

SIMULASI PERILAKU PELAT BETON SEBAGAI PERKERASAN KAKU DI ATAS TANAH LUNAK DENGAN ANALISIS WESTERGAARD SOLUTION

Wanda Nugraha¹⁾, Bambang Setiawan²⁾, Noegroho Djarwanti³⁾

¹⁾Mahasiswa Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret,

^{2,3)} Pengajar Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret.

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126; Telp. 0271-634524. Email: wanda.mektan@gmail.com.

Abstract

Pavement construction on soft soil requires accuracy in selected pavement thickness and quality of the materials used, particularly by observing its stress and deflection. Westergaard Solution provides stress and deflection analysis at the interior, corner, and edge loading. Slab model has dimension of 6x3 m, while the thickness varied from 15, 25, and 35 cm and f_c used in this experiments are assumed to be 20, 25 and 30 MPa. Last but not the least, the soil samples are taken from Saradan, Caruban, and Soko quarry. The results show that deflection value are reduced significantly due to the changing of k_v value, ranging from 61%-65% and 41%-43% during the increasing of f_c of the concrete slab, the settlement reduced about 1,5%-3%, while the stress increased about 5%-7%. The adding of slab thickness causing the decreasing of deflection that is ranged between 36%-64% for edge loading circular loading, 49%-69% for edge loading semicircular loading and 50%-70% for interior loading and 7%-70% for corner loading, meanwhile for stress which occurred as much as 40%-68% for edge loading of circular loading, 42%-64% for edge loading semicircular loading and for interior loading 48%-74% and for corner loading is known to increase as much as 50%-150%.

Keywords: westergaard solution, deflection, stress

Abstrak

Konstruksi perkerasan jalan diatas tanah lunak membutuhkan ketepatan dalam memilih tebal perkerasan dan mutu bahan yang digunakan, utamanya dianalisis terhadap nilai tegangan dan lendutannya. Rumusan Westergaard Solution memberikan nilai tegangan dan lendutan pada pembebanan tengah, ujung, dan tepi pelat. Model pelat berukuran 6x3 m dengan ketebalan 15, 25, dan 35 cm. Mutu beton yang digunakan adalah f_c 20, 25 dan 30 MPa, kemudian sampel lempung lunak berasal dari Saradan, Caruban, dan Soko. Penurunan nilai lendutan dan tegangan akibat perubahan nilai k_v berturut-turut antara 61%-65%, dan 41%-43%, penambahan mutu pelat terhadap penurunan nilai lendutan berkisar 1,5%-3% dan peningkatan nilai tegangan yaitu berkisar 5%-7%. Penambahan ketebalan pelat menyebabkan penurunan nilai lendutan berkisar 36% - 64% untuk pembebanan penuh pada tepi, 49% - 69% untuk pembebanan sebagian pada tepi dan 50%-70% untuk pembebanan pusat, serta 7%-70% untuk pembebanan ujung, sedangkan untuk nilai tegangan yang terjadi yaitu sebesar 40%-68% untuk pembebanan penuh pada tepi, 42%-64% pada pembebanan sebagian pada tepi, dan untuk pembebanan pusat 48% - 74%, untuk pembebanan ujung peningkatan sebesar 50%-150%.

Kata kunci: westergaard solution, lendutan, tegangan

PENDAHULUAN

Kebutuhan terhadap jalan raya untuk pemerataan dan distribusi pembangunan ke setiap daerah membuat konstruksi perkerasan jalan diatas tanah lunak yang memiliki daya dukung rendah tidak dapat dihindarkan lagi. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variasi penelitian berupa nilai modulus reaksi *subgrade* (k_v), tebal pelat, dan mutu pelat untuk menghasilkan nilai tegangan dan lendutan. Desain perkerasan jalan di Indonesia umumnya menggunakan perkerasan dengan ketebalan 15, 25, dan 35 cm yang pemilihannya disesuaikan pada tipe kelas jalan yang akan dibangun, sehingga penelitian ini mengacu pada kebiasaan pemilihan ketebalan di Indonesia. Mutu bahan yang digunakan adalah f_c 20, 25, dan 30 MPa, hal ini juga didasari pada kebiasaan umum di lapangan karena jika menggunakan f_c diatas 30 MPa sangat sulit dalam mendapatkan mutu tersebut terkait dengan waktu setting dan biaya pelaksanaan pengecoran. Penelitian ini menganalisis pelat beton di atas tanah yang diwakili oleh nilai modulus reaksi *subgrade* (k_v) menggunakan *Westergaard Solution* dengan hasil berupa nilai lendutan dan tegangan pada pembebanan di ujung, tengah dan tepi pada perkerasan kaku.

LANDASAN TEORI

Perkerasan Kaku

Perkerasan kaku adalah perkerasan yang menggunakan beton semen sebagai bahan utama. Perkerasan kaku dapat dikelompokkan kedalam:

- a. Perkerasan beton semen yaitu perkerasan kaku dengan beton sebagai lapisan aus, terdapat 4 jenis perkerasan beton semen yaitu :
 - Perkerasan beton semen bersambung tanpa tulangan,
 - Perkerasan beton semen bersambung dengan tulangan,
 - Perkerasan beton semen menerus dengan tulangan,

- Perkerasan beton semen prategang.
- b. Perkerasan komposit yaitu perkerasan kaku dengan pelat beton semen sebagai lapisan pondasi dan aspal beton sebagai lapis permukaan.

Tanah Lunak

Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang mempunyai kuat geser rendah dan kompresibilitas tinggi yang dapat menimbulkan penurunan dan ketidakstabilan konstruksi akibat sifat-sifat yang ada pada tanah tersebut. Jenis tanah ini banyak dijumpai di Indonesia meliputi lempung (organik dan anorganik) dan gambut. Ciri-ciri dari tanah lunak menurut Sasanti (2008) antara lain mempunyai kadar air yang tinggi ($\geq 40\%$), indeks plastisitas sedang-tinggi, ($>20\%$), dan nilai $S_u < 25$ kPa. Indikator-indikator tentang tanah lunak yang lain dijelaskan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Indikator kuat geser tak terdrainase lempung lunak (Litbang, 2001)

No	Konsistensi	Indikasi Lapangan
1	Lunak	Bisa dibentuk dengan mudah dengan jari tangan
2	Sangat Lunak	Keluar diantara jari tangan jika diremas dalam kepalan tangan

Tabel 2. Kuat geser lempung lunak (Litbang, 2001)

No	Konsistensi	Kuat Geser kN/m ²
1	Lunak	12,5 – 25
2	Sangat Lunak	< 12,5

Koefisien Reaksi *Subgrade* Arah Vertikal (k_v)

Koefisien *subgrade* tanah atau lebih dikenal dengan *modulus of subgrade reaction* adalah nilai perbandingan tekanan tanah dengan penurunan yang terjadi, yang ditentukan dari uji beban pelat (*plate load test*). Rumus dasar perhitungan k_v untuk pelat kaku (Hardiyatmo, dkk, 2000) dinyatakan dalam Persamaan (1)

$$k_v = \frac{p}{\delta} \dots\dots\dots [1]$$

keterangan :

- k_v = nilai modulus reaksi *subgrade* tanah (kN/m².m⁻¹),
- p = tekanan (kN/m²),
- δ = lendutan pelat (m).

Westergaard Solution

Westergaard menganalisis tegangan dan pola lendutan pada tiga pembebanan utama pada slab perkerasan yaitu pada pembebanan tepi (*edge loading*), pembebanan pusat (*interior loading*) dan pembebanan ujung (*corner loading*). Rumusan untuk tiap pembebanan dinyatakan dalam Persamaan [2] sampai dengan [9].

$$\delta_{circular\ loading} = \frac{0,431 P}{kl^2} \left[1 - 0,82 \left(\frac{a}{l} \right) \right] \dots\dots\dots [2]$$

$$\sigma_{circular\ loading} = \frac{0,803 P}{h^2} \left[4 \ln \left(\frac{l}{a} \right) + 0,666 \left(\frac{a}{l} \right) - 0,034 \right] \dots\dots\dots [3]$$

$$\delta_{semi-circular\ loading} = \frac{0,431 P}{kl^2} \left[1 - 0,349 \left(\frac{a}{l} \right) \right] \dots\dots\dots [4]$$

$$\sigma_{semi-circular\ loading} = \frac{0,803 P}{h^2} \left[4 \ln \left(\frac{l}{a} \right) + 0,282 \left(\frac{a}{l} \right) + 0,650 \right] \dots\dots [5]$$

$$\delta_{Interior\ loading} = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{a}{2l} \right) - 0,673 \right] \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots [6]$$

$$\sigma_{Interior\ loading} = \frac{3(1+\mu)P}{2\pi h^2} \left(\ln \frac{l}{b} + 0,6159 \right) \dots\dots\dots [7]$$

$$\delta_{corner\ loading} = \frac{P}{kl^2} \left[1,1 - 0,88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right) \right] \dots\dots\dots [8]$$

$$\sigma_{corner\ loading} = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0,6} \right] \dots\dots\dots [9]$$

Nilai l merupakan karakteristik penting yang mengkuantifikasi kekakuan relatif slab dengan tanah dasar yaitu jari-jari kekakuan relatif, dinyatakan oleh hubungan sebagai berikut :

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)kv}} \dots\dots\dots [10]$$

keterangan :

- P = Total beban yang diterima,
- E = Modulus elastisitas slab beton,
- μ = Angka poisson's slab,
- h = Ketebalan slab beton,
- k = Modulus reaksi *subgrade*,
- a = Jari-jari beban roda,
- c = Panjang sisi untuk beban merata,
- b = $(1,6a^2 + h^2)^{0,5} - 0,675 h$ jika $a < 1,724 h$,
- b = a jika $a > 1,724 h$,
- c' = $(e^{\pi/4-1} / 2^{0,5})$,
- e = Angka Euler (0,57721566490).

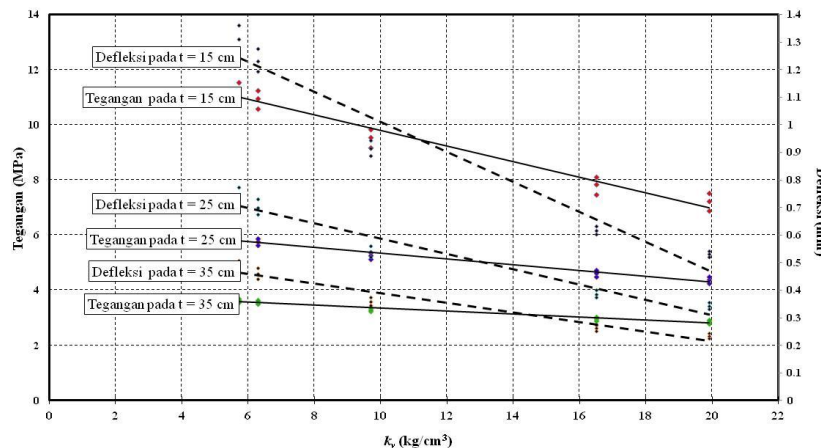
METODE PENELITIAN

Jenis penelitian ini adalah analisis numeris dengan melakukan analisis matematis menggunakan data dan rumusan. *Westergaard Solution* untuk mendapatkan nilai defleksi dan tegangan pada tiga titik pembebanan utama yaitu *Edge Loading*, *Corner Loading*, dan *Interior Loading*. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer hasil uji pendahuluan di Laboratorium Mekanika Tanah UNS berupa nilai *CBR (California Bearing Ratio)*, indeks properties, parameter geser, dan koefisien konsolidasi. Data sekunder berupa *properties* bahan (dalam hal ini beton), ketebalan pelat, pembebanan dari kendaraan, dan design beban jalan raya.

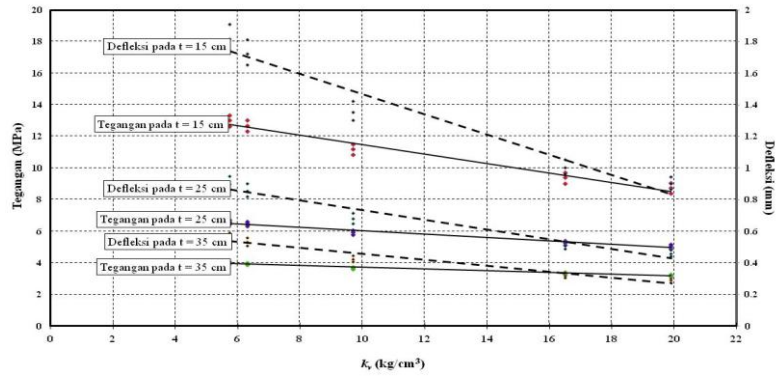
Tahapan penelitian ini yaitu dengan melakukan sampling tanah lunak untuk kemudian dilakukan uji parameter tanah yang digunakan untuk mengidentifikasi tanah, klasifikasi menggunakan tabel Chen (1975), Bjerrum (1972) dan Litbang (2001), kemudian dilakukan analisis pendahuluan dengan menghitung nilai k_r , radius kontak beban dan jari-jari tekanan ban, setelah itu melakukan inisialisasi variasi penelitian berupa nilai k_r , tebal pelat, dan mutu bahan, selanjutnya menganalisis semua parameter dengan *Westergaard Solution* sehingga didapatkan nilai tegangan dan lendutan pada tiap titik pembebanan. Pada bagian akhir dilakukan studi komparasi untuk mengetahui perilaku tegangan dan lendutan pada setiap pembebanan terhadap variasi penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

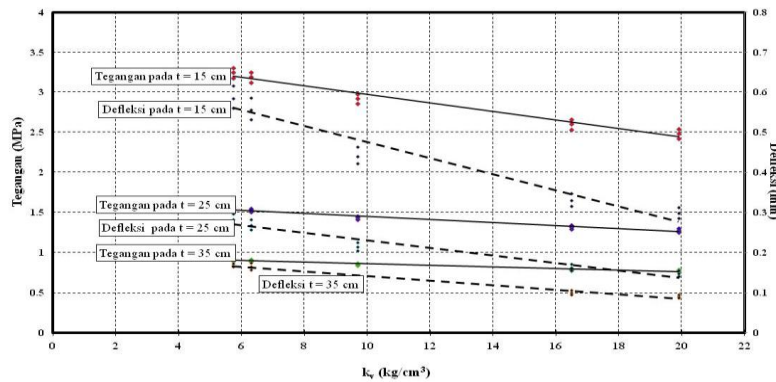
Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini berupa grafik hubungan nilai k_r terhadap tegangan dan defleksi untuk 3 lokasi penelitian pada variasi mutu bahan (f_c 20, 25, dan 30 MPa) dan tebal pelat (15, 25, dan 35 cm).



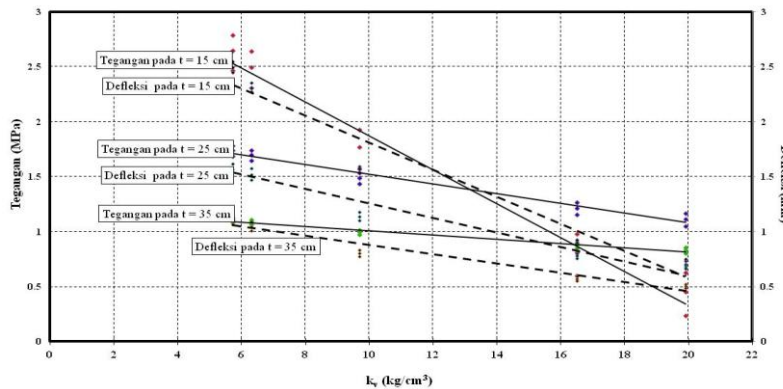
Gambar 1. Hubungan nilai k_r terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 1 Saradan, Nganjuk akibat beban penuh di tepi dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*edge loading circular loading*).



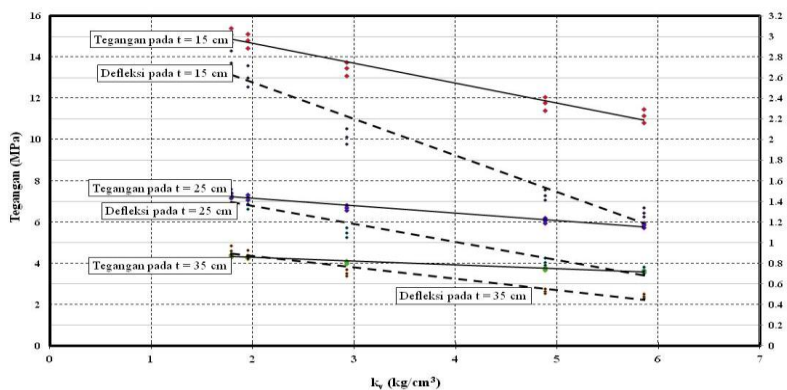
Gambar 2. Hubungan nilai k_p terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 1 Saradan, Nganjuk akibat beban sebagian di tepi dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*edge loading semi-circular loading*).



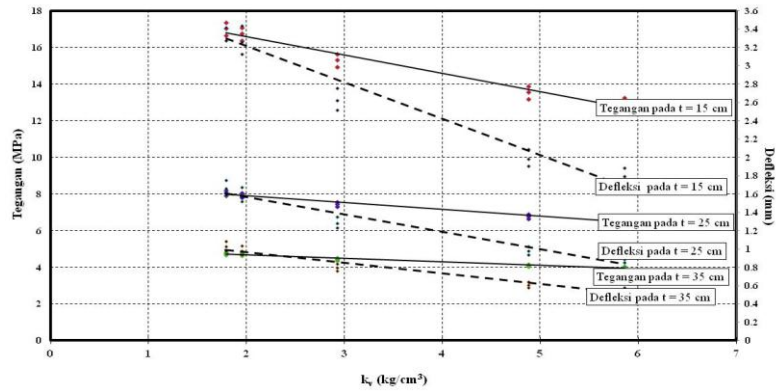
Gambar 3. Hubungan nilai k_p terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 1 Saradan, Nganjuk akibat beban di pusat dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*interior loading*).



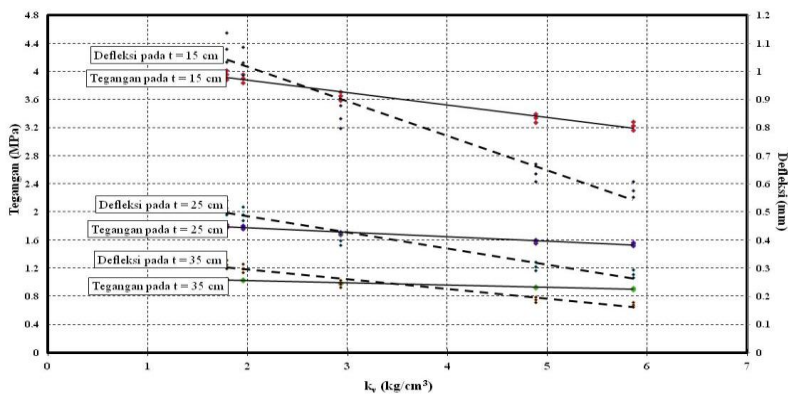
Gambar 4. Hubungan nilai k_p terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 1 Saradan, Nganjuk akibat beban di ujung pelat dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*corner loading*).



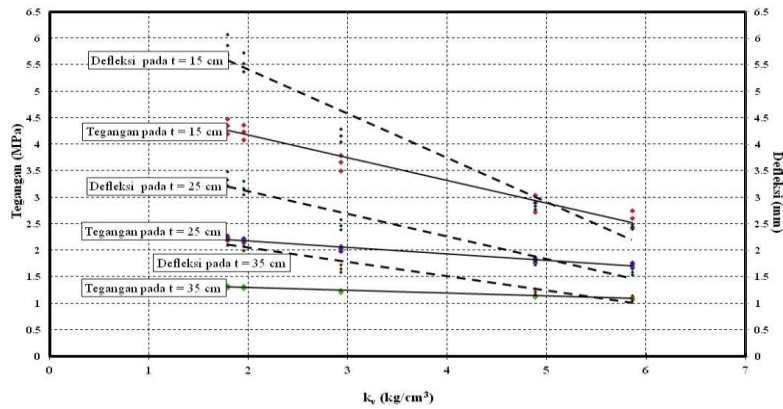
Gambar 5. Hubungan nilai k_v terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 2 Caruban, Ngawi akibat beban penuh di tepi dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*edge loading circular loading*).



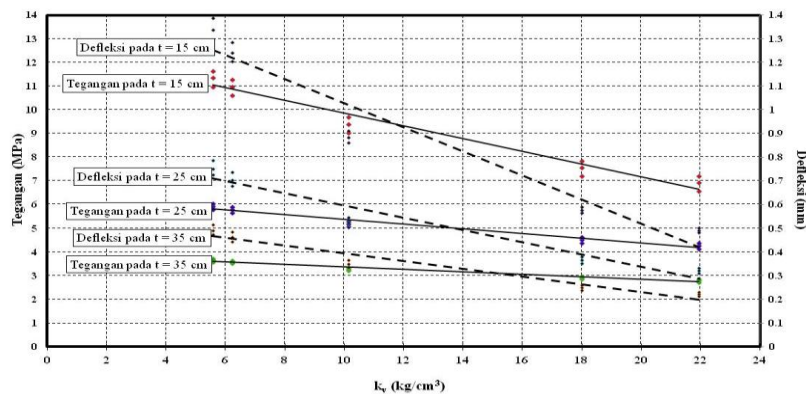
Gambar 6. Hubungan nilai k_v terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 2 Caruban, Ngawi akibat beban sebagian di tepi dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*edge loading semi-circular loading*).



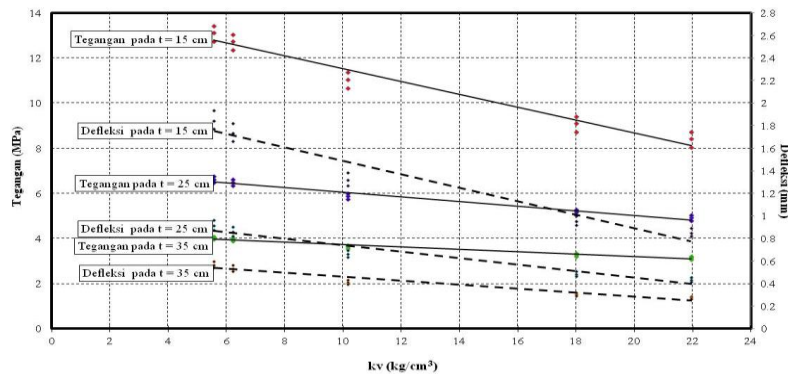
Gambar 7. Hubungan nilai k_v terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 2 Caruban, Ngawi akibat beban di pusat dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*interior loading*).



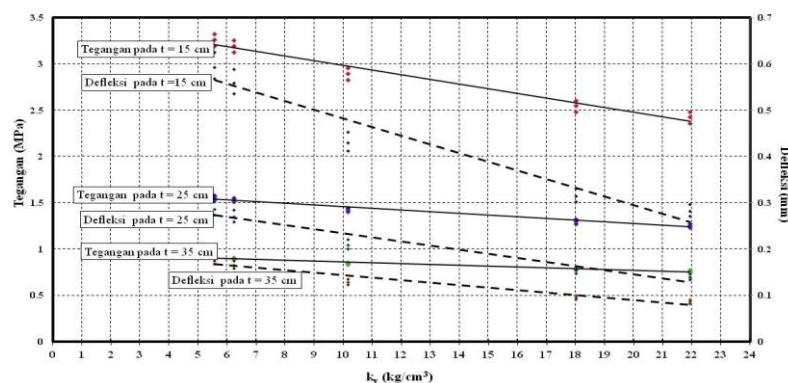
Gambar 8. Hubungan nilai k_v terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 2 Caruban, Ngawi akibat beban di ujung pelat dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*corner loading*).



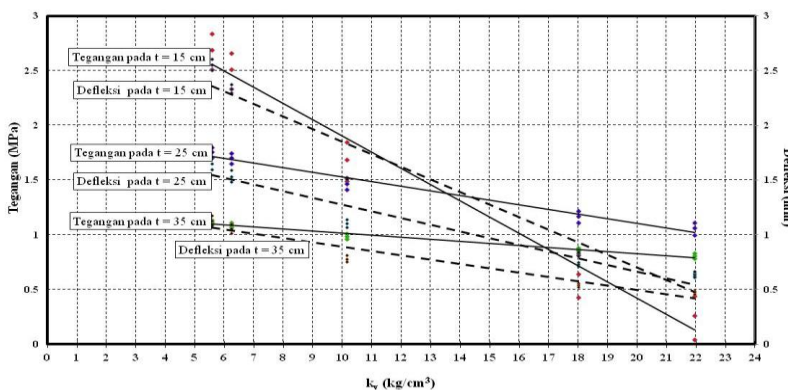
Gambar 9. Hubungan nilai k_v terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 3 Soko, Ngawi akibat beban penuh di tepi dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*edge loading circular loading*).



Gambar 10. Hubungan nilai k_v terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 3 Soko, Ngawi akibat beban sebagian di tepi dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*edge loading semi-circular loading*).



Gambar 11. Hubungan nilai k_v terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 3 Soko, Ngawi akibat beban di pusat dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*interior loading*).



Gambar 12. Hubungan nilai k_v terhadap nilai tegangan dan lendutan pada Quarry 3 Soko, Ngawi akibat beban di ujung pelat dan tebal pelat 15, 25, dan 35 cm (*corner loading*).

Pembahasan

Pengaruh Lokasi Pembebanan

Lokasi pembebanan memberikan pengaruh yang sangat besar, diantara keempat tipe pembebanan secara keseluruhan pembebanan pada pusat pelat memberikan nilai defleksi yang terkecil sedangkan untuk defleksi terbesar berada pada pembebanan ujung (*corner loading*), selanjutnya untuk tegangan terkecil berada pada pembebanan pusat (*interior loading*) dan untuk tegangan terbesar berada pada pembebanan sebagian pada tepi pelat beton.

Pengaruh Ketebalan dan Mutu Pelat

Hasil dari perhitungan menunjukkan bahwa pengaruh ketebalan pelat mampu mengurangi lendutan pelat, semakin tebal pelat maka kekakuan akan semakin tinggi sehingga lendutan mengecil, namun perlu diperhatikan pada pembebanan ujung (*corner loading*) untuk pelat 15 cm didapatkan nilai lendutan yang lebih besar dibandingkan pelat 25 dan 35 cm yaitu pada saat nilai koefisien *subgrade* terbesar. Nilai penurunan lendutan yang terjadi berkisar antara 36% - 64% pembebanan penuh pada tepi, untuk pembebanan sebagian pada tepi sebesar 49% - 69% dan untuk pembebanan pusat 50% - 70% serta untuk pembebanan ujung didapatkan penurunan sebesar 7% - 70% yang semuanya bergantung pada koefisien *subgrade* arah vertikal. Berdasarkan grafik hasil perhitungan tegangan dapat disimpulkan bahwa ketebalan mempengaruhi penurunan dari nilai tegangan yaitu sebesar 40% - 68% untuk pembebanan penuh pada tepi, kemudian untuk pembebanan sebagian pada tepi sebesar 42% - 64% dan untuk pembebanan pusat 48% - 74% serta untuk pembebanan ujung didapatkan peningkatan sebesar 50% - 150% pada range ketebalan 15 - 25 cm, namun apabila ketebalan 15 cm diabaikan ada penurunan tegangan sekitar 24% - 32%, sedangkan dari mutu pelat yang digunakan yaitu $f'c$ 20 MPa, 25 MPa, dan 30 MPa hanya memberikan pengaruh penurunan lendutan yang sedikit yaitu hanya berkisar 1,5% - 3%, dan peningkatan nilai tegangan yaitu berkisar 5% - 7%.

Pengaruh Koefisien *Subgrade* Tanah (k_v)

Hasil penelitian menjelaskan bahwa apabila perkerasan digunakan tanah lunak (memiliki nilai k_v yang kecil) maka defleksi yang dihasilkan semakin besar, begitupun sebaliknya, hal ini dikarenakan kondisi tanah yang lunak akan memberikan daya dukung yang lebih kecil dibandingkan tanah keras. Analisis *Westergaard Solution* memberikan hasil bahwa penurunan nilai lendutan akibat perubahan nilai koefisien *subgrade* tanah rata-rata berkisar antara 61% - 65 %, sedangkan untuk tegangan penurunan rata-rata berkisar 41% - 43%.

Analisis Tegangan Pada *Corner Loading*

Nilai pembebanan untuk *edge loading* dan *interior loading* memiliki kecenderungan yang sama yaitu grafik bergerak linear dan tidak ada perpotongan antara tiap variasinya, namun pembebanan ujung (*corner loading*) memberikan hasil yang berbeda dikarenakan pembebanan ujung berada pada daerah luar tegangan bidang (kern) sehingga ada kecenderungan pada ketebalan 15 cm tegangannya memotong ketebalan 25 cm dan 35 cm. Kenaikan nilai k_v mereduksi seluruh nilai parameter *output*, kecuali parameter tegangan tanah. Penambahan ketebalan pada ujung pelat menyebabkan penurunan nilai tegangan secara signifikan.

SIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Analisis *Westergaard Solution* dapat digunakan sebagai alternatif dalam perancangan struktur perkerasan kaku utamanya ditinjau pada nilai tegangan dan lendutannya.
2. Kenaikan nilai k_v memberikan reduksi pada seluruh nilai *output* tegangan dan lendutan pada tanah dasar. Analisis *Westergaard Solution* memberikan hasil bahwa penurunan nilai lendutan akibat perubahan nilai koefisien *subgrade* tanah rata-rata berkisar antara 61% - 65 %, sedangkan untuk tegangan penurunan rata-rata berkisar 41% - 43%.
3. Penambahan ketebalan pelat beton mampu mereduksi nilai tegangan tanah dasar sebesar 24 % - 74 %, dan mereduksi lendutan sebesar 7% - 70 %.
4. Pengaruh akibat penambahan mutu pelat terhadap penurunan defleksi berkisar 1,5% - 3% dan peningkatan nilai tegangan yaitu berkisar 5% - 7%.
5. Analisis numeris menggunakan pembebanan 10 kN disimpulkan bahwa pembebanan pada pusat pelat memberikan nilai defleksi yang terkecil sedangkan untuk defleksi terbesar berada pada pembebanan ujung (*corner loading*), selanjutnya untuk tegangan terkecil berada pada pembebanan pusat (*interior loading*) dan untuk tegangan terbesar berada pada pembebanan sebagian pada tepi pelat beton.

REKOMENDASI

1. Hasil penelitian ini perlu diverifikasi dengan pengujian *prototype* yang berukuran sesuai dengan modelnya
2. Perlu untuk dilakukan analisis mengenai kondisi tanah *subgrade* sesuai dengan kondisi lapangan.
3. Dapat dibuat suatu program yang dapat membantu permodelan dan membaca *output* data secara otomatis dan lebih ringkas.

4. Perlu dilakukan analisis menggunakan software Plaxis atau SAP2000 untuk memverifikasi data dan hasil percobaan, sehingga parameter daya dukung juga turut diperhitungkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan nikmatnya. Yang kedua kepada segenap pimpinan dan dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UNS, selanjutnya kepada Bambang Setiawan, S.T., M.T. dan Ir. Noegroho Djarwanti. MT selaku dosen pembimbing, serta rekan – rekan sipil 2009 UNS dan juga segenap dosen dan civitas akademika Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil.

REFERENSI

- Abbas, A., 2002, *Analysis and Design of Industrial Ground-Floor Slabs using the Finite Element Method*, PhD thesis, Department of Civil & Environmental Engineering, Imperial college of Science, Technology and Medicine, London.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (1978), *Standard Specifications for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing*, 12th Ed. Washington D.C. Part 1, 998 pp.
- Bjerrum, L., 1972, *Embankment on Soft Ground*, Proc. Spec. Conf. Performance of Earth and Earth Supported Structure, Lafayette, Ind. Pp. 1-54.
- Chen, F. H., 1975, *Foundations on Expansive Soils, Developments in Geotechnical Engineering 12*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Dardak, A., 2008, Perencanaan Perkerasan Jalan, Media Indonesia Edisi 24 Desember 2008, Jakarta
- Hardiyatmo, H. C., dkk, 2000, “Perancangan Sistem Cakar Ayam Modifikasi untuk Perkerasan Jalan Raya”, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- IRC: 58:2002. (2002). “Guidelines for the Design of Rigid Pavements for Highways”. Indian Roads Congress, New Delhi.
- Jundhare, D. R., et al. (2010). “Study of Edge Stresses and Deflections in Whitetopping Overlay on Winkler Foundation”. Indian Geotechnical Conference – 2010, GEOTrendz, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay.
- Knapton, J. (2005) “Design of Ground Bearing Concrete Slabs”, The fifth African Concrete Code Symposium, Tripoli, Libya. Libyan Arab Jamahiriyah: Scientific Societies of Engineers, pp. 156-188.
- Litbang PU, 2001, Departemen Pekerjaan Umum. Pedoman Stabilisasi Dangkal Tanah Lunak untuk Konstruksi Timbunan Jalan (Pd T-11-2005-B).
- Loannides, A. M., et al. (1985). “Westergaard Solutions Reconsidered.” Transportation Research Record, 1043 Transportation Research Board.
- Mardiyanto. B., 2010, *Studi Perilaku Pelat Beton di Atas Tanah Dengan Metode Elemen Hingga (SAP 2000 v.11.0.0) Ditinjau Pada Variasi Modulus Reaksi Subgrade (k_s) dan Mutu Pelat Beton*, Tugas Akhir S1 Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, UNS Surakarta.
- Nawangalam, P., 2008, *Pemodelan Elemen Hingga Sistem Cakar Ayam dengan Metode Analisis Tanah Dasar Non-Linier* Tesis S-2 Program Pasca Sarjana, UGM, Yogyakarta.
- Oglesby, C.H., and Hick, R.G., 1996 *Teknik Jalan Raya*, Erlangga, Jakarta.
- Sasanti, N.M. 2008. *Pengetahuan Engineering untuk Kontraktor. Materi Pelatihan Angkatan XII*. Jakarta : PT. Pembangunan Perumahan.
- Setiawan, B., 2012, *Permasalahan Lempung Ekspansif*, Tugas, Program Studi Pasca Sarjana, Jurusan Ilmu Teknik, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Westergaard, H. (1926) 'Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis', Public Roads, 7(2), pp. 25-35.