

## ANALISIS *PUSHOVER* PADA TIANG PANCANG KOTAK TUNGGAL DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Devin Fajar Saputra<sup>1</sup>, Amelia Yuwono<sup>2</sup> dan Giovanni Pranata<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
Email: devins.ts@stu.untar.ac.id

<sup>2</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
Email: amelia774@yahoo.com

<sup>3</sup> Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
Email: giovannip@untar.ac.id

### ABSTRAK

Permasalahan yang sering terjadi dalam konstruksi pembangunan bangunan adalah gempa. Tidak hanya bangunan tinggi yang memiliki desain tahan gempa, tetapi fondasi pun juga harus memiliki desain tahan gempa agar bangunan diatas fondasi tahan terhadap gempa. Di Indonesia terdapat metode berbasis kinerja untuk menentukan suatu gaya geser gempa dan deformasi lateral yang dilakukan berdasarkan analisis Pushover untuk mendapatkan titik kinerja struktur, yaitu dengan memberikan beban lateral statik tertentu pada struktur, yang kemudian ditingkatkan secara bertahap hingga struktur mencapai suatu batas tertentu atau mengalami kegagalan struktur, sehingga didapatkan kurva kapasitas. Lalu dengan metode ATC-40 kurva kapasitas tersebut dirubah kedalam kurva ADRS atau menjadi spektrum kapasitas. Selanjutnya kurva spektrum kapasitas dan kurva demand spektrum disajikan dalam satu grafik ADRS. Dalam grafik dengan format ADRS tersebut akan ada titik perpotongan yaitu disebut sebagai titik kinerja. Hasil penelitian menunjukkan titik kinerja pada tiang memiliki tingkat kinerja *Immediate Occupancy*, dan *drift* terkecil berada pada tiang 500x500 dan 400x400 sebesar 0.002 m.

Kata kunci: Pushover , ATC-40, Metode Elemen Hingga, dan Metode Berbasis Kinerja.

## 1. PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Gaya gempa yang besar juga mengakibatkan struktur fondasi harus berfungsi optimal untuk menahan beban lateral yang diakibatkan oleh gempa. Fondasi yang didesain harus lebih kuat dari kolom pada struktur bangunan tahan gempa. Maka dari itu, beban lateral akibat gaya gempa rencana yang bekerja pada fondasi harus lebih kecil dari daya dukung *ultimate* lateral tiang, dalam arti setelah beban lateral tidak bekerja lagi, fondasi dapat kembali ke posisinya semula (fondasi masih berada pada daerah elastis).

Fondasi didesain terdiri dari satu tiang (tiang tunggal) dan dapat juga dikelompokkan dalam sebuah kelompok tiang. Dalam mendukung beban lateral antara sebuah fondasi tiang dengan fondasi kelompok tiang berbeda. Daya dukung lateral dari kelompok tiang bukan dari penjumlahan daya dukung lateral masing – masing tiang. Dalam menghitung daya dukung lateral suatu kelompok tiang diperlukan adanya faktor pengali untuk mengetahui daya dukung kelompok tiang. Faktor pengali tersebut bisa dikenal dengan faktor efisiensi atau faktor reduksi.

Desain gempa yang umum digunakan dalam desain struktur tahan gempa adalah desain berbasis gaya atau *Force Based Design*. Konsep ini menggunakan gaya sebagai pendekatannya. Di Indonesia desain berbasis gaya ini didesain sesuai dengan peraturan desain gempa yang berlaku di Indonesia yaitu SNI 1726:2012. Desain ini menjamin bahwa struktur yang kita desain tidak mengalami keruntuhan (*collapse*) jika terjadi gempa besar (Tavio & Usman, 2018). Tetapi tidak mengurangi kerugian material yang ternyata masih besar.

Analisis *pushover* merupakan sebuah sarana untuk memberikan solusi berdasarkan *Performance Based Seismic Design* yang pada intinya adalah mencari kapasitas struktur terhadap beban lateral. Prosedur analisis pushover dengan memberikan beban statis dalam arah lateral yang ditingkatkan secara bertahap (*incremental*) hingga mencapai target deformasi tertentu atau mencapai keruntuhan.

### Batasan Masalah

Adapun lingkup masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Analisis tiang tunggal dengan metode elemen hingga menggunakan bantuan program.

2. Simulasi pola kegagalan ataupun sendi plastis pada tiang tunggal akibat beban lateral dengan metode *pushover* menggunakan bantuan program.
3. Menggunakan jenis tiang pancang *squarepile* 50x50 cm<sup>2</sup> dengan kedalaman 30 m

### Rumusan Masalah

Dari uraian yang dituliskan diatas, masalah perencanaan yang harus diselesaikan adalah :

1. Dengan melakukan simulasi *pushover* ini, apakah kita dapat menentukan perilaku tiang tunggal yang masih elastis dan non elastis?
2. Digunakan program metode elemen hingga untuk mensimulasikan *pushover*
3. Apakah dengan metode ATC-40 dapat menentukan titik kinerja pada sturktur?

### Tujuan Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tambahan yang bermanfaat baik teoritis maupun praktis di bidang fondasi. Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan utama dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui kategori resiko yang terjadi pada fondasi tiang setelah dilakukan analisis *pushover*.
2. Mendapatkan kurva kapasitas untuk fondasi tiang.
3. Mengetahui titik kinerja pada fondasi tiang.

### Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini dapat diperoleh manfaat antara lain :

1. Manfaat teoritis, diharapkan penulis dapat menambah wawasan ilmu pengetahuan dibidang teknik sipil, khususnya dalam bidang fondasi yang di bebani gaya gempa.
2. Manfaat praktis, sebagai informasi tambahan untuk praktisi yang ingin menerapkan di lapangan, maupun akademis dalam bidang fondasi yang dibebani gaya gempa.

## 2. LANDASAN TEORI

### Fondasi Tiang Menahan Beban Lateral

Beban lateral dan momen dapat bekerja pada fondasi tiang akibat gaya gempa, gaya angin pada struktur atas, beban statik seperti misalnya tekanan aktif tanah pada *abutment* jembatan atau *soldier piles*, gaya tumbukan kapal dan lain – lain. Dalam analisis, kondisi kepala tiang dibedakan menjadi kondisi kepala tiang bebas (*free head*) dan kepala tiang terjepit (*fixed head* atau *restrained*).

Beban lateral yang diijinkan pada fondasi tiang diperoleh berdasarkan salah satu dari dua kriteria berikut :

- Beban lateral ijin ditentukan dengan membagi beban ultimit dengan suatu faktor keamanan
- Beban lateral yang ditentukan berdasarkan defleksi maksimum yang diijinkan.

Gambar 1. Cara keruntuhan tiang akibat gaya horizontal (Broms, 1964)

### Metode Subgrade Non-linier

Metode *subgrade non-linier* yang sering dikenal sebagai metode *p-y* merupakan salah satu model pendekatan dimana reaksi tanah dimodelkan sebagai pegas – pegas *nonlinier* dan merupakan metode yang direkomendasikan untuk desain fondasi tiang untuk beban lateral pada kondisi tanah berlapis. Pendekatan ini mudah diimplementasikan dengan menggunakan beberapa *software* komputer yang tersedia terutama untuk kondisi tiang panjang.

### Analisis Pushover

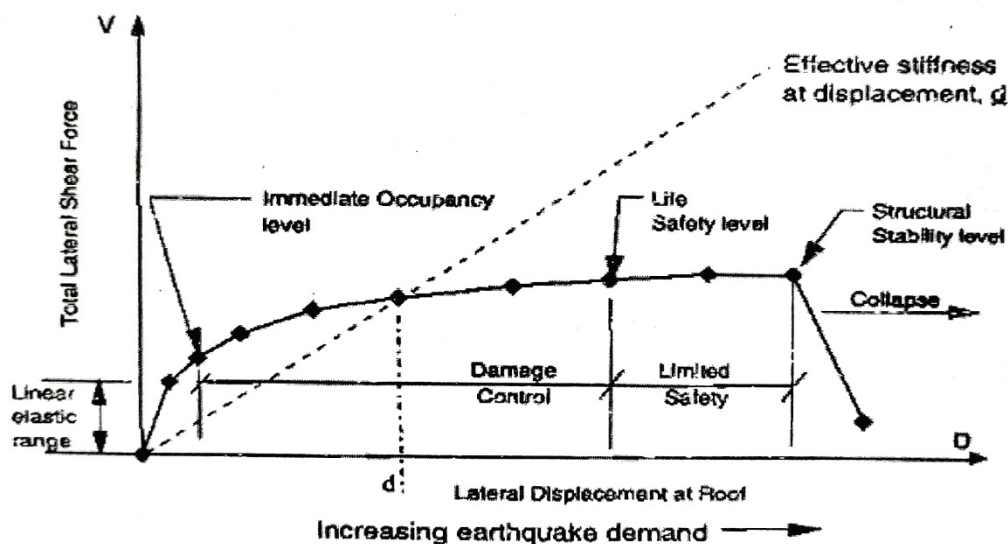
Analisis *pushover* merupakan sebuah sarana untuk memberikan solusi berdasarkan *Performance Based Seismic Design* yang pada intinya adalah mencari kapasitas struktur terhadap beban lateral. dengan cara analisis statis *non-linier* ini dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur dianggap sebagai beban lateral statis, yang kemudian ditingkatkan secara bertahap hingga struktur mencapai suatu batas tertentu atau mengalami kegagalan struktur.

Analisis dilakukan dengan memberikan suatu pola beban lateral statis pada struktur, yang kemudian secara bertahap ditingkatkan dengan faktor pengali sampai satu target perpindahan lateral dari suatu titik acuan tercapai. Pada proses *pushover*, struktur didorong sampai mengalami leleh disatu atau lebih lokasi di struktur tersebut. Kurva kapasitas akan memperlihatkan suatu kondisi linier sebelum mencapai kondisi leleh dan selanjutnya berperilaku *non-linier*.

### Kinerja Struktur Metode ATC-40

Respon dari struktur terhadap gerakan tanah yang diakibatkan oleh gempa menyebabkan perpindahan lateral dan deformasi pada setiap elemen struktur. Pada level respon rendah, deformasi yang terjadi akan dalam rentang elastis (linier) dan tidak akan ada kerusakan yang timbul. Pada level respon tinggi, deformasi elemen akan melebihi kapasitas linier elastis dan bangunan akan mengalami kerusakan. Untuk memberikan kinerja seismik yang andal, bangunan harus memiliki sistem penahan gaya lateral yang lengkap, yang mampu membatasi perpindahan lateral akibat gempa pada level kerusakan yang berkelanjutan dan untuk tujuan kinerja yang diinginkan. Faktor-faktor dasar yang mempengaruhi kemampuan sistem penahan gaya lateral meliputi massa bangunan, kekakuan, redaman dan konfigurasi: kapasitas deformasi pada elemen, kekuatan dan karakter gerakan tanah. (ATC-40,1996).

Ada beberapa tingkatan kinerja sesuai ATC-40, dimana tingkatan kinerja digambarkan kurva hubungan antara perpindahan lateral dan besar gaya yang bekerja seperti pada Gambar 2. Kurva Kapasitas menggambarkan plot dari total gaya geser dasar akibat gempa, “V” pada struktur.



Gambar 2. Tipikal Kurva Kapasitas Pada Berbagai Tingkat Kinerja Struktur (ATC-40,1996: 6-6)

Tujuan utama dari desain berbasis kinerja yaitu untuk menentukan tingkat kinerja yang diinginkan dari bangunan. Kinerja seismik digambarkan dengan menetapkan tingkat kerusakan maksimum yang diizinkan (*performance level*) untuk mengidentifikasi bahaya gempa. Yang telah diketahui pada Gambar 2. kurva kapasitas suatu struktur terhadap beban lateral, dimana terdapat level-level kinerja tertentu. Level kinerja tersebut dapat dideskripsikan lagi atas bagaimana kondisi bangunan pasca gempa dan kategori bangunan yang diizinkan terhadap level kinerja tertentu, dan ditabelkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi Bangunan Pasca Gempa dan Kategori Bangunan pada Tingkat Kinerja Struktur  
(ATC-40,1996: *chap* 3.2)

Tingkat Kinerja	Kondisi Bangunan Pasca Gempa	Kategori Bangunan
SP-1 <i>Immediate Occupancy (IO)</i>	Bangunan aman saat terjadi gempa, resiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti, dan dapat segera difungsikan kembali.	Struktur bangunan yang mutlak difungsikan sebagai sarana penyelamatan, penyimpanan barang berbahaya, atau struktur bangunan yang dapat mempengaruhi ekonomi sosial. Contohnya rumah sakit, gudang bahan bakar/bahan berbahaya, dan lain-lain.
SP-2 <i>Damage Control (DC)</i>	Merupakan transisi antara <i>Immediate Occupancy (IO)</i> SP-1 dan <i>Life Safety (LS)</i> SP-3. Bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi, resiko korban jiwa manusia sangat kecil.	Struktur untuk bangunan bersejarah, bangunan yang menjadi tempat penyimpanan barang-barang berharga.
SP-3 <i>Life Safety (LS)</i>	Bangunan mengalami kerusakan tetapi tidak diperkenankan mengalami keruntuhan yang menyebabkan korban jiwa manusia (resiko korban jiwa sangat rendah). Setelah terjadi gempa maka bangunan dapat berfungsi kembali setelah dilakukan perbaikan komponen struktural maupun non-struktural.	Fasilitas-fasilitas umum, gedung perkantoran, perumahan, gudang, dan lain-lain.
SP-4 <i>Limited Safety</i>	Merupakan transisi antara SP-3 dan SP-4 dan bukan merupakan tingkatan serta tidak memperhitungkan aspek ekonomis dalam melakukan perbaikan pasca gempa.	-
SP-5 <i>Structure Stability (SS)</i>	Struktur pasca gempa mengalami kerusakan hingga diambang keruntuhan total maupun parsial. Komponen struktur penahan beban gravitasi masih bekerja meskipun keseluruhan kestabilan sudah diambang keruntuhan	-
SP-6 <i>Not Considered</i>	Bukan merupakan tingkat kinerja struktur, tetapi hanya untuk melakukan evaluasi seismik non-struktural atau <i>retrofit</i> .	-

### Titik Kinerja Struktur Metode ATC-40

Untuk menentukan tingkat kinerja dari struktur pada metode ATC-40 adalah dengan metode spektrum kapasitas (*capacity-spectrum*). Metode spektrum kapasitas yaitu memplotkan *demand* respon spektrum dan kurva kapasitas dalam satu format antara spektra percepatan vs spektra perpindahan atau disebut sebagai format *Acceleration-Displacement Response Spectra* (ADRS).

Untuk merubah kurva kapasitas ke dalam format ADRS atau menjadi spektrum kapasitas maka terlebih dahulu kita harus memahami tentang hubungan faktor partisipasi modal, modal kpefisien massa, dan perpindahan bangunan, maka digunakan persamaan-persamaan 1 – 4

$$PF_1 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{w_i \phi_{i1}}{g} \right)}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{w_i \phi_{i1}^2}{g} \right)} \right] \quad (1)$$

dengan  $PF_1$  = faktor partisipasi modal pada *mode* pertama,  $w_i/g$  = massa pada tingkat ke- $i$ ,  $\phi_{i1}$  = amplitudo *mode*-1 pada tingkat ke- $i$ ,  $N$  = tingkat  $N$ , tingkat tertinggi pada proporsi utama struktur.

$$\alpha_1 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N \frac{w_i \phi_{i1}}{g} \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{g} \right] \left[ \sum_{i=1}^N \frac{w_i \phi_{i1}^2}{g} \right]} \quad (2)$$

dengan  $\alpha_1$  = modal koefisien massa pada *mode* pertama,  $w_i/g$  = massa pada tingkat ke- $i$ ,  $\phi_{i1}$  = amplitudo *mode*-1 pada tingkat ke- $i$ ,  $N$  = tingkat  $N$ , tingkat tertinggi pada proporsi utama struktur.

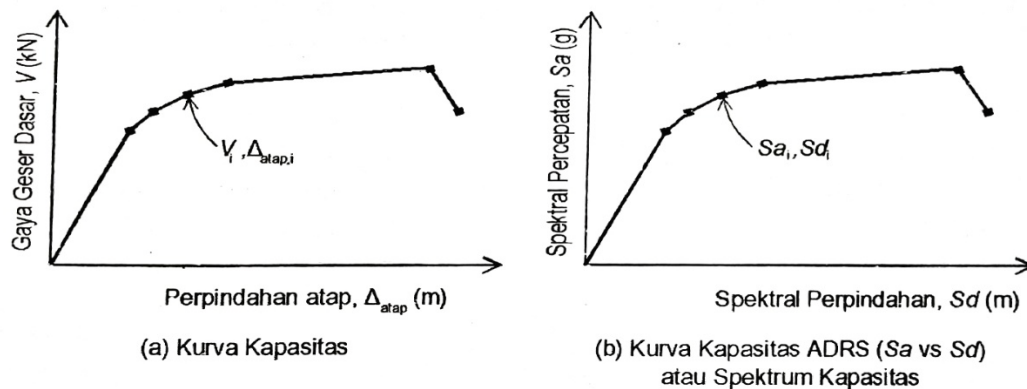
$$S_a = \frac{V}{\alpha_1 W} \quad (3)$$

dengan  $\alpha_1$  = modal koefisien massa pada *mode* pertama,  $V$  = gaya geser dasar,  $W$  = berat bangunan (berat sendiri dan beban hidup),  $S_a$  = spektra percepatan.

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \phi_{roof,1}} \quad (4)$$

dengan  $S_d$  = spektra perpindahan,  $\Delta_{roof}$  = perpindahan atap,  $PF_1$  = faktor partisipasi modal pada *mode* pertama.

Proses pertama untuk merubah kurva kapasitas ke format ADRS adalah dengan menghitung nilai faktor partisipasi massa,  $PF_1$ , dan modal koefisien massa,  $\alpha_1$ , dengan persamaan 1 dan 2 Kemudian setiap titik pada kurva kapasitas,  $V$  dan  $\Delta_{roof}$ , dikonversi ke titik  $S_a$  dan  $S_d$  dengan persamaan 3 dan 4, yang dapat dilihat pada Gambar 3.

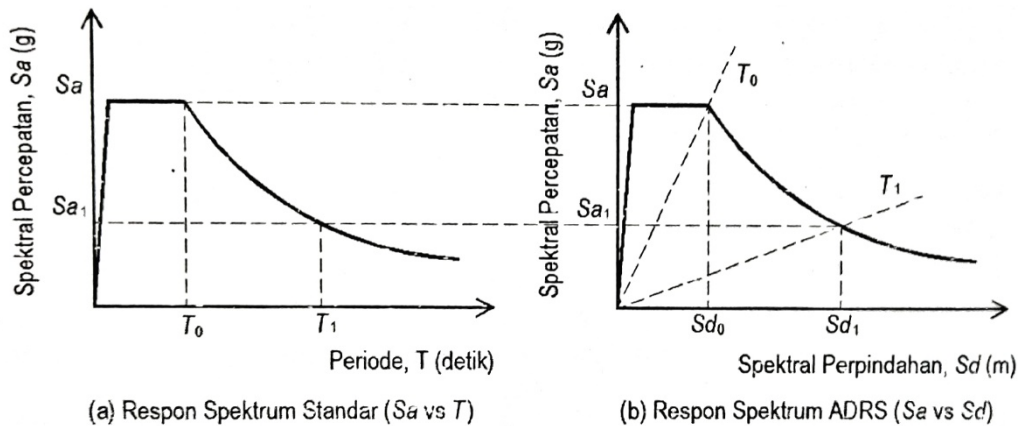


Gambar 3. Kurva Kapasitas dan Spektrum Kapasitas (ATC-40, 1996 : 8-12)

*Demand* spektrum didapatkan dengan merubah respons spektrum yang biasanya dinyatakan dalam spektra percepatan " $S_a$ " dan periode " $T$ " menjadi format ADRS (" $S_a$ ", " $S_d$ ") dengan menggunakan persamaan 5 sehingga diperoleh kurva *demand* spektrum seperti pada Gambar 4.

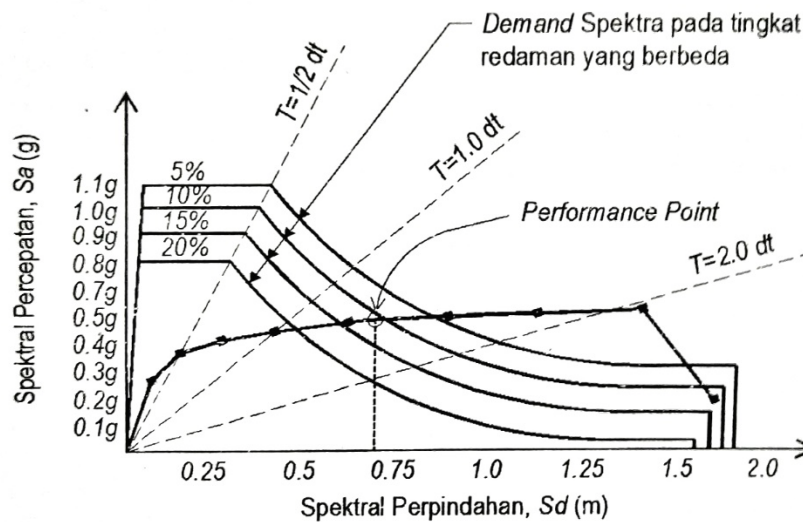
$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \cdot (g) \quad (5)$$

dengan  $S_a$  = spektra percepatan,  $S_d$  = spektra perpindahan ( $g$ ),  $g$  = percepatan gravitasi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $T$  = periode getar fundamental (detik).



Gambar 4. Respon Spektrum Standar dan Respon Spektrum Format ADRS (ATC-40, 1996 : 8-12)

Selanjutnya grafik spektrum kapasitas dan spektrum *demand* diplot dalam satu grafik ADRS. Dalam grafik tersebut akan ada titik perpotongan antara spektrum kapasitas dan spektrum *demand* yang disebut sebagai titik kinerja atau *performance point* Gambar 5.



Gambar 5. Titik Kinerja Struktur pada Tingkat Redaman Struktur (ATC-40, 1996: 6-10)

## Batasan Deformasi

Deformasi lateral pada saat *performance point* harus dicek terhadap deformasi limit yang ditetapkan ATC-40, 1996 Bab 11.3.3, Deformasi limit pada berbagai tingkat kinerja dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Batasan Simpangan pada Tingkat Kinerja Struktur (ATC-40, 1996: 11-4)

Batas Simpangan Antar Tingkat	Tingkat Kinerja Struktur			
	<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Structural Stability</i>
Simpangan Total Maksimum	0,01	0,01 – 0,02	0,02	$0,33 V_i/P_i$
Simpangan Inelastis Maksimum	0,005	0,005 – 0,015	Tidak ada Batasan	Tidak ada Batasan

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### Pendahuluan

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian berdasarkan analisis dengan menggunakan program. Pada bab ini akan membahas proses pengolahan data untuk memperoleh kinerja daya dukung lateral tiang yang diberikan beban lateral secara bertahap dengan bantuan program untuk tiang elastis dan nonelastis.

#### Studi Literatur

Studi literatur menjadi sebuah acuan yang bersumber pada buku – buku dan jurnal sebagai referensi dalam mencapai suatu penelitian dengan hasil yang optimal. Penelitian literatur ini dilakukan dengan cara menganalisis kegagalan tiang pancang tunggal yang terjadi pada salah satu bangunan bertingkat yang ada di Indonesia akibat beban lateral yaitu beban gempa.

#### Pengumpulan Data

Data yang digunakan untuk penelitian ini diperoleh dari data proyek yang sedang berjalan. Kemudian data yang didapatkan dipilih secara teliti. Data yang rusak pada penelitian ini tidak dipakai dan data yang hilang akan diisi dengan data dari pendekatan korelasi.

#### Data Sekunder

Data sekunder merupakan data yang di dapat atau di kumpulkan oleh peneliti dari semua sumber yang sudah ada dalam hal ini data yang diperoleh yaitu jenis tanah, jenis Tiang dan data Laboratorium. Setelah selesai pengumpulan data tersebut maka akan dilakukan analisis kapasitas daya dukung lateral akibat beban lateral yaitu beban gempa yang terjadi pada tiang tunggal.

#### Korelasi Data

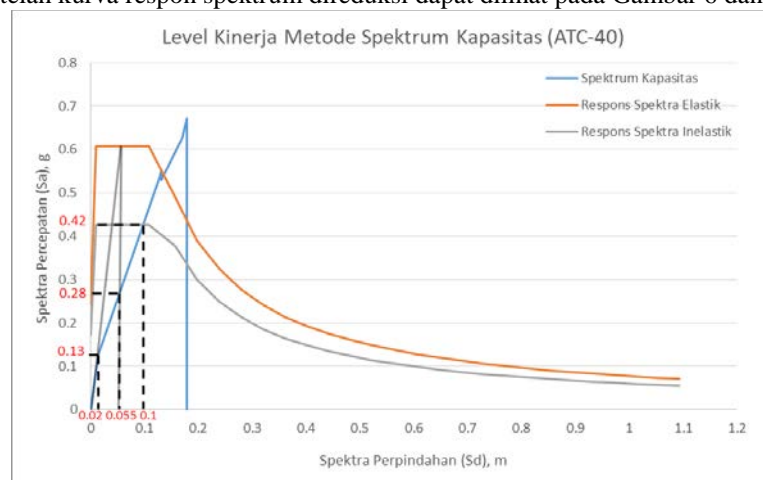
Korelasi data merupakan langkah yang diperlukan untuk mengetahui parameter-parameter tanah yang diperlukan berdasarkan data yang tidak tersedia berdasarkan tabel, grafik dan rumus-rumus empiris.

### 4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Data – data yang telah diperoleh dari hasil perhitungan rumus – rumus dan hasil analisis program akan dimasukkan ke dalam tabel yang telah ditabulasikan.

#### Kinerja Struktur Pada Tiang 300x300

*Performance point* setelah kurva respon spektrum direduksi dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Titik Kinerja Tiang *Free Head*

Berdasarkan grafik titik kinerja tiang *free head* pada Gambar 6 diperoleh:

$$a_y = 0.130 \text{ g}$$

$$a_{pi} = 0.280 \text{ g}$$

$$d_y = 0.020 \text{ m}$$

$$d_{pi} = 0.055 \text{ m}$$

Sehingga redaman *viscous* ekuivalen,  $\beta_{eq}$  dan faktor reduksi respons spektra,  $SR_A$  dan  $SR_V$  sebagai berikut:

$$\beta_{eq} = \frac{63.7(a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi})}{a_{pi} \cdot d_{pi}} + 5$$

$$\beta_{eq} = 11.41136\%$$

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln \beta_{eq}}{2.12}$$

$$SR_A = 0.733$$

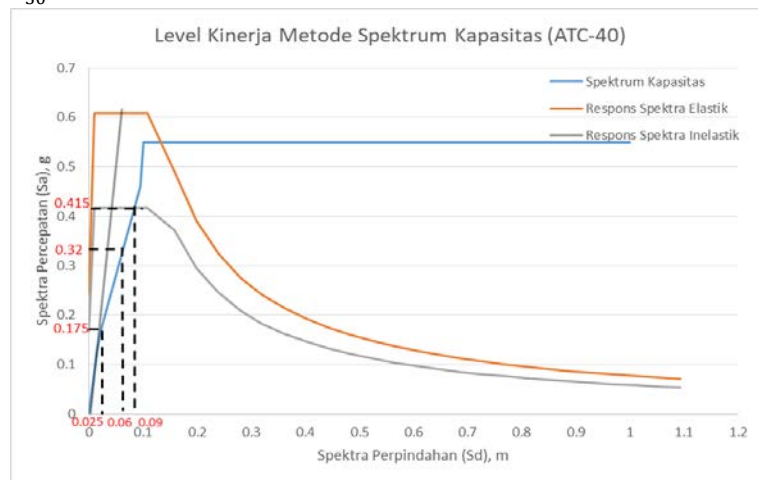
$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln \beta_{eq}}{1.65}$$

$$SR_V = 0.795$$

Diperoleh nilai spektra perpindahan sebesar 0.1 m pada titik kinerja. Maka nilai *roof displacement*:

$$\Delta_{roof} = 0.1 \text{ m}$$

$$Drift \text{ aktual} = \frac{\Delta_{roof}}{h_n} = \frac{0.1}{30} = 0.003333 \text{ m} (<0.01, \text{Immediate Occupancy})$$



Gambar 4.2 Titik Kinerja Tiang *Fixed Head*

Berdasarkan grafik titik kinerja tiang *fixed head* pada Gambar 4.2 diperoleh:

$$a_y = 0.175 \text{ g}$$

$$a_{pi} = 0.320 \text{ g}$$

$$d_y = 0.025 \text{ m}$$

$$d_{pi} = 0.060 \text{ m}$$

Sehingga redaman *viscous* ekuivalen,  $\beta_{eq}$  dan faktor reduksi respons spektra,  $SR_A$  dan  $SR_V$  sebagai berikut:

$$\beta_{eq} = \frac{63.7(a_y \cdot d_{pi} - d_y \cdot a_{pi})}{a_{pi} \cdot d_{pi}} + 5$$

$$\beta_{eq} = 13.29427\%$$

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln \beta_{eq}}{2.12}$$

$$SR_A = 0.684$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln \beta_{eq}}{1.65}$$

$$SR_V = 0.757$$

Diperoleh nilai spektra perpindahan sebesar 0.09 m pada titik kinerja. Maka nilai *roof displacement*:

$$\Delta_{roof} = 0.09 \text{ m}$$

$$Drift \text{ aktual} = \frac{\Delta_{roof}}{h_n} = \frac{0.09}{30} = 0.0030 \text{ m} (<0.01, \text{Immediate Occupancy})$$

### Perhitungan Total Titik Kinerja

Setelah dilakukan perhitungan setiap kondisi struktur fondasi tiang, maka hasil akan ditabulasikan pada tabel di bawah ini :



Tabel 3. Tabulasi titik kinerja fondasi tiang 300x300

Jenis Tiang	Kondisi Tiang	Kepala Tiang	<i>Hingh</i>	dimensi tiang			<i>roof displacement</i> (m)	Drift aktual (m)	Kinerja Struktur ATC-40	Story Drift (%)
				B (mm)	X	H (mm)				
<i>Square Pile</i>	Elastis	Bebas	<i>Full Hingh</i>	300	X	300	0.1	0.0033 333	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Terjepit	<i>Full Hingh</i>	300	X	300	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Bebas	<i>Hingh</i>	300	X	300	0.1	0.0033 333	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Terjepit	<i>Hingh</i>	300	X	300	0.07	0.0023 333	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Bebas	<i>No Hingh</i>	300	X	300	0.105	0.0035	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Terjepit	<i>No Hingh</i>	300	X	300	0.08	0.0026 67	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Bebas	<i>Full Hingh</i>	300	X	300	0.1	0.0033 333	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Terjepit	<i>Full Hingh</i>	300	X	300	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Bebas	<i>Hingh</i>	300	X	300	0.1	0.0033 333	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Terjepit	<i>Hingh</i>	300	X	300	0.07	0.0023 333	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Bebas	<i>No Hingh</i>	300	X	300	0.105	0.0035	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Terjepit	<i>No Hingh</i>	300	X	300	0.08	0.0026 67	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01

Tabel 4. Tabulasi titik kinerja fondasi tiang 400x400

Jenis Tiang	Kondisi Tiang	Kepala Tiang	<i>Hingh</i>	dimensi tiang			<i>roof displacement</i> (m)	Drift aktual (m)	Kinerja Struktur ATC-40	Story Drift (%)
				B (mm)	X	H (mm)				
<i>Square Pile</i>	Elastis	Bebas	<i>Full Hingh</i>	400	X	400	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Terjepit	<i>Full Hingh</i>	400	X	400	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Bebas	<i>Hingh</i>	400	X	400	0.06	0.002	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Terjepit	<i>Hingh</i>	400	X	400	0.06	0.002	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Bebas	<i>No Hingh</i>	400	X	400	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Terjepit	<i>No Hingh</i>	400	X	400	0.08	0.0026	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Bebas	<i>Full Hingh</i>	400	X	400	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Terjepit	<i>Full Hingh</i>	400	X	400	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Bebas	<i>Hingh</i>	400	X	400	0.06	0.002	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Terjepit	<i>Hingh</i>	400	X	400	0.06	0.002	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Bebas	<i>No Hingh</i>	400	X	400	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Terjepit	<i>No Hingh</i>	400	X	400	0.08	0.0026	<i>Immediate Occupancy</i>	< 0.01

Tabel 5. Tabulasi titik kinerja fondasi tiang 500x500

Jenis Tiang	Kondisi Tiang	Kepala Tiang	Hingh	Dimensi Tiang			roof displacement (m)	Drift aktual (m)	Kinerja Struktur ATC-40	Story Drift (%)
				B (mm)	X	H (mm)				
<i>Square Pile</i>	Elastis	Bebas	<i>Full Hingh</i>	500	X	500	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Terjepit	<i>Full Hingh</i>	500	X	500	0.07	0.0023	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Bebas	<i>Hingh</i>	500	X	500	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Terjepit	<i>Hingh</i>	500	X	500	0.08	0.0026	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Bebas	<i>No Hingh</i>	500	X	500	0.1	0.0033	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Elastis	Terjepit	<i>No Hingh</i>	500	X	500	0.08	0.0026	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Bebas	<i>Full Hingh</i>	500	X	500	0.1	0.0033	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Terjepit	<i>Full Hingh</i>	500	X	500	0.06	0.002	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Bebas	<i>Hingh</i>	500	X	500	0.1	0.0033	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Terjepit	<i>Hingh</i>	500	X	500	0.06	0.002	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Bebas	<i>No Hingh</i>	500	X	500	0.09	0.003	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01
<i>Square Pile</i>	Non Elastis	Terjepit	<i>No Hingh</i>	500	X	500	0.08	0.0026	<i>Immediate Occupancy</i>	<0.01

## 5. KESIMPULAN

1. Kinerja struktur yang didesain berdasarkan metode spektrum kapasitas (ATC-40) ini memenuhi syarat kinerja minimum, yaitu memiliki tingkat kinerja *Immediate Occupancy*.
2. *Drift* terbesar berada pada tiang 300x300 sebesar 0.0035 m (*free head*) dan *drift* terkecil berada pada tiang 400x400 dan 500x500 sebesar 0.002 m (*fixed head*).
3. Kondisi kepala tiang *fixed head* memiliki *drift* lebih kecil dari kepala tiang *free head*.

## DAFTAR PUSTAKA

- ATC-40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1*. California: Applied Technology Council.
- Broms, B.B. (1964). Design of Laterally loaded piles. *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Divison*, Vol. 90, No. SM3, pp.79-99.
- FEMA 451. (2006). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures and Accompanying Commentary and Maps*. Washington, D.C: Federal Emergency Management Agency.
- Pusat Litbang Perumahan dan Pemukiman, "Desain Spektra Indonesia," Mei 2019, [http://puskim/pu.go.id/Aplikasi/desain\\_spektra\\_indonesia\\_2011/](http://puskim/pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/).
- Reese, L.C., and Van Impe, W.F. (2001). *Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading*. London, UK: Taylor & Francis Group.
- Tavio dan Usman Wijaya. (2018). *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja*. Yogyakarta: Andi.
- Tomlinson, M.J. (2001). *Foundation Design And Construction Seventh Edition*. England: Pearson Education Limited.
- Wesley, Laurance D., dan Pranyoto, Satyawan. (2012). *Mekanika Tanah untuk Tanah Endapan dan Residu*. Yogyakarta: Andi.