

DISAIN OPTIMUM PONDASI DENGAN KOMBINASI METODA ELEMEN HINGGA DAN TEKNIK OPTIMISASI AKIBAT BEBAN STATIS DAN GEMPA

Oleh :

Merly Misriani

Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Padang Kampus Limau Manis Padang
Email : merlymisriani@yahoo.com

Abstract

In structure design, it is necessary to apply an economist and efficient design. Optimization techniques can be used for such purposes. The objective of this optimization is to optimize the objective function without neglecting boundary problem. Finite Element Method (Finite Element Method) is used in determining the response to various loading conditions. The combination of these two methods has been widely used in designing structures with static loading. By using the optimization module, the problem can be solved to obtain a new variable design of the system. If the design variables are included in the boundaries of design criteria, the optimization process is terminated. Conversely, if the value of the results of the analysis and optimization of the value of the module does not match, then the optimization process should be continued until the boundary conditions obtained meet the design criteria. From the results of optimization that has been done, the design meets the design criteria with variable boundary conditions. So it can be concluded that in designing the foundation due to static and seismic loads more efficiently change the thickness of the foundation plate of the changing width of the foundation.

Key word :

Finite Element Method, optimization, variable, sensitivity, objective function

A. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Dalam merencanakan struktur, diperlukan memilih beberapa alternatif disain yang ekonomis dan efisien. Belakangan ini teknik optimisasi telah banyak digunakan untuk tujuan tersebut. Tujuan dari optimisasi ini adalah untuk mengoptimalkan fungsi objektif tanpa mengesampingkan batasan masalah. Dalam optimisasi struktur, hal ini biasanya terjadi pada volume atau berat material yang menentukan fungsi objektif. Di beberapa masalah teknik, geometri struktur

memerlukan metoda numerik yang kompleks seperti metoda elemen hingga yang biasanya digunakan dalam menentukan respon berbagai kondisi pembebanan. Kombinasi dari kedua metoda ini telah banyak digunakan dalam mendisain struktur dengan pembebanan yang statis.

Beberapa referensi mengenai optimisasi ini telah banyak diperkenalkan. Di antaranya, diskusi mengenai masalah optimisasi struktural dan metode penyelesaiannya oleh Gajewski dan Zyczkowski (1988). Penjelasan menyeluruh mengenai teknik

optimisasi termasuk konsep dasar, kondisi optimal dan solusinya oleh Borkouski dan Jendo (1990). Pengembangan teori optimisasi struktural ini semakin pesat selama akhir abad ini. Namun, hal ini tidak diimbangi dalam aplikasinya di lapangan. Disain struktur terkini memerlukan model optimisasi matematis terbaik untuk penyelesaiannya. Namun, di lapangan disarankan untuk memulai dengan menentukan solusi optimal disamping memfokuskan kepada optimisasi matematis (Chon (1993)).

Baru-baru ini, sebuah teknik dengan nama Evolutionary Structural Optimization (ESO) telah berhasil dikembangkan oleh Xie dan Stiven (1997). Metoda ESO ini didasari dengan menukar beberapa bagian struktur dengan yang lebih efisien. Hasil yang diperoleh adalah struktur yang lebih kuat, ringan serta kaku.

Penelitian tentang pondasi bujur sangkar yang didisain dengan berat minimum yang diberi pembebanan vertikal telah mulai diteliti. Sedangkan penelitian tentang pondasi yang diberi pembebanan statis dan gempa belum pernah dipelajari sejauh ini.

Tujuan penelitian :

- a. Mengembangkan program elemen hingga tiga dimensi untuk modul analisa dalam proses optimisasi
- b. Menentukan analisa sensitifitas disain yang lebih efektif dan efisien dan metode-metode pendekatan syarat batas untuk modul antara

- c. Menyelidiki perilaku pondasi dengan berbagai disain variabel sesuai kriteria yang ditentukan
- d. Merencanakan prosedur optimisasi yang lebih efisien dalam merencanakan pondasi akibat beban statis dan gempa.

Manfaat penelitian :

- 1. Meningkatkan pemahaman tentang hubungan daya dukung pondasi dengan dimensi yang digunakan
- 2. Memperoleh suatu dimensi yang optimal pada pondasi, sehingga menghasilkan pondasi yang ekonomis dan aman
- 3. Memperoleh solusi terbaik dalam prosedur perencanaan pondasi yang lebih efektif dan efisien

Batasan masalah penelitian :

- 1. Perhitungan dilakukan terhadap jenis pondasi dangkal (Pondasi telapak bujur sangkar)
- 2. Perhitungan dilakukan terhadap dimensi pondasi telapak bujur sangkar
- 3. Tanah yang dibebani adalah jenis tanah lempung lunak (*soft clay*)
- 4. Disain optimum pondasi ditujukan untuk pembebanan statis dan gempa dengan menggunakan dua metode yaitu Metode Elemen Hingga dan Teknik Optimisasi
- 5. Metoda Elemen Hingga yang digunakan menggunakan program SAP2000 Linear dan Nonlinear versi 9.0 sedangkan metoda yang dipakai untuk menyelesaikan persamaan optimisasi adalah metoda GRG (*Generalized Reduced Gradient*) yang terdapat pada piranti lunak microsoft excel.

B. LANDASAN TEORI

Ada tiga modul utama yang diperlukan dalam perencanaan struktur secara optimum yaitu modul analisis, modul optimisasi, dan modul antara yang diperlukan untuk menggabungkan dua modul sebelumnya.

Modul Analisis

Penggunaan metoda elemen hingga untuk analisis interaksi tanah telah banyak dilakukan sesuai dengan perkembangan teknologi komputerisasi. Dengan memodelkan pondasi sebagai elemen – elemen batang atau elemen – elemen solid. Sedangkan tanah umumnya dimodelkan sebagai elemen solid.

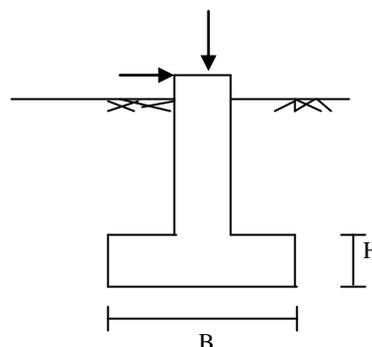
Modul Optimisasi

Pemilihan parameter disain merupakan langkah awal yang menentukan keberhasilan suatu proses untuk mendapatkan solusi yang optimal. Dimana dalam kenyataannya, proses optimisasi adalah sejumlah tahapan pencarian nilai terbaik dari rangkaian parameter disain sedemikian rupa sehingga fungsi objektif mencapai nilai optimal. Disain yang optimal dicapai pada saat semua syarat batas dipenuhi. Parameter disain haruslah sesuai dengan masalah yang akan dianalisa, seperti panjang, lebar, dan ketebalan untuk struktur pondasi, dapat pula kedalaman penanaman pondasi atau pemilihan penggunaan material perkuatan.

Pada penelitian ini, metoda yang dipakai untuk menyelesaikan persamaan optimisasi adalah metoda GRG (*Generalized Reduced Gradient*) yang terdapat pada piranti lunak microsoft excel. Berikut beberapa istilah dalam Metode Optimisasi :

a. Variabel (*Variable*)

Variabel adalah nilai yang tidak terikat dalam perhitungan, nilai inilah yang diubah untuk mendapatkan hasil yang optimum. Berikut gambar pondasi telapak bujur sangkar dengan variabel yang akan ditentukan :



Gambar 1. Pondasi telapak dengan variabel disain

b. Fungsi Objektif (*Objective Function*)

Fungsi ini terikat oleh nilai variabel dan digunakan untuk menentukan apakah hasil yang didapatkan telah mencapai nilai yang optimum

c. Batasan Variabel (*constraint*)

Batasan Variabel adalah untuk memberikan batasan-batasan terhadap nilai dari tiap-tiap variabel. Pada penelitian ini, beban yang dipikul oleh pondasi adalah beban statis dan gempa untuk gedung lebih dari 4 lantai. Nilai batasan (*constraint*) untuk gedung lebih dari 4 lantai yaitu :

$$\text{Lebar (B)} \quad \geq 50 \text{ cm}$$

$$\text{Ketebalan (H)} \quad \geq 20 \text{ cm}$$

d. Kriteria Disain / fungsi batas

Kriteria disain adalah suatu fungsi yang menunjukkan tujuan yang hendak dicapai. Apakah dimensi pondasi yang direncanakan bisa dikatakan aman untuk

digunakan atau tidak aman. Yang menjadi kriteria disain yaitu :

1) Daya dukung pondasi (q)

Pondasi dikatakan aman, jika :

$$q_{all} = \frac{q_{ult}}{SF} \quad (1)$$

dimana :

q_{all} = daya dukung yang diizinkan (kN/m²)

q_{ult} = daya dukung batas dari tanah (kN/m²)

SF = faktor keamanan (bernilai 3)

Batas daya dukung pondasi 25-50 kN/m². Kriteria daya dukung pondasi (q) :

$$\frac{q}{q_{all}} \geq 1 \quad (2)$$

2) Penurunan (δ)

Berdasarkan Skempton dan MacDonal (1955), batas maksimum penurunan yang diizinkan untuk pondasi telapak diatas tanah lempung yaitu 65 mm ($\delta_{izin} < 65$ mm).

Kriteria penurunan (δ) :

$$\frac{\delta}{\delta_{izin}} \leq 1 \quad (3)$$

3) Kemiringan (ϕ)

Berdasarkan Sowers (1962), nilai batas rasio distorsi (kemiringan) yang diizinkan untuk keruntuhan struktural gedung tinggi yaitu 1/150 ($\phi_{izin} = 1/150$)

Kriteria disain untuk kemiringan (ϕ) :

$$\frac{\phi}{\phi_{izin}} \leq 1 \quad (4)$$

e. Solusi yang mungkin (*Feasible Solution*)

Yaitu setiap solusi dari model matematis yang memenuhi kriteria disain tetapi nilai ini dapat memenuhi atau tidak memenuhi nilai fungsi objektif

f. Solusi Optimal (*Optimal Solution*)

Yaitu setiap solusi dari model matematis yang memenuhi kriteria disain dan memenuhi nilai fungsi objektif.

Modul Antara

Untuk menggabungkan antar modul analisis yang menggunakan metode numerik dan modul optimisasi, modul antara yang melibatkan analisis sensitifitas parameter disain dan perumusan syarat batas sangat diperlukan. Apabila syarat-syarat batas dirumuskan secara tidak langsung dari perubahan respon struktur akibat perubahan yang diberikan pada parameter disain, maka analisis sensitifitas disain merupakan langkah yang sangat penting.

C. METODE PENELITIAN

Modul Analisis

Prosedur pelaksanaan modul analisis adalah sebagai berikut :

1. Pengambilan data

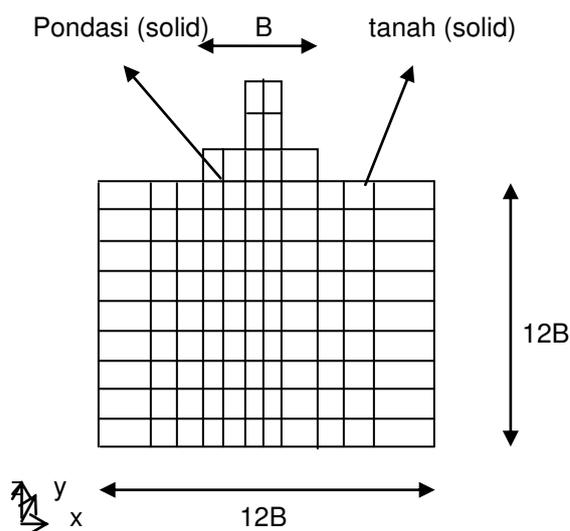
Data-data yang diperlukan:

- Data tanah, yaitu tanah lempung lunak yang sesuai dengan parameter :
 - o Berat Volume (γ) = 0.00115 kg/cm³
 - o Kohesi (c) = 0.3 kg/cm²
 - o Sudut geser (θ) = 10^o
 - o Poisson's ratio (μ_s) = 0,4
 - o Modulus Elastisitas (E_s) = 90 Kg/cm²
 - o *Unconfined Compressive Strength Test* (q_u) = 0.5 kg/cm²
- Data untuk pondasi telapak beton bertulang dengan parameter :
 - o Berat Volume (γ_c) = 0.0025 kg/cm³
 - o Modulus elastisitas (E_s) = 4700 $\sqrt{f'c}$ = 74313,5 kg/cm²

- o Poisson's ratio (μ_s) = 0,15
- o Mutu beton ($f'c$) = 300 kg/cm²
- o *Bending Reinforce Yield Stress* (f_y) = 4000 kg/cm²
- o *Shear Reinforce Yield Stress* (f_{ys}) = 0,6 f_y = 2400 kg/cm²
- Data pembebanan, yang diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya dalam perencanaan struktur gedung 4 lantai (Hervin Haikal, 2006), antara lain :
 - o Beban Vertikal (P) : 190.679,290 kg
 - o Beban Horizontal (H) : 47669,8225 kg

2. Pengolahan Data

Penelitian ini menggunakan program komputer SAP2000 Versi 9.0 tiga dimensi. Pemodelan dengan panjang dan lebar yang sama, dapat dilihat dalam model dua dimensi berikut :



Gambar 2. Pemodelan Struktur Pondasi Telapak

3. Output (hasil yang diharapkan)

Dari analisa menggunakan program SAP2000 versi 9.0 didapatkan gambar respon

pondasi berupa tegangan tanah dan penurunan yang terjadi dibawah pondasi.

Modul Optimisasi dan modul antara

Setelah didapat *output* dari modul analisis, dilanjutkan dengan modul optimisasi. Prosedur optimisasi dijelaskan pada paragraf dibawah ini :

Langkah 1

Pertama, menetapkan nilai awal dari parameter disain, fungsi objektif dan batasan. Nilai-nilai awal dari parameter disain dengan menggunakan *Finite Elemen Method* (FEM) antara lain :

Tabel 1. Nilai awal dari parameter disain

Pondasi	B (m)	H (m)
1	2	0.5
2	1.8	0.5
3	2	0.45

Langkah 2

Dengan menggunakan modul analisis yang dipilih, nilai-nilai awal dari respon dan syarat batas diperoleh.

Langkah 3

Selanjutnya, nilai sensitifitas disain parameter dan persamaan pendekatan syarat batas ditentukan. Dengan menggunakan modul optimisasi yang dipilih dan menggunakan harga-harga awal yang telah diperoleh, nilai parameter disain baru yang memenuhi kriteria disain dan nilai pendekatan syarat batas yang baru didapat.

Langkah 4

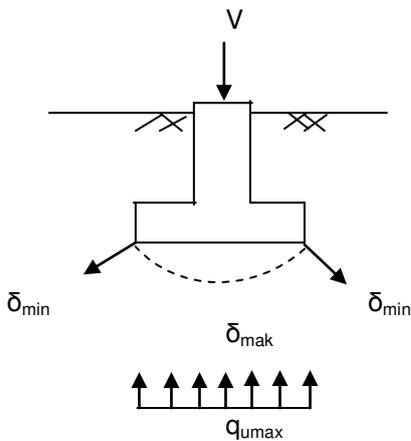
Langkah berikutnya adalah menganalisa permasalahan dengan menggunakan parameter disain baru untuk mendapatkan respon sistem dan nilai syarat batas. Apabila nilai syarat batas pada tahap ini sesuai dengan nilai pendekatan yang diperoleh dari modul optimisasi, maka proses optimisasi dapat dihentikan dan disain optimal

dari struktur telah didapat. Sebaliknya bila nilai hasil analisis dan nilai dari modul optimisasi tidak sesuai, maka proses optimisasi harus dilanjutkan hingga syarat batas yang diperoleh memenuhi kriteria disain.

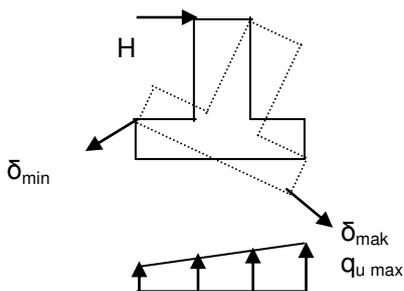
D. HASIL DAN PEMBAHASAN

Modul analisis

Dari hasil modul analisis menggunakan program SAP2000 versi 9.0 didapatkan gambar penurunan yang terjadi dibawah pondasi dan tegangan tanah dibawah dasar pelat pondasi yang disajikan dalam gambar dan tabel berikut ini.

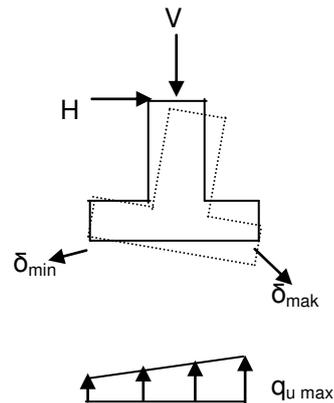


Gambar 3. Titik tinjauan penurunan maksimum, penurunan minimum, dan tegangan maksimum yang terjadi dibawah pondasi akibat Beban Statis



Gambar 4. Titik tinjauan penurunan maksimum, penurunan minimum, dan

tegangan maksimum yang terjadi dibawah pondasi akibat Beban Gempa



Gambar 5. Titik tinjauan penurunan maksimum, penurunan minimum, dan tegangan maksimum yang terjadi dibawah pondasi akibat Beban Statis & Gempa

Tabel 2. Penurunan maksimum (δ_{max}) dan penurunan minimum (δ_{min}) dari FEM

Beban	B (meter)	H (meter)	δ_{max} (cm)	δ_{min} (cm)
Vertikal (Statis)	2	0.5	5.3334	5.2194
	1.8	0.5	6.0872	5.7893
	2	0.45	5.5322	5.4215
Horizontal (Gempa)	2	0.5	2.1604	-2.1106
	1.8	0.5	2.2366	-2.1832
	2	0.45	2.1834	-2.1411
Vertikal & Horizontal	2	0.5	7.4011	3.0283
	1.8	0.5	8.0162	3.5092
	2	0.45	7.8685	3.0417

Tabel 3. Tegangan maksimum ($q_{u,max}$) dibawah pondasi dari FEM

Beban	B (meter)	H (meter)	$q_{u,max}$ (kg/cm ²)
Vertikal (Statis)	2	0.5	4.7669
	1.8	0.5	6.5412
	2	0.45	5.9874
Horizontal (Gempa)	2	0.5	4.7669
	1.8	0.5	5.2966
	2	0.45	4.7679
Vertikal & Horizontal	2	0.5	4.8027
	1.8	0.5	5.9342
	2	0.45	4.9873

Analisis Optimisasi Akibat Beban Statis

Langkah awal proses optimisasi akibat beban statis yaitu dengan memilih nilai awal dari parameter disain.

Tabel 4. Nilai Awal Dari Parameter Disain

B (m)	H (m)	Volume (B ² H)	Perubahan B (%)	Perubahan H (%)
2	0.5	2	0	0
1.8	0.5	1.62	-10	0
2	0.45	1.8	0	-10

Lanjut dengan menggunakan modul analisis, nilai awal dari respon dan syarat batas diperoleh :

Tabel 5. Constraint nilai awal dari FEM Akibat Beban Statis

B (m)	H (m)	Penurunan maksimum (δ_{maks} = cm)	Penurunan minimum (δ_{min} = cm)	Tegangan maks ($q_{u maks}$ = kg/cm ²)	Kemiringan
2	0.5	5.3334	5.2194	4.7669	0.00057
1.8	0.5	6.0872	5.7893	6.5412	0.00165
2	0.45	5.5322	5.4215	5.9874	0.00055

Dari hasil analisis menggunakan *Finite Elemen Method* (FEM) dapat dianalisa bahwa jika lebar dan ketebalan pondasi diperkecil dari dimensi awal, maka penurunan yang terjadi akibat beban statis akan bertambah besar, tekanan dibawah pondasi bertambah besar begitu juga dengan kemiringan. Jika ketebalan yang diperkecil, penurunan, kemiringan dan tegangan yang terjadi tidak terlalu besar dibandingkan dengan pondasi yang mengalami perubahan lebar. Dapat disimpulkan bahwa lebih efisien ketebalan diperkecil dari pada lebar pondasinya.

Tabel 6. Nilai Sensitifitas Parameter Disain Akibat Beban Statis

Sensitifitas	Nilai sensitifitas		
	Variabel Awal	Akibat Perubahan B	Akibat Perubahan H
Penurunan (cm)	5.3334	-7.538	-1.988
Kemiringan	0.00057	-0.005425	0.0000825
Tegangan (kg/cm ²)	4.7669	-17.743	-12.205

Berdasarkan tabel diatas dapat dianalisa bahwa :

1. Nilai sensitifitas penurunan pondasi akibat perubahan lebar pondasi lebih besar terjadi dari pada nilai sensitifitas penurunan akibat adanya perubahan ketebalan pelat pondasi
2. Nilai sensitifitas kemiringan pondasi akibat perubahan lebar pondasi lebih besar terjadi dari pada nilai sensitifitas kemiringan akibat adanya perubahan ketebalan pelat pondasi
3. Nilai sensitifitas tegangan dibawah dasar pondasi akibat perubahan lebar pondasi lebih besar terjadi dari pada akibat adanya perubahan ketebalan pelat pondasi.

Dengan menggunakan *Solver* pada software Microsoft Excel, didapat variabel yang optimum, berikut tertera dalam tabel dibawah ini :

Tabel 7. Variabel optimum Akibat Beban Statis

	Optimum	Awal	Perubahan dari awal
Lebar (m)	2.10678	2	0.10678
Ketebalan (m)	0.61244	0.5	0.11244
Volume (m ³)	2.71832	2	0.71832

Dari tabel diatas, didapat dimensi yang optimum dengan penambahan lebar 0.10678m

dan penambahan tebal 0.11244 m. Sehingga lebar optimum 2.10678 m dan tebal optimum 0.61244 m.

Parameter disain baru telah didapat, langkah selanjutnya adalah menganalisa permasalahan dengan menggunakan parameter disain baru tersebut untuk mendapatkan respon sistem dan nilai syarat batas. Berikut hasilnya ditampilkan dalam tabel dibawah ini:

Tabel 8. Constraint variabel optimum Akibat Beban Statis

	Nilai syarat batas	Upper limit	Lower limit
Penurunan (cm)	4.30497	6.5	0
Kemiringan	0	0.0067	0
Tegangan (kg/cm ²)	1.5	1.5	0

Berdasarkan tabel diatas, nilai syarat batas telah didapat sesuai dengan nilai pendekatan. Maka proses optimisasi dihentikan dan disain optimal pondasi akibat beban statis didapat dengan lebar bertambah 5% dari lebar awal menjadi 2.1 meter dan tebal bertambah 20% dari tebal awal menjadi 0.6 meter dengan volume pondasi menjadi 2.7 m³.

Analisis Optimisasi Akibat Beban Gempa

Langkah awal proses optimisasi akibat beban gempa sama halnya dengan optimisasi beban statis.

Tabel 9. Constraint nilai awal dari FEM Akibat Beban Gempa

B (m)	H (m)	Penurunan maksimum (δmaks = cm)	Penurunan minimum (δmin = cm)	Tegangan maks (qu = kg/cm ²)	Kemiringan
2	0.5	2.1604	-2.1106	4.7669	0.02135
1.8	0.5	2.2366	-2.1832	5.2966	0.02455
2	0.45	2.1834	-2.1411	4.7679	0.02162

Dapat disimpulkan bahwa lebih efisien ketebalan diperkecil dari pada lebar pondasinya. Langkah selanjutnya yaitu menentukan nilai sensitifitas parameter disain dan persamaan pendekatan syarat batas.

Tabel 10. Nilai Sensitifitas Parameter Disain Akibat Beban Gempa

Sensitifitas	Nilai sensitifitas		
	Variabel awal	Akibat Perubahan B	Akibat Perubahan H
Penurunan (cm)	2.1604	-0.762	-0.23
Kemiringan	0.02135	-0.01599	-0.00134
Tegangan (kg/cm ²)	4.7669	-5.297	2.456

Berdasarkan tabel diatas dapat dianalisa bahwa :

1. Nilai sensitifitas penurunan pondasi akibat perubahan lebar pondasi lebih besar terjadi dari pada nilai sensitifitas penurunan pondasi akibat adanya perubahan tebal pelat pondasi
2. Nilai sensitifitas kemiringan pondasi akibat perubahan lebar pondasi lebih besar terjadi dari pada nilai sensitifitas kemiringan pondasi akibat adanya perubahan tebal pelat pondasi
3. Nilai sensitifitas tegangan dibawah pondasi akibat perubahan lebar pondasi

lebih besar terjadi dari pada nilai sensitifitas tegangan dibawah pondasi akibat adanya perubahan tebal pelat pondasi.

Tabel 10. Variabel Optimum Akibat Beban Gempa

	Optimum	Awal	Perubahan dari awal
Lebar (m)	2.89938	2	0.89938
Ketebalan (m)	0.72485	0.5	0.22485
Volume (m ³)	6.09335	2	4.09335

Berdasarkan tabel diatas, lebar dan tebal pelat pondasi bertambah besar dari dimensi awal akibat adanya pengaruh beban horizontal. Besarnya pertambahan lebar 0.899 m terhadap lebar awal sehingga lebar optimum pondasi akibat pengaruh beban horizontal menjadi 2.899 m dan pertambahan tebal pelat pondasi 0.225 m terhadap tebal awal sehingga tebal optimum pondasi akibat adanya pengaruh beban horizontal menjadi 0.725 m sehingga volume pondasi bertambah 4.09 m³ menjadi 6.093 m³.

Parameter disain baru telah didapat, langkah selanjutnya adalah menganalisa permasalahan dengan menggunakan parameter disain baru tersebut untuk mendapatkan respon sistem dan nilai syarat batas.

Tabel 11. Constraint variabel optimum Akibat Beban Gempa

	Nilai syarat batas	Upper limit	Lower limit
Penurunan (cm)	1.42335	6.5	0
Kemiringan	0.00667	0.00667	0
Tegangan (kg/cm ²)	0.55509	1.5	0

Berdasarkan tabel 11, nilai syarat batas telah didapat sesuai dengan nilai pendekatan. Maka proses optimisasi dihentikan dan disain optimal pondasi akibat beban gempa telah diperoleh.

Analisis Optimisasi Akibat Beban Statis dan Gempa

Langkah awal proses optimisasi akibat beban statis dan gempa sama halnya dengan optimisasi beban statis.

Tabel 12. Constraint nilai awal dari FEM Akibat Beban Statis dan Gempa

B (m)	H (m)	Penurunan maksimum ($\delta_{maks} = \text{cm}$)	Penurunan minimum ($\delta_{min} = \text{cm}$)	Tegangan maks ($q_u = \text{kg/cm}^2$)	Kemiringan
2	0.5	7.4011	3.0283	4.8027	0.02186
1.8	0.5	8.0162	3.5092	5.9342	0.02504
2	0.45	7.8685	3.0417	4.9873	0.02413

Dari hasil analisis menggunakan *Finite Elemen Method* (FEM) dapat dianalisa bahwa lebih efisien ketebalan diperkecil dari pada lebar pondasinya.

Berikut ditampilkan hasil dari optimisasi dalam menentukan nilai sensitifitas parameter disain pada tabel dibawah ini :

Tabel 13. Nilai Sensitifitas Parameter Disain Akibat Beban Statis Dan Gempa

Sensitifitas	Nilai sensitifitas		
	Variabel awal	Akibat Perubahan B	Akibat Perubahan H
Penurunan (cm)	7.4011	-6.151	-4.674
Kemiringan	0.02186	-0.01587	-0.01135
Tegangan (kg/cm ²)	4.8027	-11.315	0.042

Berdasarkan tabel diatas dapat dianalisa bahwa :

1. Nilai sensitifitas penurunan pondasi akibat perubahan lebar pondasi lebih besar terjadi dari pada akibat adanya perubahan ketebalan pelat pondasi
2. Nilai sensitifitas kemiringan pondasi akibat perubahan lebar pondasi lebih besar terjadi dari pada akibat adanya perubahan ketebalan pelat pondasi
3. Nilai sensitifitas tegangan dibawah dasar pondasi akibat perubahan lebar pondasi lebih besar terjadi dari pada akibat adanya perubahan ketebalan pelat pondasi.

Dengan menggunakan *Solver* pada software Microsoft Excel, didapat variabel yang optimum, berikut tertera dalam tabel dibawah ini :

Tabel 14. Variabel optimum Akibat Beban Statis dan Gempa

	Optimum	Awal	Perubahan dari awal
Lebar (m)	2.42445	2	0.42445
Ketebalan (m)	1.24532	0.5	0.74532
Volume (m ³)	7.31995	2	-5.31995

Berdasarkan tabel diatas, didapat variabel disain yang optimum dimana lebar dan ketebalan pelat pondasi bertambah dari dimensi awalnya akibat beban statis dan gempa yaitu bertambah 0.424 dari lebar awal menjadi 2.424 m dan bertambah 0.745 dari tebal awal menjadi 1.245 m dan volume optimum menjadi 7.319 m³.

Tabel 15. Constraint variabel optimum Akibat Beban Statis dan Gempa

	Nilai syarat batas	Upper limit	Lower limit
Penurunan (cm)	1.30667	6.5	0
Kemiringan	0.00667	0.00667	0
Tegangan (kg/cm ²)	0.03130	1.5	0

Berdasarkan tabel diatas, nilai syarat batas telah didapat sesuai dengan nilai pendekatan. Maka proses optimisasi dihentikan dan disain optimal pondasi akibat beban statis dan gempa telah diperoleh.

E. SIMPULAN DAN SARAN

Dalam proses disain optimum, masalah optimisasi diawali dengan memilih nilai awal dari parameter disain , fungsi objektif (volume pondasi) dan syarat batas dari kriteria disain. Respon awal dari sistem diperoleh dengan menggunakan Metoda Elemen Hingga (*Finite Elemen Method*) yang diikuti dengan disain analisa sensitivity dan perkiraan batasan. Kemudian, dengan menggunakan modul optimisasi, permasalahan dapat diselesaikan untuk memperoleh disain variabel baru dari sistem tersebut. Apabila disain variabel tersebut masuk dalam batasan dari kriteria disain, maka proses optimisasi dapat dihentikan dan disain optimal dari struktur telah didapat. Sebaliknya, bila nilai hasil analisis dan modul optimisasi tidak sesuai, maka proses optimisasi dilanjutkan hingga syarat batas yang diperoleh memenuhi kriteria disain. Dari hasil optimisasi yang telah dilakukan, disain variabel memenuhi kriteria disain dengan syarat batasnya sehingga dapat disimpulkan bahwa :

1. Nilai dari variabel disain awal pondasi bukan merupakan nilai optimum dari variabel disain.
2. Nilai optimum variabel disain didapat sesuai dengan pembebanan yang diberikan.
3. Nilai optimum variabel disain akibat beban statis lebih besar dari nilai variabel awal. Dimana lebar awal 2 m dan tebal pelat pondasi 0.5 m. Sehingga didapat nilai optimum lebar 2.107 m dan tebal 0.612 m.
4. Nilai optimum variabel disain akibat beban gempa lebih besar dari nilai variabel awal. Dimana lebar awal 2 m dan tebal pelat pondasi 0.5 m. Sehingga didapat nilai optimum lebar 2.899 m dan tebal 0.725 m.
5. Nilai optimum variabel disain akibat beban statis dan gempa lebih besar dari nilai variabel awal. Dimana lebar awal 2 m dan tebal pelat pondasi 0.5 m. Sehingga didapat nilai optimum lebar 2.424 m dan tebal 1.245 m.
6. Penurunan pondasi, kemiringan pondasi dan daya dukung pondasi adalah batasan kritis yang menjadi pertimbangan pada disain struktur pondasi akibat beban statis dan gempa.

Saran

Dari analisa yang didapat, penulis dapat menyarankan bahwa :

1. Disain awal berdasarkan pada dimensi optimum untuk beban terpusat disarankan agar diperkecil jumlah iterasi dalam proses optimisasi.
2. Metoda yang digunakan dalam penelitian ini dapat berguna dalam perencanaan dimensi struktur bangunan sipil seperti gedung, jembatan, perkerasan jalan raya, drainase dan struktur geoteknik seperti

pondasi rakit, tiang pancang, dinding penahan tanah dan sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

Afriandy., (2006), Skripsi : *"Disain Optimum Pondasi"*, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang.

Bowles, Joseph E., (1992), *Analisis dan Desain Pondasi*, Jilid 1, Erlangga, Jakarta.

Christady, H., (2003), *"Teknik Pondasi 1 & 2"*, Edisi kedua., Beta offset, Yogyakarta.

Das, Braja M., (1999), *Principle of Foundation Engineering*, PWS Publishing, California.

Hakam, Abdul., (2001) *"Optimal Design of Geotechnical Structure Due to Dynamic Loading"*, The University of New South Wales Sydney, Australia.

Husni, Zahratul., (2005), Skripsi *"Analisis Perilaku Pondasi Tiang dengan Kombinasi Pelat menggunakan Simulasi Numerik"*, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang.

Iskandar, Dedi., (2007), Skripsi *"Analisis Penurunan dan Perkuatan Struktur dengan menggunakan Simulasi Numerik Interaksi Tanah Struktur"*, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang.

Mochtar, Endah dan Mochtar, Indrasurya., (1995), *"Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip rekayasa geoteknik)"*, Braja M. Das Jilid 1 dan Jilid 2, Erlangga, Surabaya.

Pradoto, Suhardjito., (1987), *"Teknik Pondasi"*, Laboratorium Geoteknik Pusat Antar Universitas-Ilmu Rekayasa, Institut Teknologi Bandung.

Syafrizal., (2004), Skripsi *"Studi Perilaku Beban –Penurunan Floating Raft-Pile Foundation pada Lempung Lunak dengan Skala Model di Laboratorium"*, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang.

Wesley, L.D.,(1977), *"Mekanika Tanah"*, Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta Selatan.