

Analisis Lendutan Pelat Pada Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan Software SAP2000

Analyze Slab Deflection on Expansive Clay Soil with Software SAP2000

Fadhiel Muhammad Razaqi, Willis Diana

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Tanah ekspansif merupakan salah satu penyebab utama kerusakan pada perkerasan kaku. Masalah yang ditimbulkan oleh tanah ekspansif adalah penurunan tanah yang tidak seragam dan daya dukung yang rendah. Sistem pelat terpaku telah dikembangkan sebagai alternatif perkerasan kaku pada tanah ekspansif. Interaksi yang terjadi antara tanah, pelat beton, dan tiang dapat meningkatkan daya dukung tanah dan memperkaku struktur perkerasan. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh variasi modulus reaksi *subgrade* dari hasil pengamatan kelompok tiang dan tiang tunggal yang menghasilkan lendutan sesuai dengan pengujian laboratorium. Program SAP2000 digunakan sebagai sarana elemen hingga, dan Tanah dimodelkan sebagai elemen *spring*. Hasil dari pemodelan numeris divalidasikan dengan hasil pengujian model fisik di laboratorium. Hasil lendutan yang diperoleh menunjukkan bahwa pemodelan dengan SAP2000 masih relevan untuk beban kecil dan beban sedang pada pelat terpaku. Studi ini menegaskan bahwa hasil model elemen hingga menggunakan tiang dengan nilai koefisien reaksi *subgrade* dari analisis balik sebesar 1,02-1,15 $k_{\text{tiang tunggal}}$ dan 0,86 $k_{\text{pengamatan}}$ pada kondisi tanah kering dan 1,75-4,6 $k_{\text{tiang tunggal}}$ dan 1,04-1,14 $k_{\text{pengamatan}}$ pada kondisi tanah basah menghasilkan lendutan yang paling mendekati dengan model laboratorium.

Kata kunci : tanah lempung ekspansif, metode elemen hingga, SAP2000, sistem pelat terpaku, koefisien reaksi *subgrade*.

Abstract. Expansive soil is one of the major causes of damage on the rigid pavement. The problem with this kind of soil is non-uniform vertical displacement and low bearing capacity. Nailed slab system has been developed as an alternative rigid pavement on expansive soil. The interaction among soil, concrete slab, and piles can increase the bearing capacity and stiffer pavement structure. This research aim to obtain a variety of the value of k_v and Δk_v from the single pile and group piles which will produce deflection similar to a laboratory test. The SAP2000 computer program was used as a finite element tool, and the soil is represented by the spring element. The results of finite element model was validated by model of a laboratory test. The result show that modeling with SAP2000 is suitable for small load and medium load on nailed slab system. This study confirms that finite element model using a pile with the value of the modulus of subgrade reaction by back analysis with 1,02-1,15 $k_{\text{single pile}}$ dan 0,86 $k_{\text{laboratory}}$ on dry condition and 1,75-4,6 $k_{\text{single pile}}$ dan 1,04-1,14 $k_{\text{laboratory}}$ on wet condition was closed to the laboratory model.

Keywords : expansive clay soil, finite element method, SAP2000, nailed slab system, modulus of subgrade reaction.

1. Pendahuluan

Tanah ekspansif merupakan salah satu jenis tanah yang menimbulkan kerusakan parah pada konstruksi jalan raya. Masalah yang ditimbulkan oleh perilaku tanah ekspansif terdiri dari kembang-susut tanah, yang menyebabkan penurunan tidak seragam pada tanah dan penurunan daya dukung tanah (Hardiyatmo, 2017b). Tipe perkerasan kaku umumnya digunakan sebagai salah satu pilihan dalam mengatasi permasalahan pada tanah

yang memiliki daya dukung rendah (Yasir, dkk., 2017).

Beberapa usulan metode untuk mengurangi dampak kerusakan yang disebabkan tanah ekspansif, yaitu Perkuatan vertikal seperti tiang, tiang besar, kolom kapur, dan kolom semen. Struktur ini digunakan untuk melawan gaya angkat fondasi yang disebabkan oleh pengembangan tanah (Diana, dkk., 2017). Salah satu metode yang cukup efektif untuk mengurangi lendutan dan penurunan daya

dukung pada tanah ekspansif yaitu menggunakan sistem pelat terpaku. Prinsip penerapan metode ini adalah pemasangan tiang yang dihubungkan secara monolit antara pelat dan tiang (Hardiyatmo, 2011). Perkuatan tanah dengan menggunakan sistem pelat terpaku telah dilakukan oleh Diana (2011), Hardiyatmo dkk (2011), Hartono (2013), Sall dkk. (2013), Miranda, dkk. (2015), Utomo dan Yulianto (2017), serta Puri dan Mildawati (2019). Hasil penelitian secara umum menunjukkan bahwa perkuatan tanah ekspansif dengan sistem pelat terpaku dapat mengurangi lendutan yang terjadi akibat pembebanan diatas tanah ekspansif. Sistem pelat terpaku merupakan salah satu metode yang efektif untuk perkerasan yang ada diatas tanah ekspansif (Miranda dkk., 2015). Interaksi yang terjadi antara tanah-tiang-pelat membuat pelat beton menjadi lebih kaku, sehingga mengurangi lendutan yang terjadi pada perkerasan kaku (Hardiyatmo, 2011).

Beberapa pemodelan elemen hingga telah banyak dilakukan di bidang teknik sipil, khususnya geoteknik karena dapat memberikan pendekatan numeris terhadap permasalahan yang kompleks (Gray, 2013). Pemodelan elemen hingga dilakukan untuk memudahkan dalam memperoleh hasil yang rumit dan memerlukan ketelitian (Firdaus, 2010). Pemodelan elemen hingga untuk perkuatan tanah dengan sistem pelat terpaku dilakukan oleh Diana (2011), Khodair dan Abdel-mohti (2014), Diana dkk. (2017), Utomo dan Yulianto (2017), Yasir dkk. (2017), Puri dan Mildawati (2019), serta Yudandi dan Setiawan (2019), hasil pemodelan menunjukkan nilai penurunan tanah yang mendekati dengan hasil pengamatan laboratorium.

Pada penelitian ini, akan dilakukan pemodelan numeris dengan sistem pelat terpaku untuk mengurangi lendutan yang terjadi akibat pembebanan yang terjadi pada pelat diatas tanah ekspansif. Penelitian ini difokuskan untuk mencari nilai koefisien reaksi *subgrade* berdasarkan variasi nilai k_v dan Δk_v pada sistem pelat terpaku yang diperkuat tiang 10 cm dan 20 cm. Nilai koefisien yang diperoleh digunakan untuk mengkaji lendutan yang terjadi pada pelat akibat proses pembebanan. Permasalahan yang dihadapi dalam pemodelan numeris adalah membutuhkan pendekatan analisis secara

numerik dimana struktur disederhanakan dalam elemen-elemen kecil yang umumnya memiliki geometri sederhana dengan derajat kebebasan tertentu (Yudandi dan Setiawan, 2019). Adapun elemen-elemen kecil tersebut, yaitu elemen *spring* (tanah) dengan parameter nilai koefisien reaksi *subgrade* (k_v dan Δk_v) digunakan sebagai *properties* dari *spring* dan elemen *shell* untuk memodelkan struktur perkerasan (pelat beton).

Tiang dan tanah dimodelkan sebagai elemen pegas (*spring*) dan pelat beton sebagai elemen cangkang 3-D (*shell*). Elemen *spring* sebagai pemodelan tanah diperkenalkan oleh Potss dkk pada tahun 1999 (Suhendro dan Hardiyatmo, 2005). Pada pemodelan *spring* dibutuhkan nilai koefisien reaksi *subgrade* vertikal (k_v) dan kenaikan modulus reaksi *subgrade* akibat penambahan tiang (Δk_v) (Puri, dkk., (2015). Lendutan pelat pada pelat yang diperkuat tiang 10 cm dan 20 cm dianalisis dengan menggunakan metode elemen hingga 3 dimensi dengan program SAP2000.

Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh variasi nilai k_v dan Δk_v dari hasil pengamatan kelompok tiang dan tiang tunggal yang menghasilkan lendutan sesuai dengan pengujian laboratorium dan nilai k_v dan Δk_v yang diperoleh digunakan untuk menentukan besar lendutan dalam pemodelan sistem pelat terpaku dengan perkuatan tiang 10 cm dan 20 cm.

2. Landasan Teori

Koefisien Reaksi Subgrade

Koefisien reaksi *subgrade* merupakan nilai perbandingan dari beban tiap satuan luas dibagi dengan nilai penurunan atau lendutan rerata (Hardiyatmo, 2009). Persamaan dasar untuk menghitung nilai koefisien reaksi *subgrade* pada pengujian beban pelat disajikan sebagai berikut:

$$k_v = \frac{p}{\delta} \dots\dots\dots (1)$$

- dengan,
- k_v = Koefisien *subgrade* (kN/m³),
 - p = Tekanan (kN/m²),
 - δ = Lendutan rerata pelat (m).

Sedangkan pada pelat fleksibel disarankan menggunakan persamaan (2) dan (3). Untuk skema lendutan rerata pada pelat dapat dilihat pada Gambar 1 (Hardiyatmo, 2009):

$$k_v = \frac{Q}{\delta_a A_c} \dots\dots\dots (2)$$

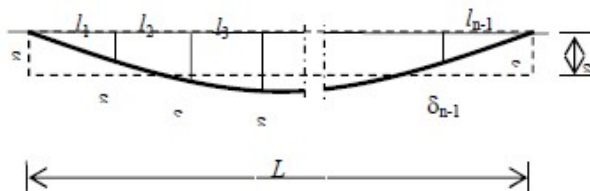
dengan,

- Q = Beban pelat (kN),
- A_c = Luas bidang tekanan (m²),
- δ_a = Lendutan rerata pelat (m).

$$\delta_a = \frac{1}{2L} \{l_1(\delta_i + \delta_{i+1}) + l_{i+1}(\delta_{i+1} + \delta_{i+2}) + \dots + l_{n-1}(\delta_{n-1} + \delta_n)\} \quad (3)$$

dengan,

- δ_a = Lendutan rerata pelat (m),
- δ_i = Lendutan di titik ke-i (m),
- L = Panjang pelat fleksibel (m).



Gambar 1. Skema penentuan lendutan rerata (Hardiyatmo, 2009)

Koefisien reaksi *subgrade* ekuivalen

Koefisien reaksi *subgrade* ekuivalen (*k'*) merupakan nilai koefisien reaksi *subgrade* akibat penambahan tiang dalam menahan lendutan yang dinyatakan persamaan (4) (Hardiyatmo, 2017a):

$$k' = k + \Delta k \dots\dots\dots (4)$$

dengan,

- k'* = Koefisien reaksi *subgrade* ekuivalen (kN/m³),
- k* = Koefisien reaksi *subgrade* (kN/m³),
- Δ*k* = Kenaikan koefisien reaksi *subgrade* (kN/m³).

3. Metode Penelitian

Parameter Material

Metode analisis lendutan yang digunakan pada penelitian ini adalah metode elemen hingga (MEH). Tanah dimodelkan dengan model elemen pegas dan pelat dimodelkan dalam cangkang 3-D. Pemodelan SAP2000

berbasis elemen hingga digunakan untuk simulasi pada pelat terpaku. Parameter yang diperlukan dalam pemodelan SAP2000 antara lain:

1. Material tanah

Model material tanah dimodelkan sebagai *spring* dan properties material, yaitu koefisien reaksi *subgrade* (*k_v* dan Δ*k_v*) yang diperoleh berdasarkan hasil pengamatan pada tiang tunggal dan hasil pengamatan pada tiang kelompok. Adapun hasil pengujian sifat fisis dan mekanis pada tanah ekspansif dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil uji sifat fisis dan mekanis pada tanah ekspansif

Variabel	Hasil
Berat Jenis, Gs	2,69
Kadar Air awal (%)	15,3
Uji Proktor Standar:	
Berat Volume Kering Maksimum (kN/m ³)	12,82
Kadar Air Optimum, OMC (%)	14,9
Batas-batas konsistensi:	
-Batas Cair, LL (%)	95,8
-Batas Plastis, PL (%)	29,13
-Batas Susut, SL (%)	10,9
-Indeks Plastisitas, PI (%)	66,66
Persen fraksi lolos > no. 200 (%)	89,98
Klasifikasi USCS	CH
Klasifikasi AASTHO	A-7-6
Persen Pengembangan (%)	13,56
Tekanan Pengembangan (Kpa)	140
Aktivitas Tanah	3,7

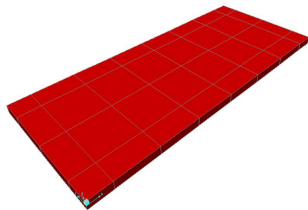
2. Material beton

Material tiang dimodelkan sebagai cangkang 3-D (*shell*). Parameter yang dibutuhkan dalam material ini, antara lain *weight unit per volume*, *modulus of elasticity*, dan *poisson's ratio* beton.

Pemodelan pada SAP2000

Parameter yang diperoleh digunakan untuk melakukan pemodelan pada sistem pelat terpaku. Pemodelan ini dilakukan dengan memodelkan pelat berukuran 70 cm x 30 cm x 2 cm pada beban kendaraan sebesar 50 kg, 100

kg, dan 190 kg. Analisis numeris ini menggunakan *software* SAP2000 ver.14. Model dari pelat terpaku dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Model pelat terpaku

4. Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Pelat yang Diperkuat Tiang 10 cm dan 20 cm Terhadap Parameter Tanah Pada Pemodelan

Metode elemen hingga adalah salah satu metode numerik yang digunakan untuk memperoleh hasil yang sesuai dengan nilai dilapangan pada suatu masalah yang sulit dianalisis (Fattah, dkk., 2015). Simulasi pemodelan numerik menggunakan SAP2000 menunjukkan bahwa *spring* pada pelat beton mampu mengurangi lendutan pelat. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan *spring* sebagai pengganti tiang pada pelat terpaku dapat diaplikasikan dalam pemodelan sistem pelat dengan perkuatan tiang. (Puri dan Mildawati, 2019), menjelaskan bahwa penambahan panjang tiang akan meningkatkan kinerja sistem pelat dimana lendutan semakin berkurang. Kondisi ini menyebabkan nilai koefisien reaksi *subgrade* mengalami kenaikan akibat kontribusi tiang dalam menahan perpindahan vertikal pelat (Hardiyatmo, 2017a). Kenaikan koefisien ini didefinisikan sebagai Δk_v

Dalam penelitian ini, nilai koefisien reaksi *subgrade* yang digunakan untuk pelat dalam pemodelan SAP2000 berbeda antara yang diperkuat *minipile* dengan panjang 10 cm dan 20 cm. Nilai koefisien reaksi *subgrade* diperoleh dari hasil pengujian pelat terpaku dengan *minipile* tunggal, kelompok tiang, dan hasil analisis balik. Dari hasil pengamatan kelompok tiang didapatkan nilai k_v dan Δk_v yang sesuai. Sehingga, nilai k_v dan Δk_v dari hasil analisis balik menghasilkan lendutan yang mendekati dengan lendutan pada pengujian laboratorium. Nilai koefisien reaksi *subgrade*

(k_v) dan kenaikan koefisien reaksi *subgrade* (Δk_v) pada kondisi kering maupun basah dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3, serta Tabel 4 untuk material beton.

Tabel 2 Nilai koefisien reaksi *subgrade* pada *minipile* dengan panjang 10 cm dan 20 cm pada kondisi kering

Panjang (cm)	Data	k_v (kg/cm ³)	Δk_v (kg/cm ³)
10	Pengamatan	7,837	3,116
	Tiang Tunggal	5,868	0,504
	Analisis Balik	6,754	2,21
20	Pengamatan	7,981	3,237
	Tiang Tunggal	6,75	1,385
	Analisis Balik	6,885	2,493

Tabel 3 Nilai koefisien reaksi *subgrade* pada *minipile* dengan panjang 10 cm dan 20 cm pada kondisi basah

Panjang (cm)	Data	k_v (kg/cm ³)	Δk_v (kg/cm ³)
10	Pengamatan	0,796	0,54
	Tiang Tunggal	0,518	0,018
	Analisis Balik	0,907	0,549
20	Pengamatan	2,774	2,518
	Tiang Tunggal	0,626	0,126
	Analisis Balik	3,051	2,77

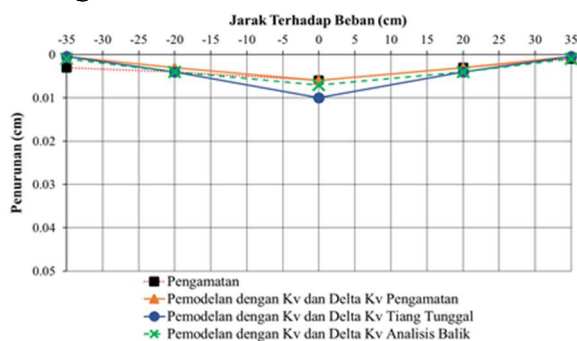
Tabel 4 Data *properties* beton

Data	<i>Properties</i> Elemen	
	Notasi	Nilai
Elastis	<i>Modulus of Elasticity</i> (Kg/cm ²)	584746,9
	<i>Poisson's Ratio</i> (μ)	0,2

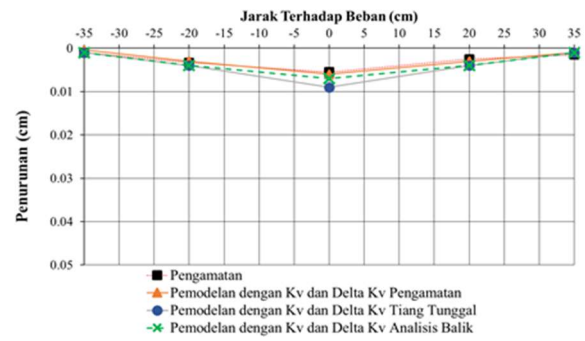
Pemodelan Sistem Pelat Terpaku dengan Perkuatan Tiang

Berdasarkan pemodelan numeris, lendutan pada pelat yang diperkuat *minipile* dengan panjang 20 cm lebih kecil dari 10 cm, nilai lendutan yang terjadi pada pelat dalam kondisi tanah kering ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Untuk nilai lendutan pada pelat dalam kondisi basah dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6.

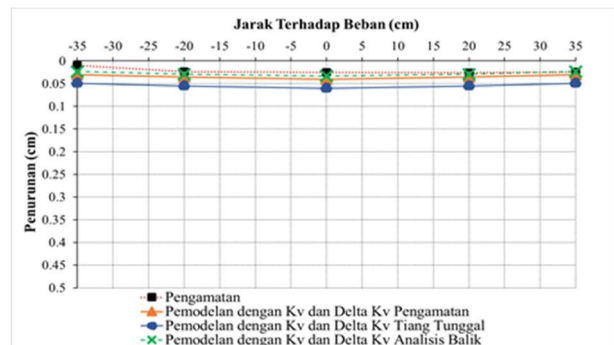
Peningkatan reduksi lendutan pada pelat terjadi dengan tiang $L = 20$ cm dibandingkan dengan tiang $L = 10$ cm (Hartono, 2013). Hasil ini menunjukkan bahwa lendutan pada pelat terpaku akibat variasi penambahan panjang tiang menjadi berkurang. Penggunaan tiang pada pelat terpaku berfungsi sebagai peredam beban dan mampu mengurangi penurunan pada arah vertikal (Diana dkk., 2016). Besarnya mutu beton juga berpengaruh terhadap besar maupun kecil nilai lendutan pada pelat (Utomo dkk., 2017). Pada Gambar 4.9, Gambar 4.10, Gambar 4.11, dan Gambar 4.12 pengamatan laboratorium menghasilkan grafik lendutan yang tidak begitu linier, lendutan cenderung semakin besar dan tidak mengalami penurunan yang teratur. Sedangkan pada hasil analisis pemodelan diperoleh grafik dengan pola pertambahan lendutan yang linier, hal ini disebabkan analisis SAP2000 menggunakan analisis linier elastis. Dari grafik dibawah ini dapat disimpulkan bahwa pemodelan dengan SAP2000 masih relevan untuk menganalisis pelat terpaku dengan beban kecil maupun beban sedang.



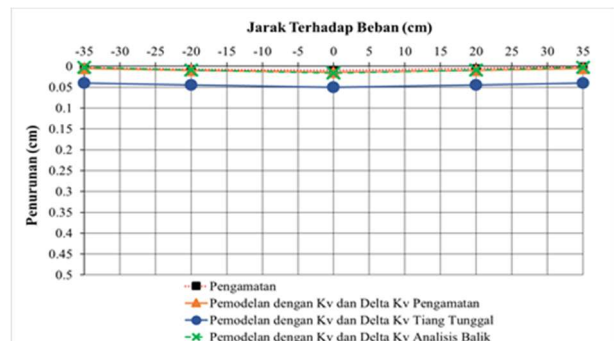
Gambar 3 Grafik perbandingan lendutan pelat hasil pengamatan dan pemodelan dengan tiang 10 cm dalam kondisi kering



Gambar 4 Grafik perbandingan lendutan pelat hasil pengamatan dan pemodelan dengan tiang 20 cm dalam kondisi tanah kering



Gambar 5 Grafik perbandingan lendutan pelat hasil pengamatan dan pemodelan dengan tiang 10 cm dalam kondisi tanah basah



Gambar 6 Grafik perbandingan lendutan pelat hasil pengamatan dan pemodelan dengan tiang 20 cm dalam kondisi tanah basah

5. Kesimpulan

Kesimpulan

Dari hasil penelitian tentang pemodelan pada pelat terpaku di atas tanah ekspansif. Kesimpulan yang didapatkan adalah sebagai berikut:

1. Analisis pemodelan numeris pelat terpaku dengan tiang menggunakan tiga variasi k_v dan Δk_v yaitu dari hasil pengamatan, tiang tunggal, dan analisis balik memberikan pengaruh terhadap lendutan, bahwa

- semakin besar nilai k_v dan Δk_v maka nilai lendutan semakin kecil
2. Berdasarkan pemodelan elemen hingga pada pelat yang diperkuat tiang dengan tiga variasi k_v dan Δk_v yaitu dari hasil pengamatan, tiang tunggal, dan analisis balik memiliki hasil yang cenderung mendekati hasil pengujian laboratorium. Namun variasi k_v dan Δk_v dari hasil analisis balik lebih mendekati dengan keadaan lapangan daripada semua variasi.
 3. Percobaan variasi nilai k_v adalah 1,02-1,15 $k_{\text{tiang tunggal}}$ dan 0,86 $k_{\text{pengamatan}}$ pada kondisi tanah kering dan 1,75-4,6 $k_{\text{tiang tunggal}}$ dan 1,04-1,14 $k_{\text{pengamatan}}$ pada kondisi tanah basah menghasilkan lendutan yang paling mendekati dengan lendutan model fisik laboratorium.
 4. Pemodelan dengan SAP2000 masih relevan untuk menganalisis pelat terpaku dengan beban kecil maupun beban sedang

6. Daftar Pustaka

- Diana, W., 2011, Perbandingan Analisis Lendutan Pelat dengan Menggunakan Metode Beam on Elastic Foundation (BoEF) dan Finite Element Method (FEM), *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, 14(1), 94–100.
- Diana, W., Hardiyatmo, C., & Suhendro, B., 2016, Small-scale experimental investigation on the behaviour of nailed slab system in expansive soil, *International Conference on Science and Technology-Computer (ICST 2016)*, Yogyakarta, 27-28 October 2016, pp. 1-7.
- Diana, W., Hardiyatmo, H. C., & Suhendro, B., 2017, Effect of Pile Connections on The Performance of The Nailed Slab System on The Expansive Soil, *International Journal of Geomate*, 12(32), 134–141.
- Fattah, M. Y., Al-omari, R. R., & Ali, H. A., 2015, Numerical Simulation of The Treatment of Soil Swelling Using Grid Geocell Columns, *Slovak Journal of Civil Engineering*, 23(2), 9–18.
- Firdaus, W., 2010, Prediksi Perilaku Pelat Beton Di Atas Tanah Lunak Menggunakan Metode Boef (Beams On Elastic Foundation) Ditinjau Pada Variasi Tebal Pelat Beton Dan Nilai Pembebanan, *Skripsi*, Jurusan Teknik Sipil, Program S1 Universitas Sebelas Maret
- Gray, M., 2013, Analysis of Geothermal Pile Foundations under Combined Axial and Moment Loading, *Theses, Master of Science in Civil Engineering* Washington State University .
- Hardiyatmo, H. C., 2009, Metoda Hitungan Lendutan Pelat dengan Menggunakan Modulus Reaksi Tanah Dasar Ekvivalen untuk Struktur Pelat Fleksibel, *Jurnal Dinamika Teknik Sipil*, 9, 149–154.
- Hardiyatmo, H. C., 2011, Method to Analyze the Deflection of the Nailed Slab System, *International Journal of Civil & Environmental Engineering (IJCEE-IJENS)*, Vol. 11, No.04.
- Hardiyatmo, H. C., 2017, *Perancangan Perkerasan Jalan dan Penyelidikan Tanah*, Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C., 2017, *Tanah Ekspansif Permasalahan dan Penanganan*, Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hartono, E., 2013, Uji Beban dan Analisis Lendutan Model Pelat Fleksibel yang Didukung Tiang-Tiang pada Tanah Pasir, *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, 16(1), 65–75.
- Khodair, Y., & Abdel-mohti, A., 2014, Numerical Analysis of Pile – Soil Interaction under Axial and Lateral Loads, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(3), 239–249.
- Miranda, E. F., Hardiyatmo, H. C., & Fathani, T. F., 2015, Pengaruh Tekanan Kekang terhadap Kapasitas Dukung Sistem Pelat Terpaku dalam Uji Dua Dimensi, *Prosiding Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian pada Masyarakat*, Pangkalpinang, 7 Oktober 2017, pp. 1–7.
- Puri, A., & Mildawati, R., 2019, Investigasi Numerik Perkerasan Jalan Sistem Pelat Terpaku terhadap Variasi Dimensi Struktur, *Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 7(1), 1–7.
- Puri, A., Suhendro, B., & Rifa'i, A., 2015, Perilaku Perkerasan Sistem Pelat Terpaku pada Tanah Dasar, *Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil Prosiding*, Bandung, 12 November 2015, pp. 7-17.

- Sall, O. A., Fall, M., Berthaud, Y., & Ba, M., 2013, Influence of the Elastic Modulus of the Soil and Concrete Foundation on the Displacements of a Mat Foundation, *Open Journal of Civil Engineering (OJCE)*, 3, 228–233.
- Suhendro, B., & Hardiyatmo, H. C., 2005, *Sistem Perkerasan Cakar Ayam Modifikasi (CAM) sebagai Alternatif Solusi Konstruksi Jalan di Atas Tanah Lunak, Ekspansif, dan Timbunan*, Jakarta: Buku 60 tahun Departemen Pekerjaan Umum.
- Utomo, V. P., & Yulianto, B., 2017, Analisis lendutan perkerasan kaku pada pembebanan tengah dan tepi dengan metode elemen hingga, *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran, Dan Ilmu Kesehatan*, 1(1), 142–149.
- Yasir, F., Surjandari, N. S., & Purwana, Y. M., 2017, Analisis lendutan perkerasan kaku pada pembebanan sudut dengan metode elemen hingga, *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran, Dan Ilmu Kesehatan*, 1(1), 150–156.
- Yudandi, L. A., & Setiawan, B., 2019, Analisis Lendutan Model Sistem Cakar Ayam Modifikasi dengan Pembebanan Tunggal (Beban Titik), *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, (2008), 53–58.