

PERILAKU PELAT BETON DI ATAS TANAH EKSPANSIF MELALUI SIMULASI ANALISIS BEAMS ON ELASTIC FOUNDATION

Prasetyo Widhy Utomo, Bambang Setiawan, dan Yusep Muslih Purwana

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jln. Ir. Sutami No. 36A, Surakarta 57126.

Email : prasetyowidhyutomo@student.uns.ac.id

Abstract

Soil that acts as a construction support can cause a number of problems if it has a large shrinkage. The development and shrinkage behavior (fluctuating) of the soil can affect the behavior of the concrete pavement above it. This study analyzes the behavior of concrete pavement on expansive soil during expansion and shrinkage using the BoEF (Beams on Elastic Foundation) method. The analytical method is applied in a 2-dimensional model simulation with an expansive soil subgrade modulus of 30.000 kN/m^2 , and a swelling pressure of 175 kPa . The plate simulation model consists of 12 variations based on the thickness of the plate and the value of the applied line loading. The results of this study indicate that the largest deformation occurs in the 15 cm thick slab with deflection behavior for every 10 cm addition of the slab thickness, the concrete slab will experience a deflection of 10% . Deflection behavior due to additional load every 100 kN for the maximum expansion phase at the ends of the 15 cm , 25 cm , and 35 cm thickness plates each increased by $0,73\%$; $1,41\%$; and $0,85\%$ while at the center of the plate it will decrease by $7,54\%$ respectively; $5,44\%$; and $4,44\%$.

Keywords: BoEF, concrete plate, deflection, expansive soil, shrinkage, and swelling

Abstrak

Tanah yang berperan sebagai penopang konstruksi dapat menimbulkan sejumlah masalah apabila memiliki kembang susut yang besar. Perilaku pengembangan dan penyusutan (*fluktuatif*) tanah dapat mempengaruhi perilaku perkerasan beton yang ada di atasnya. Penelitian ini menganalisis perilaku perkerasan beton di atas tanah ekspansif sewaktu mengalami pengembangan dan penyusutan menggunakan metode BoEF (Beams on Elastic Foundation). Metode analisis diterapkan dalam simulasi model 2 Dimensi dengan modulus *subgrade* tanah ekspansif 30.000 kN/m^2 , dan *swelling pressure* 175 kPa . Model simulasi pelat terdiri atas 12 variasi berdasarkan ketebalan pelat dan nilai pembebanan garis yang diterapkan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa lendutan terbesar terjadi pada pelat tebal 15 cm dengan perilaku lendutan setiap penambahan ketebalan pelat sebesar 10% pelat beton akan mengalami lendutan sebesar 10% . Perilaku lendutan akibat penambahan beban setiap 100 kN untuk fase pengembangan maksimum pada ujung pelat ketebalan 15 cm , 25 cm , dan 35 cm masing-masing mengalami kenaikan sebesar $0,73\%$; $1,41\%$; dan $0,85\%$ sedangkan pada tengah pelat masing-masing akan berturut-turut turun sebesar $7,54\%$; $5,44\%$; dan $4,44\%$.

Kata kunci: BoEF, lendutan, pelat beton, pengembangan, penyusutan dan tanah ekspansif

PENDAHULUAN

Tanah adalah material yang paling penting dalam setiap pekerjaan teknik sipil seperti konstruksi bangunan gedung dan infrastruktur. Semua konstruksi tersebut seperti gedung-gedung, jembatan, urugan tanah, bendungan, jalan, jembatan, dan lain sebagainya akan ditopang oleh tanah. Tanah penopang yang buruk dapat menimbulkan sejumlah masalah pada bangunan konstruksi. Jenis tanah bersifat buruk tersebut umumnya adalah tanah yang memiliki kembang susut tinggi.

Perkerasan kaku dapat mengalami kerusakan ketika pondasi tanah dasarnya (*subgrade*) berupa tanah ekspansif. Tanah ekspansif mengalami perubahan *swelling pressure* pada proses pengembangan hingga penyusutan sehingga perkerasan yang dibangun di atasnya mengalami lendutan. lendutan perkerasan tersebut dapat diketahui melalui pengkajian analisis perilaku perkerasan beton di atas tanah ekspansif menggunakan analisis perhitungan metode *Beams on Elastic Foundation*.

Tanah ekspansif mengalami pengembangan dan penyusutan tanah akibat perubahan volume. *Swelling pressure* dimodelkan untuk memperoleh perilaku lendutan pelat beton di atasnya. Prosetase perubahan lendutan hasil analisis BoEF berdasarkan model *swelling pressure* tersebut ditentukan berdasarkan variasi ketebalan pelat dan variasi nilai pembebanan yang digunakan.

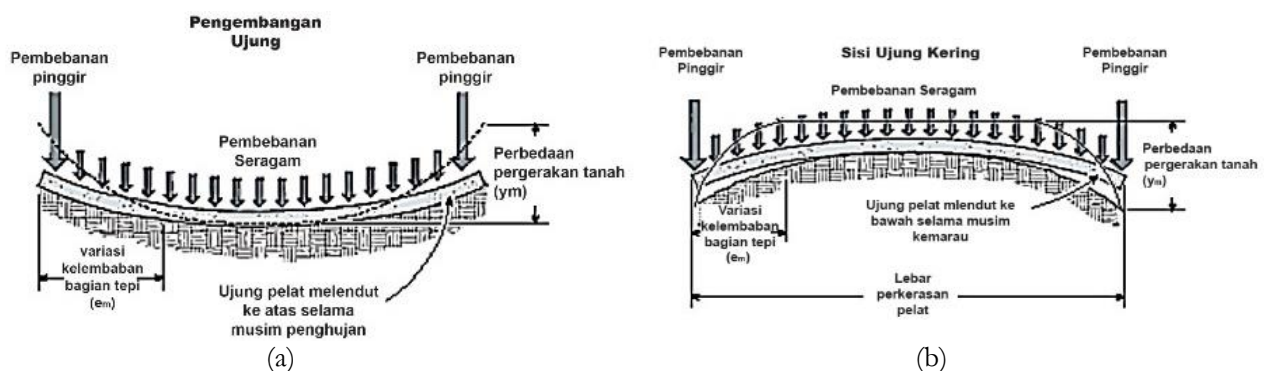
Hardiyatmo (1999) telah melakukan penelitian mengenai perilaku sistem cakar ayam dengan menggunakan model

skala laboratorium, analisis yang digunakan berdasarkan teori *Beams on Elastic Foundation*. Penelitian tersebut ditujukan untuk validasi pada penelitian sistem cakar ayam model waru, Surabaya oleh Suhendro (2006) dan model Polonia, Medan oleh Antono (1981). Penelitian yang menerapkan metode BoEF sebagai analisis perhitungan lendutan pada sistem Cakar Ayam Modifikasi juga terdapat dalam Pempadi (2000), Firdiansyah (2009), Muhi (2007), dan Agustin (2017). Lendutan yang diperoleh dari perhitungan kemudian digunakan sebagai pembandingan pengamatan di lapangan maupun di laboratorium.

Puri (2017) menganalisis lendutan dan gaya dalam pada sistem pelat terpaku untuk pembangunan jalan di atas tanah ekspansif menggunakan teori BoEF. Hasil lendutan maksimum pada titik beban dibandingkan dengan lendutan toleransi yang sudah ditetapkan sebagai acuan perancangan jalan berdasarkan nilai modulus reaksi tanah dasar ekuivalen (k^2).

Penelitian ini merupakan kelanjutan dari pemodelan perilaku perkerasan menggunakan metode *BoEF* untuk mendekati hasil pengamatan sebagaimana disebutkan referensi di atas, namun penelitian ini akan mempertimbangkan *swelling pressure* tanah sewaktu mengalami pengembangan hingga penyusutan yang dimodelkan untuk simulasi di bawah pelat. Hasil pengujian penelitian ini untuk memodelkan *swelling pressure* tanah dan menghitung perilaku lendutan pelat beton di atas tanah ekspansif.

Tanah ekspansif adalah tanah tidak stabil dimana apabila kadar airnya bertambah akan mengembang dan bila kadar airnya berkurang akan menyusut. Tanah ini memiliki karakteristik kekuatan tinggi saat kering, kekuatan rendah saat basah, retakan susut yang lebar pada musim kering, plastisitas yang tinggi, dan sangat lemah bila dilintasi kendaraan saat basah. Sifat kembang susut yang demikian bisa menimbulkan kerusakan pada bangunan (Hardiyatmo, 2006). Lendutan pada pelat akibat pengembangan dan penyusutan tanah dasar ekspansif pada perkerasan kaku (pelat beton), ditunjukkan dalam Gambar 1 berikut ini,



Gambar 1. (a) Lendutan ke atas pada perkerasan kaku akibat pengembangan dan (b) lendutan ke bawah pada perkerasan kaku akibat penyusutan tanah ekspansif (Allerd, 2004).

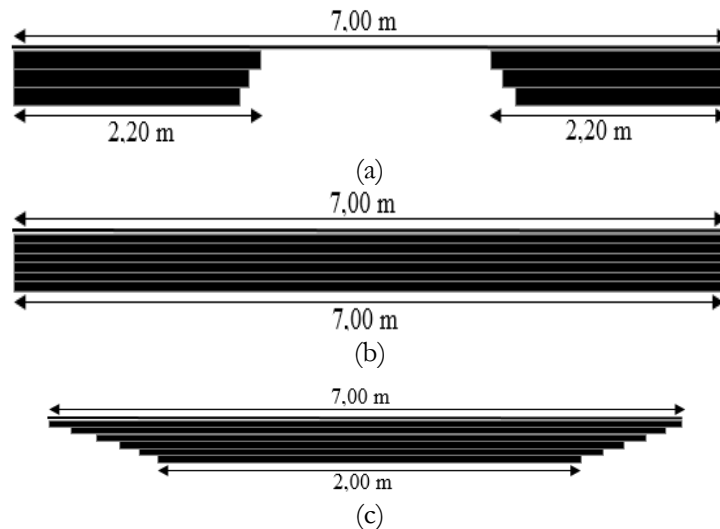
Metode *Beams on Elastic Foundation* pertama kali diperkenalkan oleh Hetenyi pada tahun 1974. Gaya reaksi akibat beban pada setiap titik akan sebanding dengan nilai defleksi pada titik tersebut. Asumsi ini pertama kali digunakan oleh Winkler di tahun 1867, sehingga tipe ini sering disebut dengan Winkler (Hetenyi, 1974).

METODE

Metode penelitian yang dipakai adalah metode simulasi pemodelan berupa analisis untuk menentukan perilaku lendutan pada perkerasan pelat beton di atas tanah ekspansif. Metode simulasi yang dilaksanakan menggunakan data sekunder berupa nilai modulus *subgrade* tanah dengan CBR = 3% sebesar 30.000 kN/m² (Hardiyatmo, 2010) dan *swelling pressure* sebesar 175 kPa yang diperoleh dari hasil pengujian tanah trucuk menggunakan Oedometer di Laboratorium Mekanika Tanah UNS.

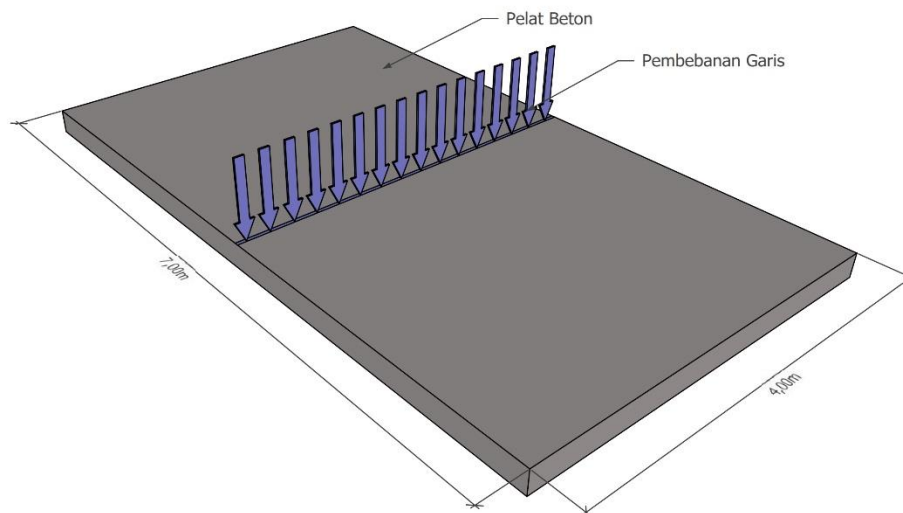
Nilai yang diambil berupa data tanah ekspansif yang mewakili nilai k_v yang dibutuhkan pada penelitian ini untuk meninjaunya terhadap variasi ketebalan pelat beton dan nilai pembebanan. Analisis perilaku lendutan pelat beton menggunakan program spreadsheet *BoEF* (*Beam on Elastic Foundation*) (Tomanovich, 2003).

Simulasi menggunakan variasi tebal pelat dan nilai pembebanan dengan memodelkan nilai *swelling pressure* untuk menerapkan perilaku pengembangan dan penyusutan pada tanah. Mekanisme pengembangan dan penyusutan tanah ekspansif didasarkan pada pola pengembangan *hypothetical* Setiawan (2015) yang selanjutnya akan dimodelkan dalam penelitian menjadi *hypothetical* program *BoEF* menjadi *distributed load* (beban merata) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. (a) Model pengembangan, (b) Model pengembangan maksimum, dan (c) Model penyusutan

Pembebanan yang diterapkan dalam program *BoEF* 2 dimensi merupakan pembebanan garis selebar dari perkerasan (B). Lokasi pembebanan terletak sentris di tengah pelat beton sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Nilai pembebanan saat 100 kN artinya diberikan selebar 4 m pelat beton sehingga diperoleh 100 kN/4m.



Gambar 3. Sketsa pembebanan pada pelat beton

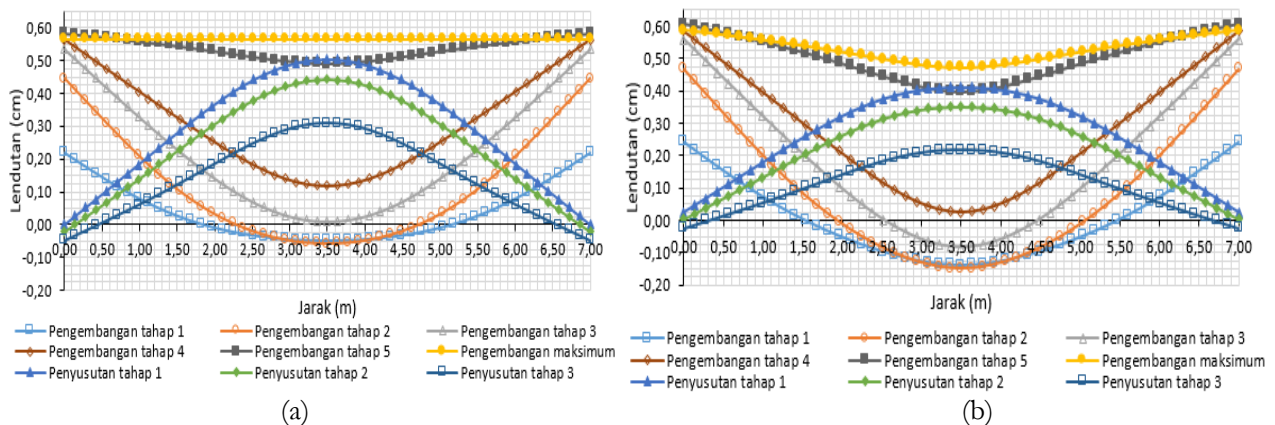
Pada simulasi model dan analisis ini akhirnya ditentukan 12 variasi pembebanan dan ketebalan pelat terhadap 9 pola *swelling pressure* tanah sehingga akan diperoleh 36 kondisi perilaku perkerasan pelat beton yang diinterpretasikan dalam grafik. Kondisi perilaku perkerasan pelat beton tersebut akan diringkas berdasarkan *swelling pressure* pengembangan, pengembangan maksimum, dan penyusutan sehingga diperoleh 3 tahapan *swelling pressure* tanah terhadap 12 variasi perilaku perkerasan pelat beton sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1 berikut ini,

Tabel 1. Variasi perilaku pelat berdasarkan *swelling pressure* tanah

Kondisi	Jenis	Nilai Pembebanan (kN)	Ketebalan pelat (cm)
Pengembangan	Variasi 1	0	15
- tahap 1	Variasi 2	0	25
- tahap 2	Variasi 3	0	35
- tahap 3	Variasi 4	100	15
- tahap 4	Variasi 5	200	15
- tahap 5	Variasi 6	300	15
Pengembangan maksimum	Variasi 7	100	25
Penyusutan	Variasi 8	200	25
- tahap 1	Variasi 9	300	25
- tahap 2	Variasi 10	100	35
- tahap 3	Variasi 11	200	35
	Variasi 12	300	35

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembebanan sentris yang diberikan kepada pelat akan mengakibatkan terjadinya lendutan ke atas pada ujung pelat. Nilai lendutan di ujung pelat saat pengembangan tanah dengan pembebanan akan lebih besar daripada tanpa pembebanan, namun lendutan pada bagian tengah pelat akan lebih kecil saat pelat menerima pembebanan. Kondisi tersebut sebagai contoh dapat dilihat pada pengembangan tahap 5 saat pelat dibebani 300 kN diperoleh lendutan pada tengah pelat sebesar 0,4169 cm sedangkan lendutan tahap 5 pelat tanpa pembebanan sebesar 0,5834 cm. Interpretasi perilaku lendutan pelat akibat *swelling pressure* tanah memberikan gambaran perbedaan antara kondisi dengan pembebanan dibanding tanpa pembebanan sebagaimana terdapat pada Gambar 4 berikut ini,



Gambar 4. (a) Lendutan pelat 25 cm tanpa pembebanan dan
 (b) Lendutan pelat beton dengan pembebanan 300 kN

Perilaku lendutan pelat beton dibanding saat tanpa pembebanan menunjukkan kenaikan pada ujung pelat beton mengalami kena, sedangkan bagian tengah pelat mengalami penurunan. Perbedaan lendutan antar pelat tanpa pembebanan dibanding dengan pembebanan memiliki selisih perbedaan dimana lendutan pada ujung pelat beton saat diberikan variasi pembebanan bernilai lebih tinggi daripada saat tanpa pembebanan. Perbedaan nilai lendutan didapati setiap 100 kN pembebanan pada pelat ketebalan 35 cm sebesar 0,0079 cm.

Rekapitulasi hasil analisis dari 12 variasi pada pelat beton yang sudah disesuaikan dengan posisi lendutan awal berdasar ketebalan pelat dan rata-rata fase *swelling pressure* tanah ekspansif. *Swelling pressure* pengembangan tanah yang dirata-rata meliputi 5 fase pengembangan, 1 fase pengembangan maksimum, dan 3 fase penyusutan tanah dapat dilihat pada Tabel 2 hingga Tabel 5.

Tabel 2. Rekapitulasi lendutan pada pelat variasi ketebalan

<i>Swelling pressure</i>	Lendutan pada pelat (cm)			Sisi
	15 cm	25 cm	35 cm	
Pengembangan	0,5338	0,4879	0,4328	Ujung
	0,1231	0,1481	0,1608	Tengah
Pengembangan maksimum	0,5834	0,5834	0,5833	Ujung
	0,5834	0,5833	0,5833	Tengah
Penyusutan	0,0124	0,0252	0,0559	Ujung
	0,4973	0,4383	0,3894	Tengah

Tabel 2 menunjukkan Perilaku lendutan untuk variasi 1, 2, dan 3. Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa setiap penambahan ketebalan pelat 10 cm, pelat beton akan mengalami perubahan lendutan sebesar 10 %.

Tabel 3. Rekapitulasi lendutan pada pelat ketebalan 15 cm

<i>Swelling pressure</i>	Lendutan pada pelat 15 cm (cm)			Sisi
	100 kN	200 kN	300 kN	
Pengembangan	0,5379	0,5421	0,5462	Ujung
	0,0559	-0,0863	-0,1294	Tengah
Pengembangan maksimum	0,5875	0,5917	0,5958	Ujung
	0,5403	-0,0862	-0,1293	Tengah
Penyusutan	0,0013	0,0083	0,0124	Ujung
	0,4542	0,4090	0,3687	Tengah

Tabel 3 menunjukkan Perilaku lendutan untuk variasi 4, 5, dan 6 pada masing-masing *swelling pressure* tanah ekspansif menunjukkan bahwa setiap penambahan pembebanan garis 100 kN maka ujung pelat berturut-turut akan naik 0.82 ± 0.1 %; naik 0.73 ± 0.1 %; dan naik kisaran 32 %, sedangkan pada tengah pelat berturut-turut akan turun 105 ± 0.1 %; turun 7.54 ± 0.1 %; dan turun $9,10 \pm 1$ %.

Persamaan perilaku lendutan,

$$y_{i \text{ ujung}} = 4,1 \times 10^{-5} \times P + y_{0 \text{ ujung}}$$

$$y_{i \text{ tengah}} = -4,31 \times 10^{-5} \times P + y_{0 \text{ tengah}}$$

Tabel 4. Rekapitulasi lendutan pada pelat ketebalan 25 cm

<i>Swelling pressure</i>	Lendutan pada pelat 25 cm (cm)			Sisi
	100 kN	200 kN	300 kN	
Pengembangan	0,4959	0,5038	0,5118	Ujung
	0,0911	-0,0614	-0,0921	Tengah
Pengembangan maksimum	0,5913	0,5992	0,6072	Ujung
	0,5527	-0,0614	-0,0921	Tengah
Penyusutan	0,0046	0,0159	0,0238	Ujung
	0,4076	0,3769	0,3462	Tengah

Tabel 4 menunjukkan Perilaku lendutan untuk variasi 7, 8, dan 9 pada masing-masing *swelling pressure* tanah ekspansif menunjukkan bahwa setiap penambahan pembebanan garis 100 kN maka ujung pelat berturut-turut akan naik $1,85 \pm 0,1$ %; naik $1,41 \pm 0,1$ %; dan naik $26,91 \pm 1$ %, sedangkan tengah pelat berturut-turut akan turun 81.63 %; turun 5.44 ± 0.1 %; dan turun 7.65 ± 1 %.

Persamaan perilaku lendutan,

$$y_{i \text{ ujung}} = 7,9 \times 10^{-5} \times P + y_{0 \text{ ujung}}$$

$$y_{i \text{ tengah}} = -3,08 \times 10^{-5} \times P + y_{0 \text{ tengah}}$$

Tabel 5. Rekapitulasi lendutan pada pelat ketebalan 35 cm

Swelling pressure	Lendutan pada pelat 35 cm (cm)			Sisi
	100 kN	200 kN	300 kN	
Pengembangan	0,4376	0,4423	0,4471	Ujung
	0,1291	-0,0494	-0,0741	Tengah
Pengembangan maksimum	0,5881	0,5928	0,5976	Ujung
	0,5586	-0,0493	-0,0740	Tengah
Penyusutan	0,0536	0,0024	0,0072	Ujung
	0,3647	0,3400	0,3153	Tengah

Tabel 5 menunjukkan Perilaku lendutan untuk variasi 10, 11, dan 12 pada masing-masing *swelling pressure* tanah ekspansif menunjukkan bahwa setiap penambahan pembebanan garis 100 kN maka ujung pelat berturut-turut akan naik $1,34 \pm 0,1 \%$; naik $0,85 \pm 0,1 \%$; dan naik $17,01 \pm 1 \%$, sedangkan pada tengah pelat berturut-turut akan turun $35,40 \pm 1 \%$; turun $4,44 \%$; dan turun $7,21 \%$.

Persamaan perilaku lendutan

$$y_{i \text{ ujung}} = 4,8 \times 10^{-5} \times P + y_{0 \text{ ujung}}$$

$$y_{i \text{ tengah}} = -2,47 \times 10^{-5} \times P + y_{0 \text{ tengah}}$$

keterangan :

- y_i = lendutan setelah pembebanan (cm)
- P = nilai beban yang diberikan (kN)
- y_0 = lendutan sebelum pembebanan (cm)

SIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan mengenai pemodelan pelat beton menggunakan program *BoEF* dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut,

1. Perilaku pelat beton berdasarkan *swelling pressure* tanah dan variasi ketebalan pelat
 - a) Model simulasi *swelling pressure* terdiri atas pengembangan, pengembangan maksimum, dan penyusutan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin tebal pelat beton mengakibatkan semakin kecil lendutan yang terjadi pada pelat.
 - b) Perilaku lendutan untuk variasi ketebalan pelat 25 cm dan 35 cm pada fase pengembangan dan penyusutan tanah ekspansif menunjukkan bahwa setiap penambahan ketebalan pelat sebesar 10 cm, pelat beton akan mengalami perubahan sebesar $10 \pm 1 \%$ dari kondisi lendutan pelat beton ketebalan 15 cm.
2. Perilaku pelat beton berdasarkan *swelling pressure* tanah ekspansif, variasi pembebanan, dan ketebalan pelat
 - a) Perilaku lendutan untuk pelat ketebalan 15 cm pada fase pengembangan, pengembangan maksimum, dan penyusutan tanah ekspansif menunjukkan bahwa setiap penambahan pembebanan garis 100 kN maka ujung pelat berturut-turut akan naik $0,82 \pm 0,1 \%$, naik $0,73 \pm 0,1 \%$, dan naik kisaran 32 %. Sedangkan pada tengah pelat berturut-turut akan turun $105 \pm 0,1 \%$; turun $7,54 \pm 0,1 \%$, dan turun $9,10 \pm 1 \%$.
 - b) Perilaku lendutan untuk pelat ketebalan 25 cm pada fase pengembangan, pengembangan maksimum, dan penyusutan tanah ekspansif menunjukkan bahwa setiap penambahan pembebanan garis 100 kN maka ujung pelat berturut-turut akan naik $1,85 \pm 0,1 \%$, naik $1,41 \pm 0,1 \%$, dan naik $26,91 \pm 1 \%$. Sedangkan pada tengah pelat berturut-turut akan turun $81,63 \%$, turun $5,44 \pm 0,1 \%$, dan turun $7,65 \pm 1 \%$.
 - c) Perilaku lendutan untuk pelat ketebalan 35 cm pada fase pengembangan, pengembangan maksimum, dan penyusutan tanah ekspansif menunjukkan bahwa setiap penambahan pembebanan garis 100 kN

maka ujung pelat berturut-turut akan naik $1.34 \pm 0.1\%$, naik $0.85 \pm 0.1\%$, dan naik $17.01 \pm 1\%$. Sedangkan pada tengah pelat berturut-turut akan turun $35.40 \pm 1\%$, turun 4.44% , dan turun 7.21% .

REFERENSI

- Agustin D.R., Puri A., dan Ardiansyah R., 2017, "Perhitungan Lendutan Jalan Sistem Cakar Ayam Modifikasi dengan Variasi Faktor Aman pada Tambahan Modulus Reaksi Subgrade". *Jurnal Sainis*. Universitas Islam Riau. Vol.17 No.1.
- Firdiansyah, A., 2009, "Evaluasi Dimensi Sistem Cakar Ayam Akibat Pengaruh Variasi Letak Beban Dan Kondisi Tanah". Tesis. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Hardiyatmo, H. C., 2006, "Permasalahan dan Alternatif Penanganan Perkerasan Jalan pada Tanah Ekspansif", Seminar Konstruksi Jalan, Grobogan.
- Hardiyatmo, H. C., 2010, "Analisis dan Perancangan Fondasi II", Gajah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H. C., Suhendro, B., Hutagamissufardal, dan Susanto, H. A., 1999, "Perilaku Fondasi Cakar Ayam pada Model di Laboratorium Kontribusi untuk Perancangan", Gajah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hetenyi, M. 1974. "Beams on Elastic Foundation", The University of Michigan Press Ann Arbor. Michigan.
- Muhu, H.L.Y., 2007, "Kajian Lendutan pada Sistem Cakar Ayam Akibat Variasi Lebar Pelat (Model Sistem Cakar Ayam dari Pelat Baja)", Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gajah Mada : Yogyakarta.
- Pempadi, I., 2000, "Analisis Lendutan Pelat dengan Metode Beams on Elastic Foundation Aplikasi untuk Perancangan Fondasi Cakar Ayam dan Sumuran", Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada: Yogyakarta
- Puri, A., 2017, "Infrastruktur Jalan Beton Sistem Pelat Terpaku untuk Pembangunan Jalan Berkelanjutan pada Tanah Dasar Lunak dan Ekspansif", *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Perencanaan (KN-TSP)*, Universitas Islam Riau, Pekanbaru, 9 Februari 2017, pp. 1-17, Universitas Islam Riau, Pekanbaru.
- Setiawan, B., 2015, "Perilaku sistem Cakar Ayam Modifikasi pada Tanah Ekspansif", Disertasi. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- Tomanovich, A., 2003, "Beam on Elastic Foundation Analysis", <https://www.cesdb.com/boef.html>, accessed : 11 Juni 2021 pukul 14:31.