

HARMONIC RESPONSE EVALUATION OF FRAME-TYPED MACHINERY FOUNDATION USING FIXED-END SUPPORTS AND SOIL-STRUCTURE INTERACTION

by Muhammad Immaduddin^a, Hidayat Soegihardjo M.^b, and Ananta Sigit S.^c

ABSTRACT

It has been generally recognized that the interaction between soil and structure can indeed affect the response of structure, especially for those structures founded on relatively flexible soil. Flexibility foundation caused by soil movement below, often becomes important factor in structural design and it will give more useful and realistic model. Therefore, the inclusion of soil-structure interaction (SSI) effect is particularly important in the analysis of structures subject to dynamic loads. A structures of Framed type machinery foundation structure built on soft clay was used as a model. It's response was compared to fixed-base model in order to find-out the fixed-base condition model, in which it gave a result that was closed to SSI result responses that considering soil-structure interaction effect could be analyzed using fixed-base model. The condition was reached on model with length-height ratio of frame has non linear relation to beam-column stiffness ratio but it was almost liniear with gradient -1.13 on semi logarithmic scale.

KEYWORDS: framed type machine foundation; harmonic response; machinery foundation; soil-structure interaction; stiffness.

PENDAHULUAN

Secara umum sudah diketahui bahwa interaksi antara tanah dan struktur akan berpengaruh pada respon struktur, terutama untuk yang struktur yang terletak di atas tanah fleksibel (seperti pada Gambar 1). Kebanyakan perencana struktur cenderung untuk memodelkan struktur atas dengan menganggap kaku pada pondasi, sementara perencana pondasi memperlakukan pondasi seolah-olah kekakuan struktural tidak ada. Padahal pergerakan pondasi sering kali menjadi faktor penting dalam perencanaan struktur dan akan memberikan model yang lebih realistis dan bermanfaat (McLeod).¹ Perletakan yang dimodelkan dengan menyertakan tanah sebagai sistem struktur adalah mengingat bahwa respon struktur sangat tergantung pada penurunan yang terjadi pada tanah (Seperti pada Gambar 2). Dengan kata lain bahwa struktur pondasi pada kenyataannya tidak pernah benar-benar terjepit sebagaimana anggapan yang umum digunakan pada saat perencanaan.

Untuk struktur yang terletak di atas tanah yang bisa berdeformasi, pergerakan pondasi biasanya tidak sama dengan pergerakan tanah dan suatu komponen getaran yang memutar sumbu memanjang struktur kemungkinan bisa terjadi sebagai akibat dari suatu komponen lateral atau komponen translasi. Komponen getaran tersebut tersebut bersama-sama dengan efek interaksi tanah-struktur berakibat sangat besar pada struktur yang mempunyai kekakuan lateral besar, terutama yang terletak di atas tanah lunak. Respon

struktur yang terletak di atas sistem pondasi pada tanah yang bisa berdeformasi ini disebut respon perletakan fleksibel.

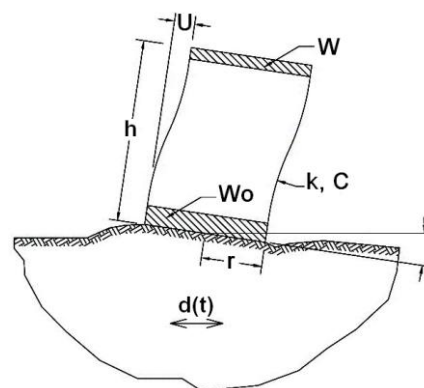
Dalam hal energi getaran, struktur dengan perletakan fleksibel berbeda dengan struktur yang perletakannya jepit. Energi getaran struktur akan disebarkan ke dalam medium pendukungnya melalui radiasi gelombang-gelombang dan perilaku histerisis dalam tanah. Efek balik dari penyebaran energi ini tidak diperhitungkan dalam struktur dengan sistem perletakan jepit. Perbedaan efek yang terjadi pada perletakan fleksibel dan jepit sangat tergantung dari karakteristik struktur dan medium tanah yang mendukungnya. Oleh karena itu, pemasukan efek interaksi tanah-struktur (SSI) menjadi penting sekali dalam analisis struktur terutama untuk struktur yang menerima beban dinamis (dapat dilihat pada Gambar 3).

Untuk mempertimbangkan efek SSI dalam respon struktur, analisis pada struktur diperluas dari model yang struktural menjadi sistem yang menyeluruh meliputi struktur-pondasi-tanah. Pada umumnya, studi mengenai efek SSI pada respon struktur meliputi dua kondisi (Luco)²: yang pertama berkaitan dengan evaluasi efek SSI pada respon struktur yang direncanakan dengan analisis konvensional tanpa memasukkan efek interaksi; kondisi kedua mempertimbangkan kerja sama efek SSI ke dalam

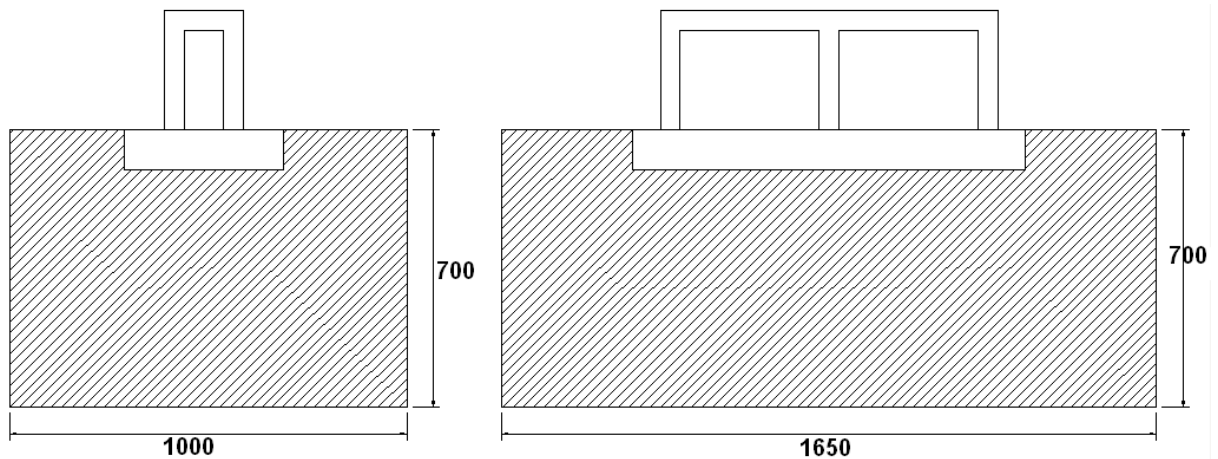
^aMaster Degree, Dept. of Civil Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), ITS Campus, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia.

^{b,c}Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), ITS Campus, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia.

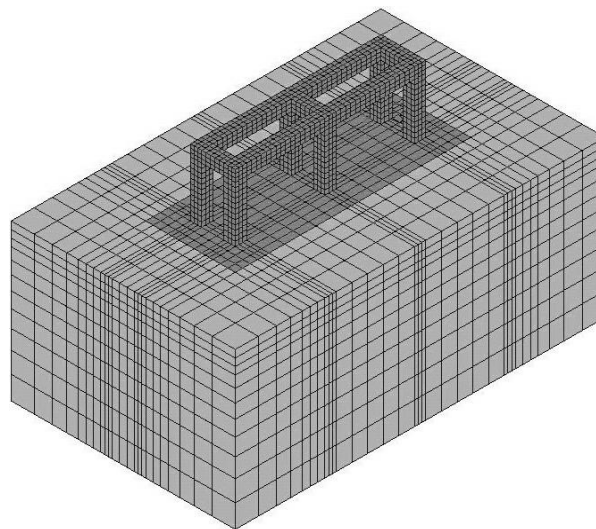
Note. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 13, 2009; approved on September 02, 2009. Discussion open until January 2011. This paper is part of the ITS Journal of Civil Engineering, Vol. 29, No. 2, November 2009. © ITS Journal of Civil Engineering, ISSN 2086-1206/2009.



Gambar 1. Sistem Struktur dengan Perletakan Fleksibel.



Gambar 2. Volume Tanah Pada Model SSI.



Gambar 3. Pemodelan Pondasi dengan Sistem SSI.

perencanaan dan algoritma. Dalam penelitian ini, telah dilakukan pendekatan dengan kedua cara tersebut di atas dan hasilnya dibandingkan.

DASAR TEORI

Satu kecenderungan untuk menganggap bahwa memodelkan tanah adalah lebih sulit dari pada struktur. Bagaimanapun juga, dalam kondisi penurunan, membuat model nonlinier time-dependent adalah tidak menguntungkan kecuali jika struktur juga dimodelkan dengan cara yang sama. Perbedaan penurunan sudah dapat diprediksi dengan akurat tetapi beberapa di antaranya diperoleh dengan melakukan ekstrapolasi dari observasi dibandingkan dengan memprediksi dengan model. Dengan analisis secara numerik dan didukung oleh perangkat keras dan perangkat lunak yang memadai, dilakukan simulasi suatu model struktur secara virtual.

Dalam Gambar 4 nampak model pondasi mesin tipe portal yang terletak di atas tanah untuk sistem perletakan jepit penuh dan SSI. Dalam kondisi perletakan yang terjepit, struktur bagian bawah dan tanah tidak

diikutsertakan dan bagian dasar kolom dianggap terjepit penuh di atas tanah. Untuk menunjukkan model yang lebih teliti dari struktur pondasi mesin tersebut, pemodelan dilakukan dengan memasukkan efek SSI ke sistem struktur, di mana sistem ditampilkan secara menyeluruh meliputi struktur, pondasi dan tanah.

Respon struktur dengan kedua pemodelan tersebut dievaluasi terhadap beban dinamis mesin yang dipikulnya. Amplitudo yang terjadi pada frekuensi kerja mesin, baik arah sumbu X (horizontal) maupun arah sumbu Y (vertikal), pada pembebanan dinamis vertikal dan horizontal, pada masing-masing kondisi dibandingkan dan diberikan hubungannya dalam bentuk grafik. Hasil yang diperoleh dapat digunakan sebagai alternatif pertimbangan pada saat melakukan perencanaan pondasi mesin tipe portal.

Menurut McLeod,¹ beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam suatu model yang mengombinasikan struktur dan tanah adalah:

Secara normal, penurunan terjadi dalam jangka panjang dan karenanya perlu dimodelkan perilaku tanah nonlinier yang bergantung pada waktu. Perangkat lunak

dengan kemampuan seperti ini sangat mahal dalam penggunaannya.

Model-model untuk kekakuan struktur juga membutuhkan perhitungan perilaku jangka panjang. Pada struktur baja, pengaruh jangka panjang tidak terlalu penting. Tetapi pada beton, efek dari susut, retak dan rangkai bisa menjadi sangat berarti dibandingkan deformasi elastisnya. Untuk pasangan batu, efek faktor waktu sangatlah kecil tetapi untuk kinerja jangka panjang tidak dapat diabaikan.

Pengaruh elemen-elemen nonstruktural pada gedung seperti: partisi dan cladding, memberikan efek yang penting pada kekakuan aktualnya.

Kerusakan akibat penurunan biasanya disebabkan oleh penurunan yang tidak seragam. Faktor utama penyebab perbedaan penurunan adalah variasi kekakuan tanah di bawah struktur. Jika demikian, maka variasi ini hendaknya menjadi parameter utama dari model tanah. Biasanya hal ini tidak umum untuk dimasukkan dalam model interaksi struktur – tanah (SSI).

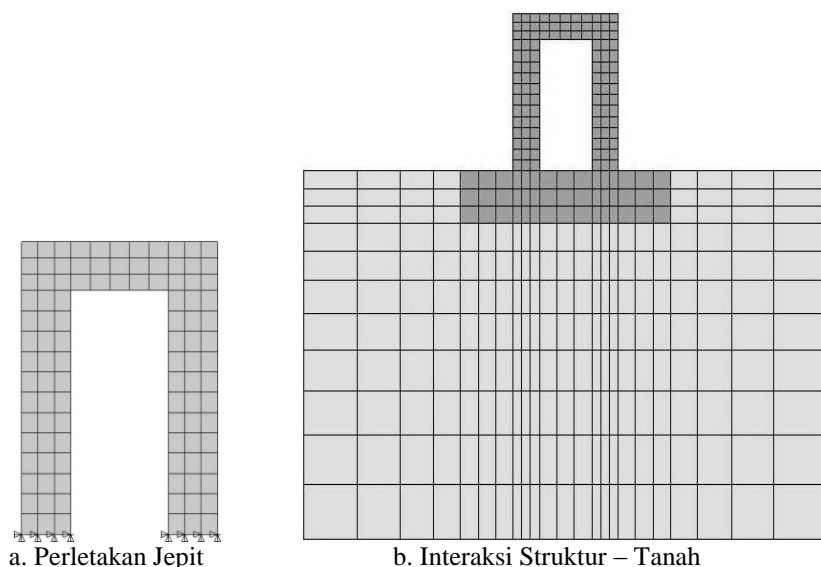
Lukman³, membahas masalah pondasi mesin tipe portal ini untuk sistem SSI dengan memodelkan tanah sebagai pegas-pegas dan memberikan taper pada kolom

($\alpha = 0,1 - 1,3$). Hasil yang didapatkan adalah perubahan respon horisontal frekuensi struktur sebesar 5% – 77% untuk perletakan jepit. Sedangkan untuk model SSI didapatkan: 2,97% – 22,24% (lempung), 2,67% – 50% (lempung keras) dan 3,07% – 45,32% (tanah pasir).

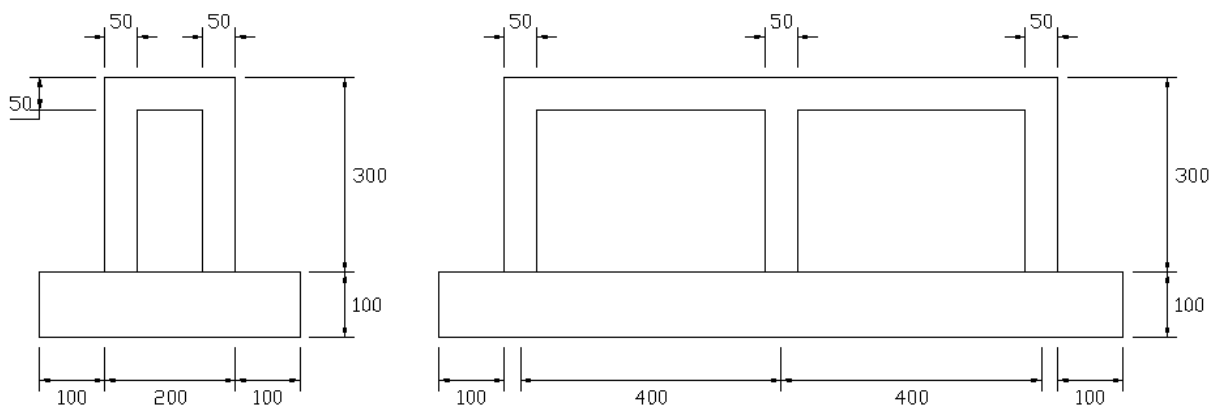
Tinjauan utama dalam tulisan ini adalah mengetahui respon struktur pada frekuensi kerja yang terjadi berdasarkan analisis dinamis yang dilakukan secara numerik pada struktur pondasi mesin tipe portal sehubungan dengan variasi kekakuan pada elemen balok dan kolom dengan mempertimbangkan interaksi yang terjadi antara struktur pondasi mesin tipe portal, beban dinamis mesin dan tanah di sekitar pondasi. Pemodelan numerik untuk pondasi, beban dinamis, dan tanah digabungkan sebagai satu sistem struktur.

METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam mencari respon struktur adalah dengan melakukan simulasi terhadap model struktur dengan bantuan perangkat lunak analisis struktur yang sesuai. Model 3D struktur merupakan representasi matematis dari bangun struktur yang



Gambar 4. Pemodelan Pondasi Mesin Tipe Portal dengan Perletakan Jepit dan SSI.



Gambar 5. Dimensi Pondasi Mesin.

sesungguhnya. Dengan demikian model yang dibuat harus mampu mewakili kondisi yang sebenarnya sejauh hal tersebut dimungkinkan. Hal ini tergantung dari kelengkapan fasilitas dan kemampuan yang dimiliki oleh program bantu tersebut.

Dimensi fisik, sifat-sifat bahan, kondisi perletakan dan variasi nilai dan distribusi beban yang bekerja merupakan data masukan bagi program dalam melakukan simulasi terhadap model. Simulasi ini akan dilakukan pada dua kondisi perletakan yang berbeda, yaitu: perletakan yang terjepit penuh dan perletakan yang menyertakan tanah dan struktur bawah dalam proses analisis.

Penyusunan Model

Pondasi mesin yang ditinjau adalah tipe portal yang memikul generator gas turbin seperti yang terpasang di pabrik PT. Ajinomoto – Mojokerto (dapat dilihat pada Gambar 5). Mesin ini bekerja pada putaran 1500 rpm atau 25 Hz, sehingga masuk dalam kriteria frekuensi sangat tinggi (Srinivasulu, P. and Vadyanathan, C.V.)⁴. Berdasarkan hal ini, pondasi yang dipilih adalah tipe portal. Beberapa keunggulan dari tipe portal meliputi: kebutuhan ruang yang lebih ringkas, penghematan material, akses yang mudah pada semua bagian mesin untuk keperluan inspeksi dan pengaruh yang kecil terhadap retak akibat penurunan tanah dan perubahan suhu.

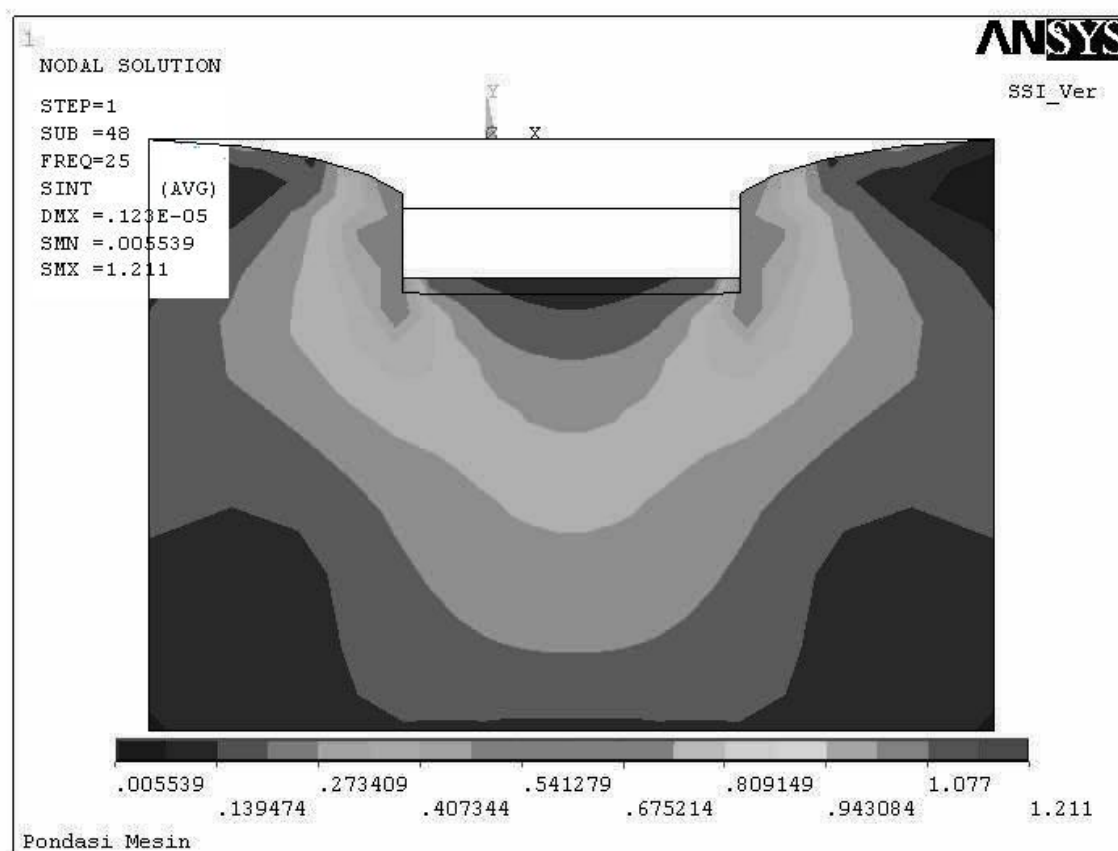
Pondasi portal ini tersusun dari pelat pondasi (sole plate) di bagian bawah yang langsung didukung oleh tanah. Pelat ini mendukung kolom-kolom yang di ujung atasnya dihubungkan dengan balok-balok memanjang dan melintang membentuk suatu bagian atas yang kaku (table-plate). Di bagian table plate inilah tempat perletakan gas turbin generator.

Mesin yang dipikul secara keseluruhan adalah berupa paket yang kompak, sehingga pembenan dianggap terdistribusi secara merata proporsional pada masing-masing perletakan yang terdiri atas enam titik perletakan yang terletak pada pertemuan balok dan kolom. Berat total paket mesin gas turbin generator ini adalah 50 ton.

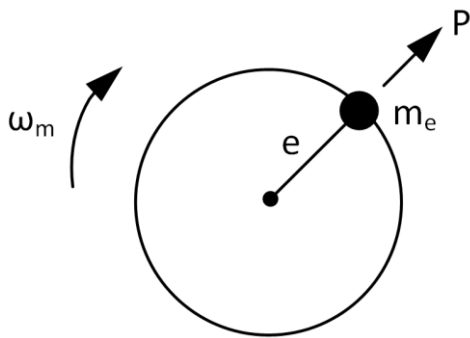
Geometri Model

Dengan kaki-kaki mesin (perletakan mesin) yang berjarak 4 m ke arah memanjang dan 1,65 m ke arah melebar maka dapat dimensi pondasi mesin tipe portal ditentukan dengan lebar 1,75 m dan tinggi 3 m. Digunakan tiga buah portal dengan jarak antar portal sebesar 4 m (dari as-as). Sole-plate berukuran 4 m x 10,5 m dengan ketebalan 1,0 m. Seluruh kolom dan balok berukuran 50 cm x 50 cm.

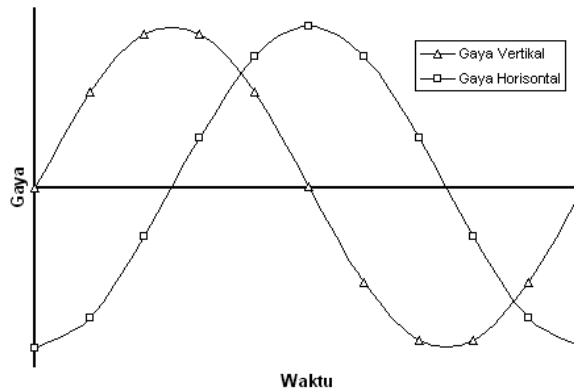
Untuk model SSI, volume tanah yang dimodelkan meliputi: lebar $b = 10$ m, panjang $l = 16,5$ m dan kedalaman $h = 7$ m. Luasan ini ditentukan dari distribusi tegangan yang terjadi pada tanah pada saat pembebanan



Gambar 6. Potongan Melintang Distribusi Tegangan Tanah Akibat Beban Dinamis Vertikal pada Frekuensi Kerja 25 Hz.



Gambar 7. Rotating Mass tipe Osilator.



Gambar 8. Gaya Unbalance.

oleh pondasi dan mesin. Batas tanah diambil pada daerah di mana tegangan yang terjadi pada tanah relatif kecil atau sama.

Dalam Gambar 6 menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi dalam tanah akibat pembebanan pondasi mesin. Angka-angka yang tertulis menggunakan satuan SI, di mana untuk tegangan menggunakan satuan kg/m^2 . Sesuai dengan warna kontur tegangan, terlihat bahwa tegangan yang terjadi pada tanah di daerah tepi luar menunjukkan gradasi yang sama yang mewakili besar tegangan $0,14 \text{ kg/m}^2$ atau sama dengan $0,000014 \text{ kg/cm}^2$. Ini adalah tegangan tanah dengan nilai yang relatif sangat kecil.

Data Material

Material struktur pondasi mesin tipe portal yang digunakan dalam analisis di sini meliputi beton bertulang dan lempung lunak, dengan data material:

Beton bertulang:

$$f'_c = 30 \text{ Mpa}$$

$$E_c = 4700\sqrt{30} \text{ MPa}$$

$$= 25742,96 \text{ MPa}$$

$$\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 0,2 \quad (\text{Macleod})^1$$

Damping rasio = 0,07 (Earthquake Spektra and Design-Earthquake Engineering Research Institute)

Lempung lunak:

$$E_s = 15 \text{ MPa} \quad (\text{Bowles, 1982})$$

$$\nu = 0,4 \quad (\text{Bowles, 1982})$$

$$\gamma = 1750 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Damping} = 0,03 \quad (\text{Barkan, 1962})$$

Pembebanan

Beban mati generator diberikan pada setiap pertemuan balok-kolom pondasi yang juga merupakan titik perletakan paket mesin (anker-bolt). Generator mempunyai berat mati sebesar 50 ton. Beban ini didistribusikan ke setiap penopang mesin secara proporsional. Penopang mesin (anker-bolt) berada tepat di pertemuan balok dan kolom pada portal pondasi. Sehingga kolom bagian dalam (2 kolom) menerima beban sebesar 12,5 ton/kolom, sedangkan kolom bagian luar (4 kolom) masing-masing menerima beban 6,25 ton. Beban-beban ini di aplikasikan ke pertemuan balok-kolom

berupa beban permukaan (surface load) pada elemen yang terletak di tengah-tengahnya. Besarnya luasan elemen yang dibebani adalah: $A = (0,5 \times 0,5) / 9 = 0,028 \text{ m}^2$. Sehingga untuk kolom bagian luar surface load yang diberikan adalah sebesar:

$$p = \frac{P}{A} = \frac{6250}{0,028} = 225000 \text{ kg/m}^2$$

dan untuk kolom bagian dalam sebesar:

$$p = \frac{P}{A} = \frac{12500}{0,028} = 450000 \text{ kg/m}^2$$

Beban dinamis yang bekerja adalah tipe rotating. Meskipun keadaan awal saat mesin baru dipasang adalah dalam kondisi seimbang tidak ada eksentrisitas, tetapi keadaan aktual pada saat bekerja selalu terjadi beberapa ketidakseimbangan akibat sumbu putaran yang tidak sentris dengan sumbu inersia unit secara keseluruhan. Dalam kasus mesin putaran sangat tinggi, eksentrisitas yang kecil dapat mengakibatkan gaya unbalance yang besar. Gambar 7 menunjukkan suatu tipikal massa yang diputar di mana massa m_e ditempatkan pada suatu as pemutar pada suatu eksentrisitas e dari pusat putaran.

Kondisi yang demikian ini akan menyebabkan gaya unbalance vertikal dan horizontal (terlihat dalam gambar 8) dengan perbedaan fase sebesar $\pi/2$, sehingga gaya unbalance vertikal bisa dituliskan sebagai:

$$P = m_e e \omega_m^2 \sin \omega_m t$$

Sedangkan gaya pada arah horizontal adalah sebesar:

$$P = m_e e \omega_m^2 \sin \left(\omega_m t - \frac{\pi}{2} \right)$$

Besarnya beban unbalance yang bekerja pada saat mesin beroperasi dihitung seperti berikut ini:

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan generator} &= 1500 \text{ rpm} \\ &= 25 \text{ Hz} \\ &= 157,08 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\text{Eksentrisitas} = 186 \text{ mm}$$

$$\text{Massa unbalance} = 62,3 \text{ g}$$

Sehingga, gaya unbalance arah horizontal dan vertikal masing-masing adalah sebesar:

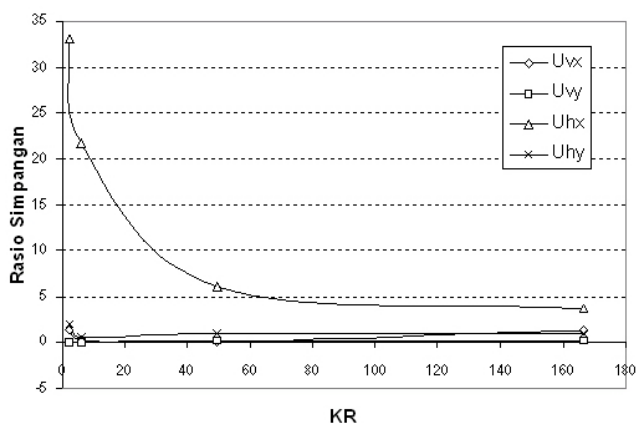
$$\begin{aligned} P &= m_e e \omega_m^2 \\ &= 0,0623 \times 0,186 \times 157,08^2 \\ &= 285,92 \text{ kg} \end{aligned}$$

Tabel 1. Respon Struktur pada $f_m = 25$ Hz untuk Pembebanan Dinamis Vertikal.

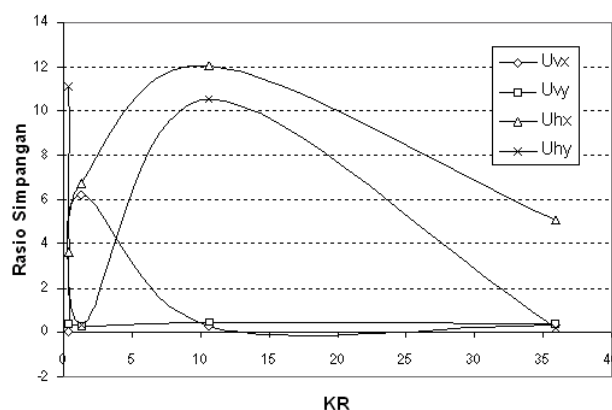
L/H	K_R	Jepit		SSI		Rasio	
		U_x	U_y	U_x	U_y	U_{vx}	U_{vy}
0.55	2.11	1.50E-09	5.78E-08	1.16E-09	8.89E-07	1.29	0.06
0.55	6.16	4.84E-10	7.66E-08	2E-09	9.03E-07	0.24	0.08
0.55	49.30	2.74E-12	2.01E-07	6.37E-11	8.3E-07	0.04	0.24
0.55	166.38	3.14E-10	2.14E-07	2.49E-10	7.74E-07	1.26	0.28
0.91	0.46	4.48E-17	2.33E-07	8.29E-16	5.5E-07	0.05	0.42
0.91	1.33	3.89E-17	2.57E-07	6.23E-18	1.04E-06	6.23	0.25
0.91	10.65	1.07E-16	2.59E-07	3.63E-16	5.78E-07	0.29	0.45
0.91	35.94	1.74E-17	2.38E-07	5.37E-17	5.85E-07	0.32	0.41
1.27	0.17	6.39E-09	3.59E-07	5.75E-09	3.5E-07	1.11	1.02
1.27	0.49	6.86E-09	3.51E-07	4.69E-09	3.69E-07	1.46	0.95
1.27	3.88	3.75E-09	2.93E-07	2.6E-09	4.27E-07	1.44	0.69
1.27	13.10	1.64E-09	2.58E-07	8.33E-10	4.52E-07	1.97	0.57
2.00	0.04	3.78E-09	5.70E-07	1.41E-09	3.18E-07	2.67	1.79
2.00	0.13	1.32E-08	4.77E-07	1.04E-07	2.18E-07	0.13	2.18
2.00	1.00	2.14E-09	3.47E-07	6.98E-10	2.18E-07	3.06	1.59
2.00	3.38	1.13E-09	2.92E-07	2.49E-10	2.45E-07	4.54	1.19

Tabel 2. Respon struktur pada $f_m = 25$ Hz untuk Pembebanan Dinamis Horizontal.

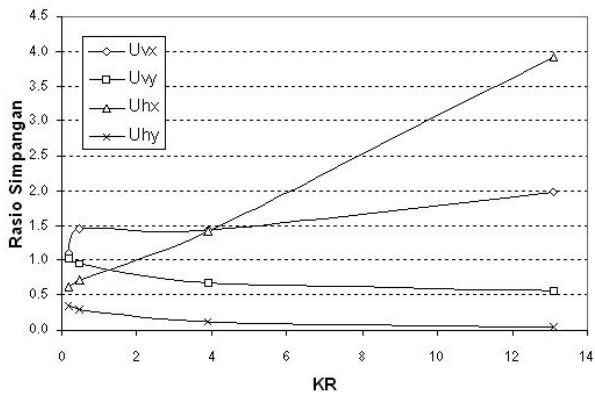
L/H	K_R	Jepit		SSI		Rasio	
		U_x	U_y	U_x	U_y	U_{hx}	U_{hy}
0.55	2.11	6.45E-05	7.17E-07	1.95E-06	3.79E-07	33.06	1.89
0.55	6.16	6.32E-05	1.37E-07	2.92E-06	2.48E-07	21.65	0.55
0.55	49.30	1.96E-05	1.11E-07	3.18E-06	1.17E-07	6.14	0.95
0.55	166.38	1.09E-05	8.03E-08	3E-06	7.74E-08	3.64	1.04
0.91	0.46	5.76E-05	9.15E-16	1.58E-05	8.23E-17	3.65	11.12
0.91	1.33	4.10E-05	1.04E-16	6.1E-06	3.11E-16	6.72	0.34
0.91	10.65	1.36E-05	4.55E-15	1.14E-06	4.33E-16	12.02	10.50
0.91	35.94	8.29E-06	8.21E-18	1.64E-06	3.79E-17	5.05	0.22
1.27	0.17	2.89E-05	6.05E-07	4.65E-05	1.76E-06	0.62	0.34
1.27	0.49	2.26E-05	3.11E-07	3.19E-05	1.03E-06	0.71	0.30
1.27	3.88	1.02E-05	2.96E-08	7.23E-06	2.46E-07	1.41	0.12
1.27	13.10	6.77E-06	4.85E-09	1.72E-06	1.14E-07	3.93	0.04
2.00	0.04	1.46E-05	3.30E-07	1.49E-05	4.19E-07	0.98	0.79
2.00	0.13	1.16E-05	1.69E-07	1.26E-05	2.69E-07	0.92	0.63
2.00	1.00	8.90E-06	3.11E-08	7.96E-06	9.59E-08	1.12	0.32
2.00	3.38	3.94E-06	1.09E-08	5.71E-06	7.17E-08	0.69	0.15



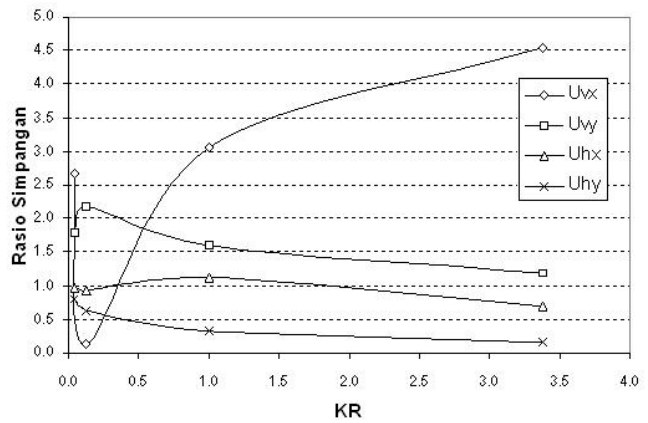
Gambar 9. Respon pada nilai $L/H = 0,55$.



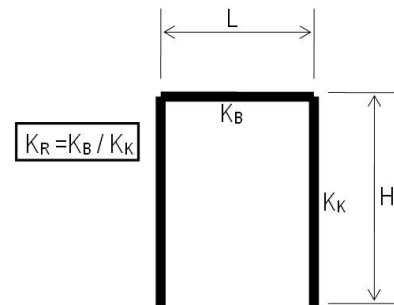
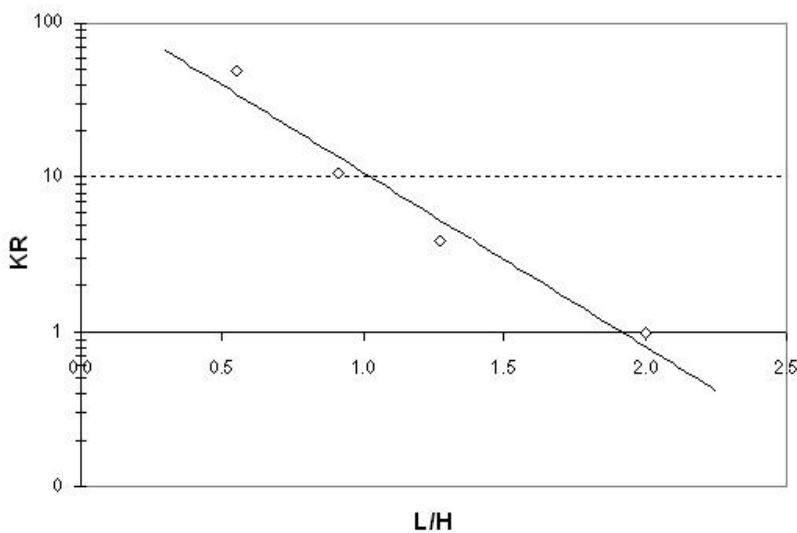
Gambar 10. Respon pada nilai $L/H = 0,91$.



Gambar 11. Respon pada nilai $L/H = 1,27$.



Gambar 12. Respon pada nilai $L/H = 2,00$.



Gambar 13. Grafik L/H terhadap K_R pada Saat Dicapai Kondisi Jepit.

Beban tersebut adalah total beban dinamis mesin, distribusi beban yang dilakukan adalah sama seperti pada pembebanan beban mati. Di mana masing-masing titik pada kolom bagian luar menerima beban unbalance sebesar $285,93/8 = 35,74$ kg. Kolom bagian dalam model diwakili oleh 4 titik yang membentuk sisi atas elemen yang terletak di tengah pertemuan balok-kolom, yang besarnya: 8,935 kg dan 17,87 kg untuk masing-masing kolom luar dan kolom dalam.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari analisis harmonis pada model pondasi mesin diperoleh nilai simpangan pada frekuensi kerja 25 Hz yang bervariasi, nilai ini ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2. L/H adalah nilai perbandingan lebar terhadap tinggi portal pondasi, sedangkan K_R adalah nilai perbandingan kekakuan balok terhadap kolom.

Rasio simpangan merupakan perbandingan respon harmonis yang terjadi pada model jepit dibandingkan dengan model SSI. Model dikatakan bisa dianggap jepit jika mempunyai rasio simpangan lebih besar atau sama

dengan 1. Gambar 9, Gambar 10, Gambar 11 dan Gambar 12 menggambarkan besarnya rasio simpangan pada L/H antara 0,55 sampai dengan 2,00. Tampak bahwa tidak semua respon bisa mencapai rasio simpangan yang lebih besar atau sama dengan 1. Meskipun demikian, respon tersebut menunjukkan lintasan yang relatif konstan pada suatu nilai K_R tertentu. Untuk keadaan ini, maka kondisi jepit untuk tiap-tiap nilai L/H bisa ditentukan pada saat lintasan grafik yang terjadi adalah relatif mendatar, yang menggambarkan bahwa rasio simpangan yang terjadi adalah konstan.

Berdasarkan hal tersebut di atas, maka grafik hubungan L/H terhadap K_R bisa ditentukan. Gambar 13 menunjukkan hubungan antara L/H dan K_R , di mana sumbu X mewakili nilai L/H dalam skala linear dan sumbu Y mewakili nilai K_R dalam skala logaritmis. Dengan menggunakan grafik ini, pondasi mesin tipe portal yang dihitung dengan anggapan perletakan jepit akan mempunyai respon struktur yang setara dengan keadaan pondasi mesin yang dalam perhitungannya mempertimbangkan terjadinya efek SSI.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kondisi jepit pada struktur pondasi mesin tipe portal dicapai dengan kondisi nilai perbandingan lebar terhadap tinggi portal yang mendekati berbanding lurus dengan logaritma nilai perbandingan kekakuan balok dan kolom portal dengan kemiringan garis -1,13. Dalam keadaan ini, struktur pondasi bisa dianggap sebagai terjepit.

Untuk keperluan perhitungan pondasi mesin tipe portal yang berada di atas lempung lunak dengan anggapan perletakan jepit, disarankan untuk mengikuti garis pada grafik hubungan L/H terhadap K_R yang sudah didapatkan. Perhitungan yang mengambil titik di daerah di bawah garis akan memberikan respon struktur yang lebih besar, karena kondisi pondasi yang lebih lentur. Sedangkan pengambilan titik yang berada di daerah di atas garis akan memberikan respon struktur yang lebih aman, tetapi struktur menjadi terlalu kaku dan boros.

DAFTAR PUSTAKA

1. Casciati, S.; and Borja, R. I., "Dynamic FE Analysis of South Memnon Colossus Including 3D Soil-Foundation-Structure Interaction," Elsevier Ltd., Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, 2004.
2. François, S; and Degrande, G., "A Time Domain Coupled Boundary Element - Finite Element Method for the Dynamic Response of Structures", 12th *International Congress on Sound and Vibration*, Lisbon, 2005.
3. MacLeod, I. A., "Analytical Modeling of Structural Systems", An Entirely New Approach with Emphasis on Behavior of Building Structures, Ellis Horwood Limited, England, 1990.
4. ANSYS, Inc. *ANSYS Theory Reference*, SAS IP, Inc., U.S, 2005.
5. Moaveni, Saeed., *Finite Element Analysis*, Theory and Application with ANSYS, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1999.
6. Rajaraman, A.; and Vadyanathan, C. V., "Influence of Taper on Frames Supporting Machines Inducing Harmonic Excitations, Foundation for Equipment & Machinery", SP 78-15, *ACI Publication SP-78*, Detroit, 1982, pp. 271-278.
7. Shen; Siyuan; Manzari, Majid T.; and Lee, James D., "Optimal Control of Framed Structures Including Seismic Soil-Structure Interaction Effects," 15th *ASCE Engineering Mechanics Conference*, New York, 2002.
8. Srinivasulu, P.; and Vadyanathan, C. V., "*Handbook of Machine Foundations*", Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi, 1976.
9. Wahyudi, L., "*Analisis Pengaruh Kolom Nonprismatik pada Struktur Frame Penopang Mesin terhadap Daya Dukung Struktur*," Tesis Program Pascasarjana S2 Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2006.
10. Wong, H. L.; and Luco, J. E., "Structural Control Including Soil-structure Interaction Effects," *Journal of Engineering Mechanics*, 117, 1991, pp. 2237-2250.
11. Sato, T.; and Toki, K., "Predictive Control of Seismic Response of Structure Taking into Account The Soil-structure Interaction", *Proceedings of the 1st European Conference on Smart Structures and Materials*, Glasgow, Scotland, 1992, pp. 245-250.
12. Smith, H. A.; Wu, W.; and Borja, R. I., "Structural Control Considering Soil-Structure Interaction Effects", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23, 1994, pp. 609-626.
13. Wu, W. H.; and Smith, H. A., "Comparison of SSI Effects for Externally and Internally Controlled Systems", *Journal of Smart materials and Structures*, 4, 1995, pp. 158-168.
14. Smith, H. A.; and Wu, W., "Effective Optimal Structural Control of Soil-Structure Interaction Systems", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 1997, pp. 549-570.
15. Luco, J. E., "A Simple Model for Structural Control Including Soil-Structure Interaction Effects", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 1998, pp. 225-242.