut

Perhitungan daya dukung selimut diambil dari persamaan Decourt pada tahun 1995 dengan formula sebagai berikut:

$$Q_s = 1 \times (2,8 \times 3,25 + 10) = 19,1 \text{ kN/m}^2$$

Nilai 1 didapat dari nilai α untuk *displacement piles* untuk kebanyakan tanah, sementara 3,25 diambil dari nilai SPT rata-rata yang dinormalisir terhadap efisiensi 60% energi sepanjang selimut tiang.

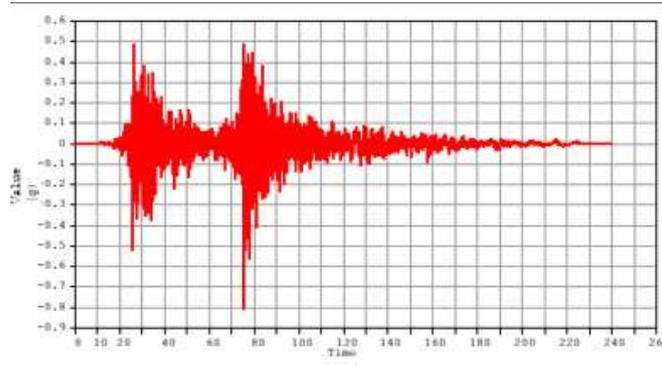
2. Daya Dukung Ujung Tiang

Perhitungan daya dukung ujung tiang juga diambil dari persamaan Decourt pada tahun 1995 dengan formula sebagai berikut:

$$Q_p = 100 \times 7,5 \times 0,5 \times 0,5 = 187,5 \text{ kN}$$

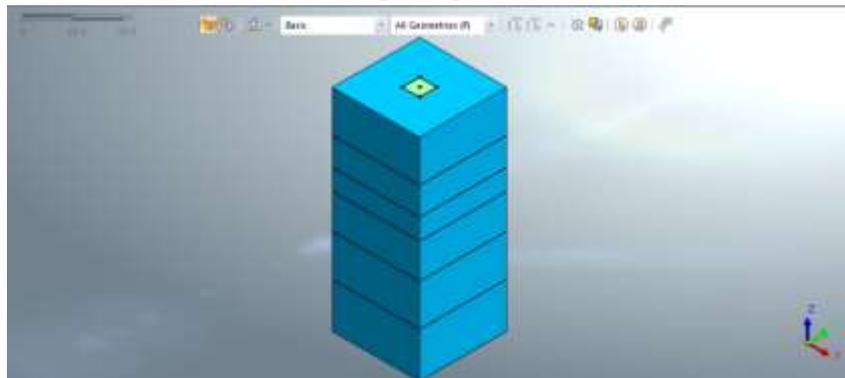
Nilai 100 diambil dari Base Factor untuk displacement piles pada tanah clay. Nilai 7,5 diambil dari N-SPT rata-rata disekitar ujung tiang dimana diambil nilai rata-rata N-SPT 8 x diameter diatas ujung tiang dan 2 x diameter dibawah tiang, sementara 0,5 diambil dari nilai diameter tiang yang digunakan.

Beban yang dipakai pada penelitian ini adalah gempa dengan arah horizontal x. Beban gempa dalam bentuk akselerasi dan didapat dari riwayat waktu 11 gempa yang sudah ditentukan. Beban gempa yang dipakai terdiri dari 2 gempa *megathrust* yaitu Tohoku dengan Tokachi, 4 gempa *benioff* yaitu Kuril Islands, Mexico City, Hyuganada serta Chuetsu-Oki, dan 5 gempa *sesar* yaitu Hyougoken, Kern County, San Fernando, Miyagi, dan Nihonkai. Contoh input gempa diambil dari gempa Tohoku yang dapat terlihat pada gambar 6.



Gambar 6. Input Gempa Tohoku

Pemodelan tiang pada penelitian ini dilakukan dengan menentukan koordinat tiang kemudian melakukan *extrude* pada komponen tiang sedalam 12 m. Untuk pemodelan tanah dan *pile cap*, dilakukan input data koordinat kemudian dibuat menjadi elemen 2D dengan *make face* yang terdapat pada *polyline*. Setelah itu, *pile cap* dan tanah yang sudah berbentuk 2D di-*extrude* agar menjadi elemen 3D seperti yang dapat terlihat pada gambar 7. *Mesh* yang digunakan adalah *default tetra mesher*. Beban gempa ditempatkan pada permukaan tanah. Tanah memiliki lebar 25 m dengan kedalaman 61 m. Muka air tanah terdapat pada kedalaman 1,35 m. *Boundary condition* yang diberikan adalah *ground support*, *pile constraint*, dan *non consolidation* untuk *pile cap*.



Gambar 7. Pemodelan *Pile Group* pada Program Berbasis Geoteknik

Hasil Analisis Tiang Akibat Gempa Tohoku

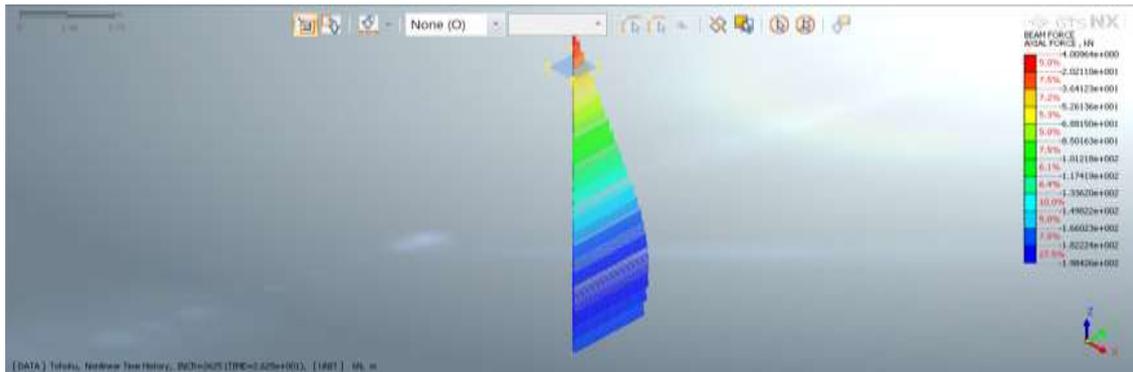
Pada saat percepatan tanah arah positif maksimum yang terletak pada detik ke 26,25, didapat hasil gaya dalam normal dari *pile group* lebih besar dibandingkan dengan *pile tunggal*. *Pile group* juga memiliki nilai yang lebih besar pada gaya dalam lintang dan momen arah Y dan Z. Untuk nilai *displacement* translasi dan rotasi, *pile group* masih sedikit lebih besar daripada *pile tunggal*.

Pada tabel 4, dapat dilihat perbandingan antara gaya dalam dan *displacement pile tunggal* serta *pile group* t manual maksimum positif Tohoku. Sementara gambar 8 adalah gambar *axial force pile tunggal* t manual maksimum positif Tohoku. Gambar 9 adalah *shear force Y* dari *pile group*. *Bending moment Z pile tunggal* dapat terlihat dari gambar 10 dan yang terakhir pada gambar 11 adalah *displacement(total translation)* dari *pile group*.

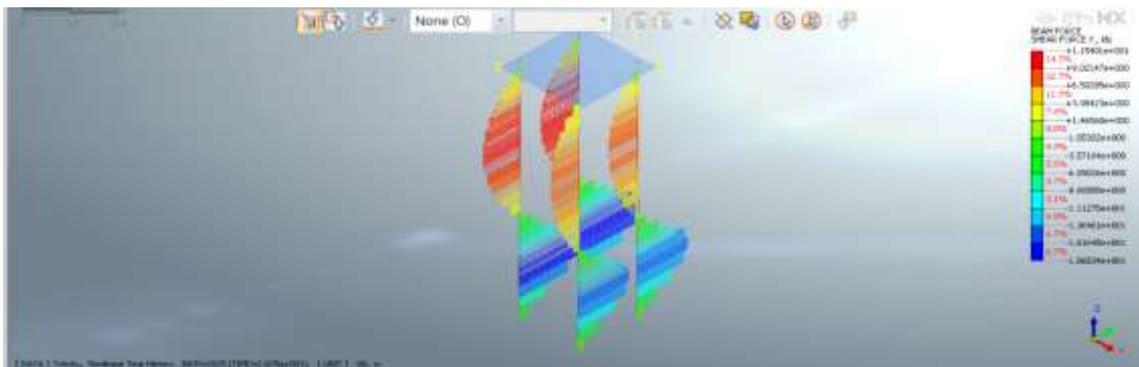
Tabel 4. Hasil Gaya Dalam dan *Displacement* T Manual Maksimum Positif Tohoku

No	Tohoku	<i>Pile Tunggal</i>	<i>Pile Group</i>
1	<i>Axial Force</i> [KN]	-198,426	-211,451
2	<i>Shear Force Y</i> [KN]	-14,0983	-18,6834

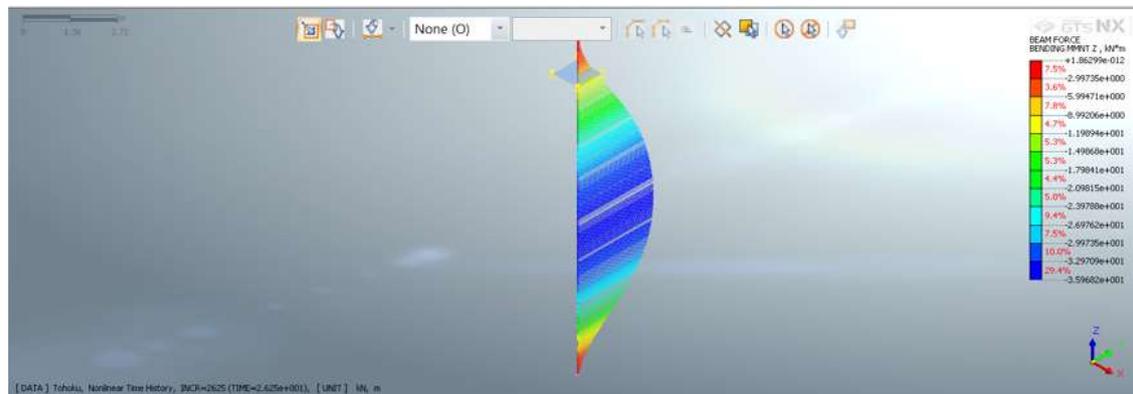
3	Shear Force Z [KN]	0,194	-0,5091
4	Bending Moment Y [KNm]	-0,5249	-1,2347
5	Bending Moment Z [KNm]	-35,9682	-51,6931
6	Displacement (Total Translation) [m]	0,7538	0,7582
7	Displacement (Total Rotation) [rad]	0,0054	0,0064



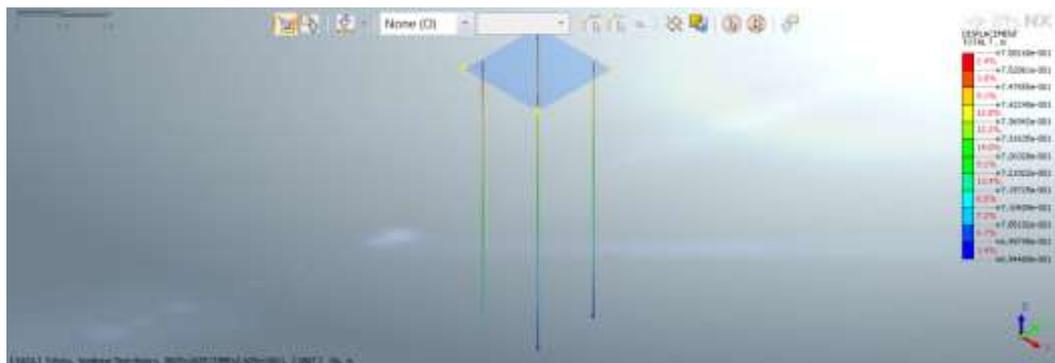
Gambar 8. Axial Force Pile Tunggal pada T Manual Maksimum Positif Tohoku



Gambar 9. Shear Force Y Pile Group pada T Manual Maksimum Positif Tohoku



Gambar 10. Bending Moment Z Pile Tunggal pada T Manual Maksimum Positif Tohoku



Gambar 11. Displacement (Total Translation) Pile Group pada T Manual Maksimum Positif Tohoku

Resume Hasil Program

Pada bagian ini akan ditampilkan resume hasil program dari 11 gempa yang sudah dianalisis. Pada tabel 5 dapat terlihat resume hasil disaat percepatan tanah yang diujikan pada *pile* tunggal ada pada kondisi maksimum arah positif, sedangkan tabel 6 merupakan resume hasil disaat percepatan tanah yang diujikan pada *pile* tunggal ada pada kondisi maksimum arah negatif. Tabel 7 dan tabel 8 adalah resume hasil disaat percepatan tanah yang diujikan pada *pile group* ada pada kondisi maksimum arah positif dan negatif.

Tabel 5. Resume Hasil T Manual Maksimum Positif *Pile* Tunggal

No	Earthquake	Axial Force [KN]	Shear Force Y [KN]	Bending Moment Z [KNm]	Displacement (Total Translation) [m]
1	Kuril Islands	-212,294	-35,164	-124,929	6,331
2	Hyougoken	-214,422	-54,2154	-200,05	1,1519
3	Hyuganada	-214,404	42,0804	149,958	8,38
4	Mexico City	-207,331	0,8717	1,8931	0,6271
5	Miyagi	-184,005	-3,5137	-9,1448	0,4601
6	Nihonkai	-213,592	55,5791	203,726	7,337
7	San Fernando	-215,252	-4,5649	-12,895	0,5285
8	Tohoku	-198,426	-14,0983	-35,9682	0,7538
9	Tokachi	-212,047	14,2324	-44,3272	1,2419
10	Kern County	-212,32	6,2991	23,1048	0,5153
11	Chuetsu Oki	-212,515	-2,3958	7,3125	0,515

Tabel 6. Resume Hasil T Manual Maksimum Positif *Pile* Tunggal

No	Earthquake	Axial Force [KN]	Shear Force Y [KN]	Bending Moment Z [KNm]	Displacement (Total Translation) [m]
1	Kuril Islands	-214,171	14,1939	26,014	5,7075
2	Hyougoken	-214,925	14,1036	19,0949	1,0624
3	Hyuganada	-211,413	36,825	143,928	8,2025
4	Mexico City	-205,277	-2,0536	-7,9603	0,4584
5	Miyagi	-215,958	9,4166	27,7621	3,1424
6	Nihonkai	-213,201	44,2353	160,06	6,9884
7	San Fernando	-213,856	15,713	61,0876	0,5426

8	Tohoku	-211,29	19,4524	56,1438	3,3377
9	Tokachi	-212,549	2,8693	7,1562	1,3701
10	Kern County	-211,426	3,5401	13,5448	0,4754
11	Chuetsu Oki	-200,788	-1,5367	-5,5161	0,4488

Tabel 7. Resume Hasil T Manual Maksimum Positif *Pile Group*

No	Earthquake	Axial Force [KN]	Shear Force Y [KN]	Bending Moment Z [KNm]	Displacement (Total Translation) [m]
1	Kuril Islands	-214,341	25,1162	-79,4659	6,3314
2	Hyougoken	-217,849	-42,1458	-146,364	1,1455
3	Hyuganada	-214,572	35,2061	130,57	8,4109
4	Mexico City	-201,526	-0,8107	1,7159	0,6441
5	Miyagi	-198,268	3,7622	10,6627	0,4803
6	Nihonkai	-213,126	-38,652	134,171	7,3807
7	San Fernando	-213,429	-7,8512	-24,1355	0,5512
8	Tohoku	-211,451	-18,6834	-51,6931	0,7582
9	Tokachi	-215,23	9,4394	-22,5632	1,2591
10	Kern County	-211,142	6,3762	22,7376	0,5491
11	Chuetsu Oki	-210,279	-2,6048	-6,9422	0,538

Tabel 8. Resume Hasil T Manual Maksimum Negatif *Pile Group*

No	Earthquake	Axial Force [KN]	Shear Force Y [KN]	Bending Moment Z [KNm]	Displacement (Total Translation) [m]
1	Kuril Islands	-213,67	26,2294	70,2174	5,7153
2	Hyougoken	-215,072	14,3764	-39,8566	1,0651
3	Hyuganada	-214,64	-31,9922	104,835	8,2265
4	Mexico City	-192,339	-1,5469	-5,0489	0,487
5	Miyagi	-212,931	-12,0855	42,0871	3,1414
6	Nihonkai	-215,122	-29,126	100,199	6,9872
7	San Fernando	-212,395	-15,7524	56,1707	0,5688
8	Tohoku	-214,171	-15,9435	-41,0356	3,3417
9	Tokachi	-214,491	8,7309	28,1007	1,3647
10	Kern County	-208,156	4,7033	16,3535	0,4963
11	Chuetsu Oki	-179,361	-1,6694	-5,5737	0,4722

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang sudah dilakukan diatas diperoleh beberapa kesimpulan yaitu:

1. Berdasarkan data hasil dari 11 gempa yang dianalisis, *pile* tunggal cenderung memiliki nilai *axial force* yang lebih besar daripada *pile group*.
2. Berdasarkan data hasil dari 11 gempa yang dianalisis, *pile* tunggal cenderung memiliki nilai *shear force* Y yang lebih besar daripada *pile group*.
3. Berdasarkan data hasil dari 11 gempa yang dianalisis, *pile group* berkemungkinan besar memiliki nilai *shear force* Z dan bending moment Y yang lebih besar daripada *pile* tunggal.
4. Berdasarkan data hasil dari 11 gempa yang dianalisis, *pile* tunggal berkemungkinan besar memiliki nilai *bending moment* Z yang lebih besar daripada *pile group*.
5. Berdasarkan data hasil dari 11 gempa yang dianalisis, *pile group* berkemungkinan besar memiliki nilai *displacement* translasi dan rotasi yang lebih besar daripada *pile* tunggal.
6. Dari 11 gempa yang telah dianalisis, gempa yang sangat membahayakan adalah gempa Nihonkai, gempa Hyougoken, dan gempa Hyuganada karena gempa-gempa tersebut menimbulkan gaya dalam ataupun *displacement* terbesar diantara gempa lainnya.
7. Bila dibandingkan dengan analisis dinamik respon spektrum, analisis riwayat waktu non linier lebih memiliki kelebihan karena memakai 11 gempa sehingga hasilnya lebih akurat. Selain itu, analisis riwayat waktu non linier yang dapat melihat efek bangunan akibat gempa per satuan waktu juga lebih cocok karena gempa memberikan respon yang terus berganti berdasarkan dengan waktu. Kemudian, analisis riwayat waktu non linier juga memiliki percepatan tanah arah positif dan negatif, sedangkan respon spektrum hanya memiliki percepatan tanah arah positif.

Saran

Berikut adalah saran untuk memperoleh hasil analisis yang lebih baik pada analisis selanjutnya:

1. Pada penelitian ini hanya digunakan komponen gempa horizontal arah X sehingga hasil analisis menjadi kurang maksimal. Akan lebih baik dan akurat apabila digunakan 3 komponen arah yaitu horizontal X, horizontal Y, dan vertikal.
2. Di penelitian ini digunakan data gempa-gempa yang berasal dari luar wilayah Indonesia. Diperlukan data-data gempa dari wilayah Indonesia agar hasil analisis lebih bermanfaat bagi pembangunan di Indonesia.
3. Pada penelitian ini hanya menggunakan satu tipe tanah yaitu tanah lunak. Oleh karena itu, dapat dilakukan analisis pada tipe-tipe tanah lainnya agar hasilnya menjadi lebih maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung SNI 1726:2019*. Jakarta: BSN.
- Kevin, & Barus, S. (2014). 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). 15.
- Magar, J., Kudtarkar, A., Pachpohe, J., & Nagargoje, P. (2020). Study and Analysis of Types of Foundation and Design Construction. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 07 Issue: 08, 7*.
- Morris, G. J., Thompson, A. J., Dismuke, J. N., & Bradley, B. A. (2019). GROUND MOTION INPUT FOR NONLINEAR RESPONSE HISTORY ANALYSIS: PRACTICAL LIMITATIONS OF NZS 1170.5 AND COMPARISON TO US STANDARDS. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 52, No.3, September 2019, 15*.
- Nedimovic, M. R. (2006). Crustal structure and seismic activity at subduction zones. 29.
- Saini, S., & Goyal, E. T. (2019). ANALYSIS OF PILED RAFT FOUNDATION USING MIDAS GTS NX. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume: 06 Issue: 05, 9*.
- Sekisov, A., Varvarkina, A., Gura, D., Savenko, A., & Shikhovstov, A. (2019). PIT DESIGN TAKING INTO ACCOUNT WATER LEVEL REDUCTION USING THE SOFTWARE PACKAGE MIDAS GTS NX. *IIOAB Journal Vol.10, 8*.
- Sumantri, A. (2020). *Analisa Riwayat Waktu pada Struktur Bangunan dengan Menyertakan Efek Interaksi Tanah dan Pondasi Tiang*. Medan.
- Tallapalem, U., Shaik, N., & Valluri, S. (2019). Time History Analysis on Precast Building. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IRJTE) Volume-8 Issue-4, 8*.

- Ti, S. K., Huat, B. B., Noorzaei, J., Jaafar, M. S., & Sew, G. S. (2009). A Review of Basic Soil Constitutive Models for Geotechnical Application. *EJGE Vol 14. Bund. J*, 18.
- Wibowo, A. S. (2011). Analisis Kinerja Struktur pada Bangunan Tidak Beraturan dengan Analisis Dinamik Menggunakan Metode Analisis Riwayat Waktu. 123.
- Widjojoko, L. (2015). Analisa Dan Desain Pondasi Tiang Pancang Berdasarkan Bentuk Tiang. *Jurnal Teknik Sipil UBL Volume 6 No. 2 Oktober 2015*, 29.