

# METHOD OF CALCULATIONS FOR THE DEFLECTIONS, MOMENTS AND SHEARS ON CAKAR AYAM SYSTEM TO DESIGN CONCRETE ROAD PAVEMENTS

## METODE HITUNGAN LENDUTAN, MOMEN DAN GAYA LINTANG SISTEM CAKAR AYAM UNTUK PERANCANGAN PERKERASAN JALAN BETON

Hary Christady Hardiyatmo

Staf pengajar Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik  
Universitas Gadjah Mada Yogyakarta. Jl. Grafika no.2 Yogyakarta.  
e-mail: harychristady@yahoo.com

### ABSTRACT

For road pavements, a Modified Cakar Ayam System that consists of thin concrete slab supported by rows of short pipes is appropriate to be constructed on difficult subgrade, such as soft soil and expansive soil. Until now, several design methods have been proposed, using modified beam elastic foundation method and finite element method. This paper presents results of analysis on a section of Modified Cakar Ayam System consisted of three rows of "cakar" with the dimension of slab 7,5 m x 2,5 m. Analysis were done by using finite element method (SAP 2000). The deflections, moments and shears produced by 1 tons (10 kN) point load acting on center and edge of the slab of Cakar Ayam System were calculated and are presented in the form of graphs and tables.

**Key words:** Modified Cakar Ayam System, deflections, moments, shears.

### ABSTRAK

Dalam aplikasi untuk perkerasan jalan, Sistem Cakar Ayam Modifikasi terdiri dari pelat beton yang didukung oleh pipa-pipa pendek cocok digunakan untuk tanah-dasar yang buruk, seperti tanah lunak dan tanah ekspansif. Sampai saat ini, beberapa metoda hitungan perancangan telah diusulkan, yaitu dengan menggunakan metoda balok pada fondasi elastis dan metoda elemen hingga. Makalah ini menyajikan hasil-hasil analisis pada potongan melintang Sistem Cakar Ayam Modifikasi yang terdiri dari satu deret "cakar" dengan dimensi pelat 7,5 m x 2,5 m. Analisis dilakukan dengan menggunakan metoda elemen hingga (SAP 2000). Defleksi, momen dan gaya lintang oleh akibat beban titik 1 ton (10 kN) yang bekerja di pusat dan pinggir pelat Sistem Cakar Ayam dihitung dan hasilnya disajikan dalam bentuk tabel-tabel dan grafik-grafik.

**Kata-kata kunci:** Sistem Cakar Ayam Modifikasi, defleksi, momen, gaya lintang.

### PENDAHULUAN

Pembangunan jalan yang terletak di atas tanah bermasalah, seperti tanah-dasar sangat lunak dan tanah-dasar ekspansif masih menjadi masalah yang serius pada saat ini. Di Indonesia, untuk tanah-dasar lunak atau ekspansif ini, Sistem Cakar Ayam cocok digunakan (Hardiyatmo, 2008).

Sistem Cakar Ayam yang terdiri dari pelat beton tebal 12 – 20 cm dan cakar-cakar (pipa-pipa) berdiameter 0,8 – 1,2 m, panjang 1,2 – 2 m yang berfungsi sebagai "paku" menjaga pelat agar selalu dalam kontak dengan tanah. Sistem Cakar Ayam sebagai perkerasan kaku, kecuali sangat cocok menahan beban kendaraan berat, juga menjamin biaya pemeliharaan yang sangat kecil. Pada saat ini, untuk perkerasan kaku, cakar yang pada waktu dulu dibuat dari pipa-pipa beton diganti dengan bahan dari pelat baja tebal 1,4 mm yang berukuran lebih kecil, yaitu berdiameter 0,8 m dan panjang 1,2 m. Sistem Cakar Ayam ini disebut Sistem Cakar Ayam Modifikasi.

Dalam perancangan Sistem Cakar Ayam sebagai perkerasan kaku (*rigid pavement*), maka diperlukan nilai-nilai lendutan, momen dan gaya lintang yang dapat dilakukan secara analitis dengan aplikasi metoda balok pada fondasi elastis (Hardiyatmo et al, 2000) atau dengan analisis elemen hingga (Suhendro, 2006).

Dalam aplikasi untuk perkerasan kaku, Sistem Cakar Ayam akan berbentuk pelat memanjang dengan lebar yang bergantung pada lebar jalan yang dikehendaki. Dalam perancangan awal, cukup aman jika hitungan didasarkan pada satu luasan pelat yang terdiri dari satu deret pipa-pipa cakar ke arah melintang. Hasil-hasil hitungan yang disajikan dalam bentuk tabel-tabel dan grafik-grafik, diharapkan dapat mempermudah cara perancangan.

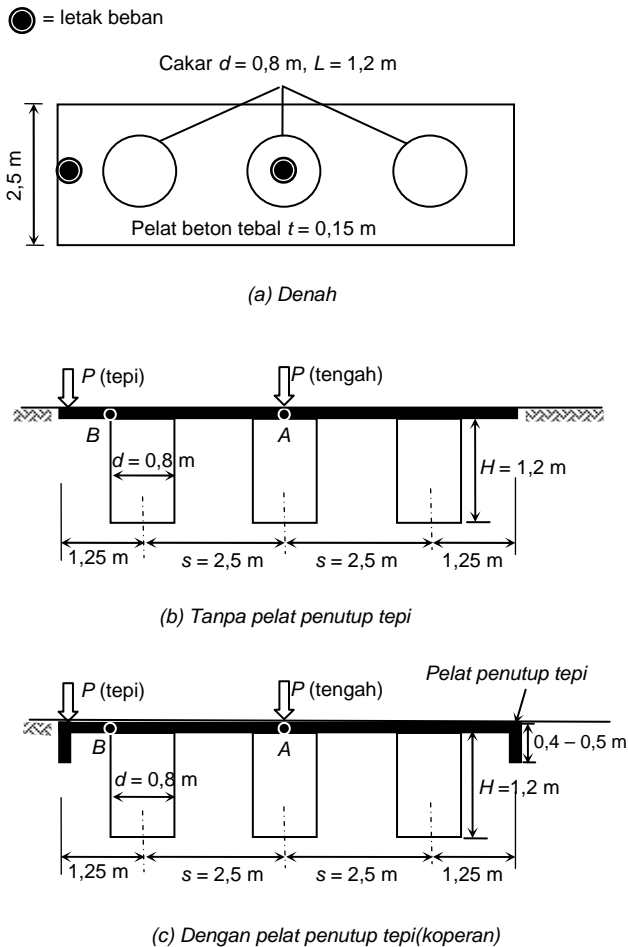
### STUDI PUSTAKA

Beberapa cara hitungan hitungan perancangan Sistem Cakar Ayam telah diusulkan. Suhendro (1992) dari hasil pemodelan elemen hingga secara 3 dimensi mengusulkan grafik untuk menghitung lendutan dan momen yang terjadi pada pelat Sistem Cakar Ayam dengan cakar (pipa beton) berdiameter  $d = 1,2$  m panjang  $L = 2,5$  m, dengan kondisi tanah yang diwakili oleh nilai modulus *subgrade* vertikal ( $k_v$ ) atau CBR yang divariasikan. Hardiyatmo (2000) mengusulkan cara hitungan lendutan, momen dan gaya lintang pada pelat sistem Cakar Ayam dengan mengaplikasikan metoda balok pada fondasi elastis (*beam on elastic foundation*) (Hetenyi, 1974), yaitu dengan menambahkan gaya perlawanan momen akibat reaksi cakar ketika pelat mengalami lendutan. Nawangalam (2008) menganalisis Sistem Cakar Ayam dengan menggunakan metoda elemen hingga (SAP 2000) secara 3 dimensi terhadap hasil uji model skala penuh di Waru Surabaya dan Bandara Polonia Medan. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa untuk beban-beban rendah 20 ton (200 kN), pemodelan elemen hingga secara linier sudah cukup memuaskan, sedangkan untuk beban tinggi seperti beban roda pesawat, maka diperlukan analisis non linier.

Romadhoni (2008) juga melakukan pemodelan elemen hingga (SAP 2000) Sistem Cakar Ayam secara 3 dimensi. Hasil pemodelan ini menyimpulkan bahwa pembebanan paling kritis Sistem Cakar Ayam adalah bila beban terletak di tepi, karena menghasilkan lendutan dan momen yang terbesar.

Dari analisis dengan menggunakan model elemen hingga, dengan menggunakan SAP 2000 untuk Sistem Cakar Ayam yang terdiri dari satu deret cakar-cakar ayam (berjumlah 3 cakar), Firdiansyah (2009), membuat grafik-grafik hasil hitungan lendutan, momen dan gaya lintang untuk beban roda 50 kN. Hitungan

didasarkan pada Sistem Cakar Ayam dengan pelat beton ukuran 7,5 m x 2,5 m, dengan satu deret pipa cakar berjumlah 3 buah berdiameter 0,8 m, panjang 1,2 m dan berjarak 2,5 m (Gambar 1). Hasil-hasil hitungan lendutan, momen dan gaya lintang untuk Sistem Cakar Ayam tanpa pelat penutup tepi (koperan), ditunjukkan dalam Gambar 2 dan Gambar 3 untuk modulus reaksi tanah-dasar vertikal  $k_v = 0,5 \text{ kg/cm}^3$  dan  $8 \text{ kg/cm}^3$ , dan beban yang terletak di tepi dan di tengah (Gambar 1). Pelat penutup tepi berfungsi untuk perkuatan pinggir, karena bagian ini merupakan bagian terlemah bila Sistem Cakar Ayam mengalami pembebanan.



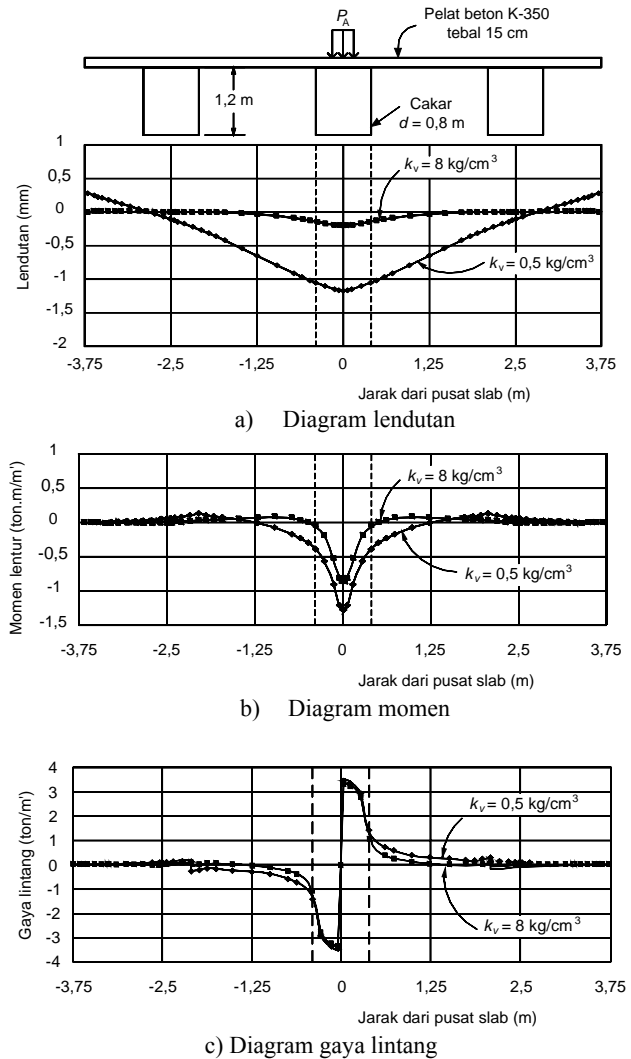
Gambar 1. Denah dan potongan melintang untuk hitungan lendutan, momen dan gaya lintang.

### HITUNGAN LENDUTAN, MOMEN DAN GAYA LINTANG

Untuk perancangan Sistem Cakar Ayam, maka diperlukan nilai-nilai lendutan, momen dan gaya lintang maksimum pada beban tertentu. Dari hasil hitungan-hitungan yang telah dilakukan, sebatas beban titik yang bekerja tidak sangat besar (misalnya 20 ton), maka pelat Sistem Cakar Ayam masih berperilaku elastis. Dengan pertimbangan ini, maka lebih menguntungkan bila hitungan didasarkan beban 1 ton. Untuk beban-beban yang lebih besar, tapi nilainya masih kurang dari 20 ton, maka nilai-nilai lendutan, momen dan gaya lintang dapat dihitung secara proporsional.

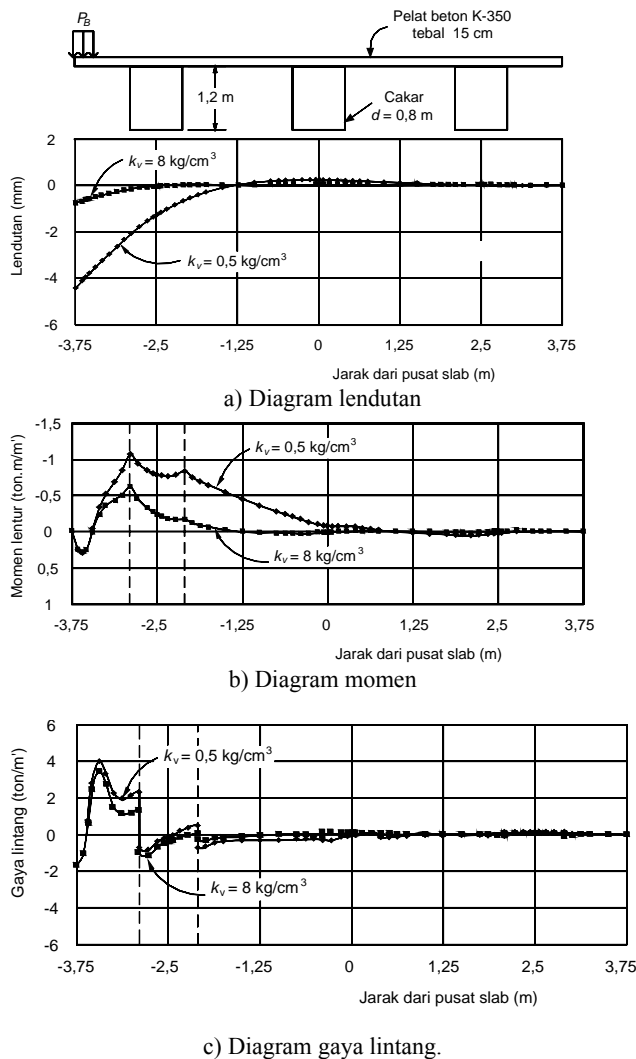
Dari mengembangkan cara analisis yang dilakukan oleh Firdiansyah (2009) pada Sistem Cakar Ayam Modifikasi (Gambar 2 dan Gambar 3) dan dengan memasukkan input data dalam

Tabel 1 ke dalam software SAP 2000, maka dapat dibuat grafik-grafik hubungan modulus reaksi *subgrade* vertikal terhadap momen maksimum/minimum dan gaya lintang maksimum yang terjadi pada pelat Sistem Cakar Ayam Modifikasi untuk dimensi pelat beton ukuran 2,5 m x 7,5 m, dengan 1 deret pipa cakar berjumlah 3 buah berdiameter 0,8 m, panjang 1,2 m dan berjarak 2,5 m. Grafik-grafik tersebut, ditunjukkan dalam Gambar 4 sampai Gambar 7.



Gambar 2. Diagram lendutan, momen dan gaya lintang untuk beban  $P = 5 \text{ ton}$  (50 kN) di titik A (Firdiansyah, 2009).

Nilai modulus reaksi tanah-dasar vertikal divariasikan dari  $0,5 - 8 \text{ kg/cm}^3$  ( $1 \text{ kg/cm}^3 \approx 10000 \text{ kN/m}^3$ ) dan tebal pelat yang ditinjau adalah 12, 15, 17, 20 cm (tebal pelat beton Sistem Cakar Ayam yang biasanya digunakan untuk perkerasan jalan raya). Karena untuk beban-beban rendah lendutan pelat sangat kecil, sehingga rotasi cakar juga sangat kecil, maka pengaruh perlawanan cakar dalam mereduksi lendutan menjadi kurang signifikan. Dalam analisis, pengaruh gesekan dinding cakar terhadap tanah di sekitarnya diperhitungkan.



Gambar 3. Diagram lendutan, momen dan gaya lintang untuk beban  $P = 5$  ton (50 kN) di titik B (Firdiansyah, 2009).

Hasil-hasil hitungan lendutan, momen maksimum/minimum dan gaya lintang maksimum ditunjukkan dalam Tabel 2 sampai Tabel 7 dan Gambar 4 dan Gambar 5, untuk Sistem Cakar Ayam tanpa pelat penutup tepi (koperan) (Gambar 1b), sedang Gambar 6 dan Gambar 7, untuk Sistem Cakar Ayam dengan pelat penutup tepi (Gambar 1c). Nilai-nilai lendutan, momen dan gaya lintang maksimum diberikan dalam fungsi dari modulus reaksi tanah-dasar vertikal ( $k_v$ ). Tabel-tabel dan gambar-gambar tersebut menyajikan hasil hitungan untuk beban  $P = 1$  ton yang terletak di tengah dan di tepi pelat. Beban di tengah pelat adalah beban yang bekerja di atas cakar bagian tengah. Untuk beban  $P = 1$  ton di tengah, momen maksimum terjadi di bawah beban dan momen yang terjadi adalah momen positif, sedang untuk beban 1 ton di tepi, momen negatif maksimum terjadi di titik tepi luar cakar (titik B pada Gambar 1).

Tabel 1. Input data model simulasi Sistem Cakar Ayam dengan menggunakan software SAP 2000.

Karakteristik bahan	Satuan	Nilai
Beban 1 roda kendaraan	kN	10
Pelat beton CAM		
Panjang	m	7,5
Lebar	m	2,5
Tebal (divariasikan)	cm	12; 15; 17; 20
Dimensi pipa cakar		

Panjang	m	1,2
Diameter	m	0,8
Tebal	mm	1,4
Jarak antar cakar	m	2,5
Material baja (BJ 37)		
Berat volume	kN/m <sup>3</sup>	78,5
Modulus elastisitas beton,	MPa	$2,0 \times 10^5$
E	-	0,3
Angka poisson, $\mu$	MPa	240
Tegangan leleh, $f_y$	MPa	370
Tegangan putus, $f_u$		
Diameter tekanan kontak roda		
	m	0,30
Modulus reaksi subgrade vertikal ( $k_v$ )		
	kg/cm <sup>3</sup>	0,5; 1; 2; 3; 5 dan 8
Modulus reaksi subgrade horizontal ( $k_h = k_v$ )		
	kg/cm <sup>3</sup>	0,5; 1; 2; 3; 5 dan 8

Tabel 2. Lendutan maksimum untuk beban 1 ton di tengah tanpa pelat penutup tepi

Tebal pelat (cm)	Lendutan maksimum (mm) untuk:					
	$k_v = 0,5$	$k_v = 1$	$k_v = 2$	$k_v = 3$	$k_v = 5$	$k_v = 8$
12	0,248	0,155	0,099	0,078	0,055	0,036
15	0,213	0,131	0,082	0,064	0,045	0,031
17	0,197	0,120	0,074	0,057	0,040	0,028
20	0,178	0,107	0,066	0,050	0,035	0,024

Tabel 3. Lendutan maksimum untuk beban 1 ton di tepi tanpa pelat penutup tepi

Tebal pelat (cm)	Lendutan maksimum (mm) untuk:					
	$k_v = 0,5$	$k_v = 1$	$k_v = 2$	$k_v = 3$	$k_v = 5$	$k_v = 8$
12	1,074	0,683	0,443	0,347	0,254	0,191
15	0,873	0,552	0,352	0,273	0,198	0,148
17	0,784	0,492	0,312	0,241	0,173	0,128
20	0,685	0,427	0,268	0,206	0,146	0,107

Tabel 4. Momen positif maksimum untuk beban 1 ton di tengah tanpa pelat penutup tepi

Tebal pelat (cm)	Momen positif maksimum (ton.m/m') untuk:					
	$k_v = 0,5$	$k_v = 1$	$k_v = 2$	$k_v = 3$	$k_v = 5$	$k_v = 8$
12	0,047	0,032	0,019	0,013	0,006	0,001
15	0,071	0,050	0,034	0,027	0,017	0,005
17	0,086	0,062	0,044	0,036	0,025	0,012
20	0,110	0,080	0,058	0,048	0,036	0,022

Tabel 5. Momen negatif maksimum untuk beban 1 ton di tepi tanpa pelat penutup tepi

Tebal pelat (cm)	Momen negatif maksimum (ton.m/m') untuk:					
	$k_v = 0,5$	$k_v = 1$	$k_v = 2$	$k_v = 3$	$k_v = 5$	$k_v = 8$
12	0,201	0,188	0,162	0,143	0,125	0,109
15	0,213	0,193	0,169	0,151	0,136	0,123
17	0,215	0,195	0,173	0,156	0,141	0,130
20	0,218	0,200	0,179	0,163	0,149	0,139

Tabel 6. Gaya lintang maksimum untuk beban 1 ton di tengah tanpa pelat penutup tepi

Tebal pelat (cm)	Gaya lintang maksimum (ton/m') untuk:					
	$k_v = 0,5$	$k_v = 1$	$k_v = 2$	$k_v = 3$	$k_v = 5$	$k_v = 8$
	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>
12	0,257	0,246	0,233	0,226	0,201	0,179
15	0,265	0,259	0,250	0,245	0,226	0,207
17	0,27	0,265	0,257	0,254	0,238	0,221
20	0,277	0,272	0,266	0,264	0,251	0,236

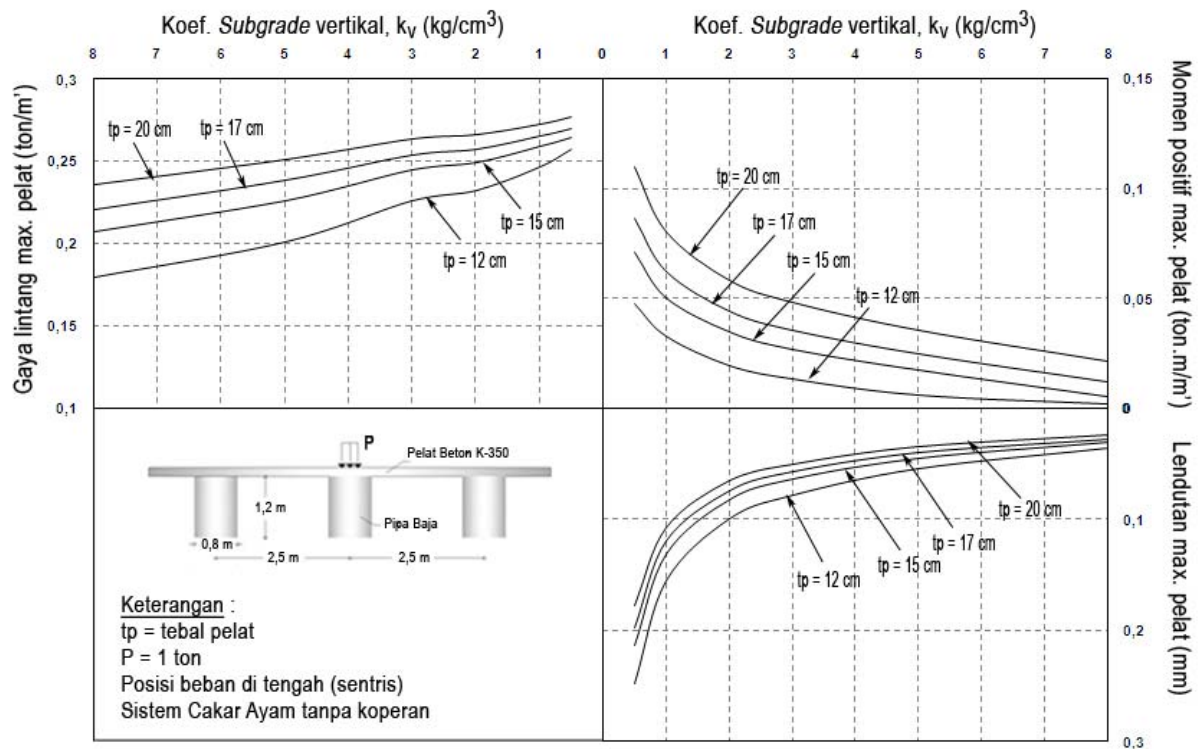
Tabel 7. Gaya lintang maksimum untuk 1 ton di tepi tanpa pelat penutup tepi

Tebal pelat (cm)	Gaya lintang maksimum (ton/m')					
	$k_v = 0,5$	$k_v = 1$	$k_v = 2$	$k_v = 3$	$k_v = 5$	$k_v = 8$
	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>
12	0,768	0,747	0,721	0,702	0,680	0,658
15	0,784	0,763	0,740	0,723	0,705	0,687
17	0,790	0,771	0,749	0,734	0,717	0,701
20	0,798	0,781	0,761	0,747	0,731	0,717

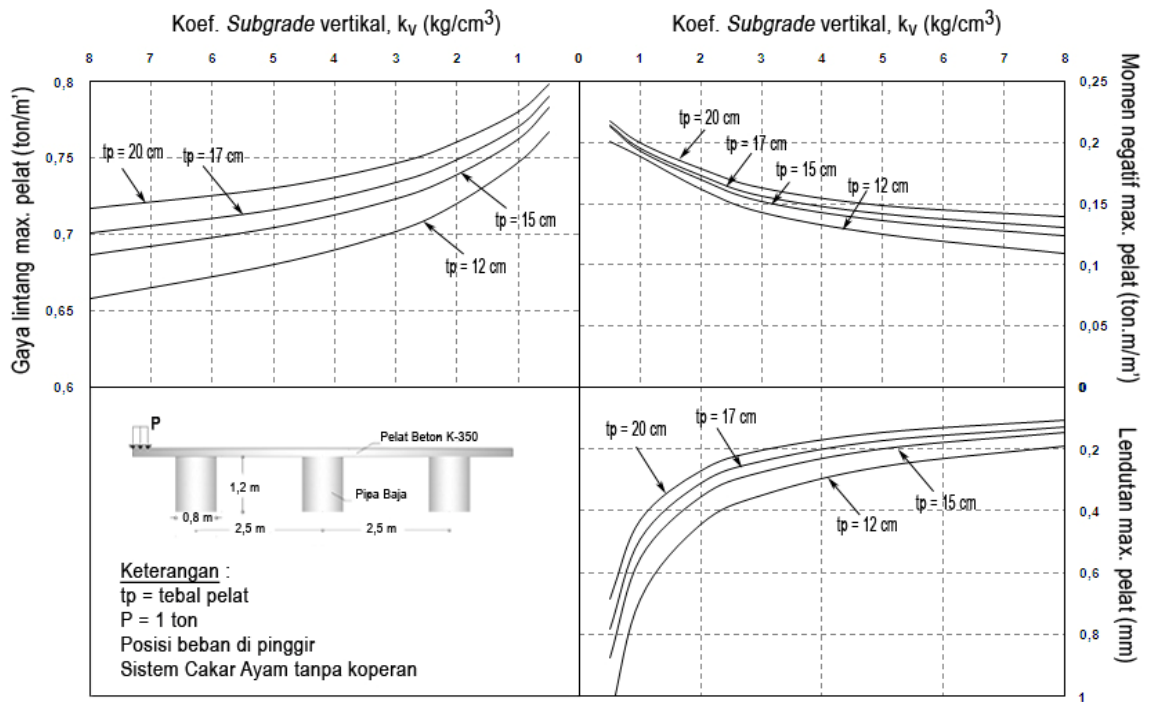
Untuk perancangan Sistem Cakar Ayam dibutuhkan nilai modulus reaksi tanah-dasar vertikal ( $k_v$ ). Nilai  $k_v$  diperoleh dari uji beban pelat (*plate load test*). Pengaruh kapasitas dukung tanah atau  $k_v$  terhadap lendutan, momen lentur, gaya lintang untuk beban 1 ton (10 kN) di tepi dan di tengah pelat 12, 15, 17 dan 20 cm dapat dihitung dengan menggunakan **Gambar 4** sampai **Gambar 7**. Dari **Gambar 4** sampai **Gambar 7** tersebut terlihat bahwa semakin besar  $k_v$ , lendutan, momen dan gaya lintang maksimum pada pelat semakin mengecil. Pada tebal pelat 15 cm dan beban 1 ton di tengah pelat, untuk modulus reaksi *subgrade* vertikal  $k_v = 0,5$  kg/cm<sup>3</sup>, momen positif yang terjadi di tengah pelat adalah 0,071 t.m/m', sedang untuk dan  $k_v = 8$  kg/cm<sup>3</sup> momen positif hanya 0,005 t.m/m', atau 1/14 kalinya. Pada tebal pelat yang sama, namun dengan beban 1 ton di tepi pelat, untuk  $k_v = 0,5$  kg/cm<sup>3</sup>, momen negatif maksimum yang terjadi adalah 0,213 t.m/m', sedang untuk dan  $k_v = 8$  kg/cm<sup>3</sup> momen negatif maksimum hanya 0,123 t.m/m', atau terjadi penurunan momen negatif sebesar 1,7 kalinya.

## PEMBAHASAN

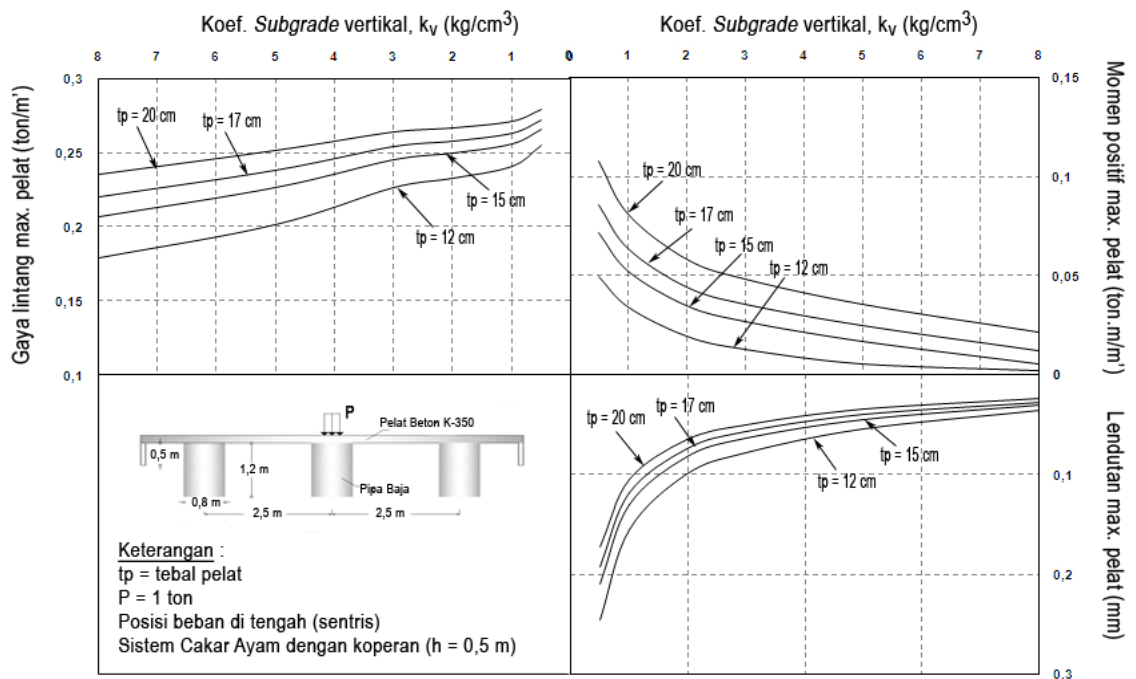
Dari hasil analisis terlihat nilai modulus reaksi tanah-dasar vertikal sangat berpengaruh terhadap nilai lendutan dan momen yang terjadi, terutama untuk  $k_v$  kurang dari 3 kg/cm<sup>3</sup>. Untuk  $k_v > 3$ , nilai lendutan dan momen perbedaannya tidak sangat besar.



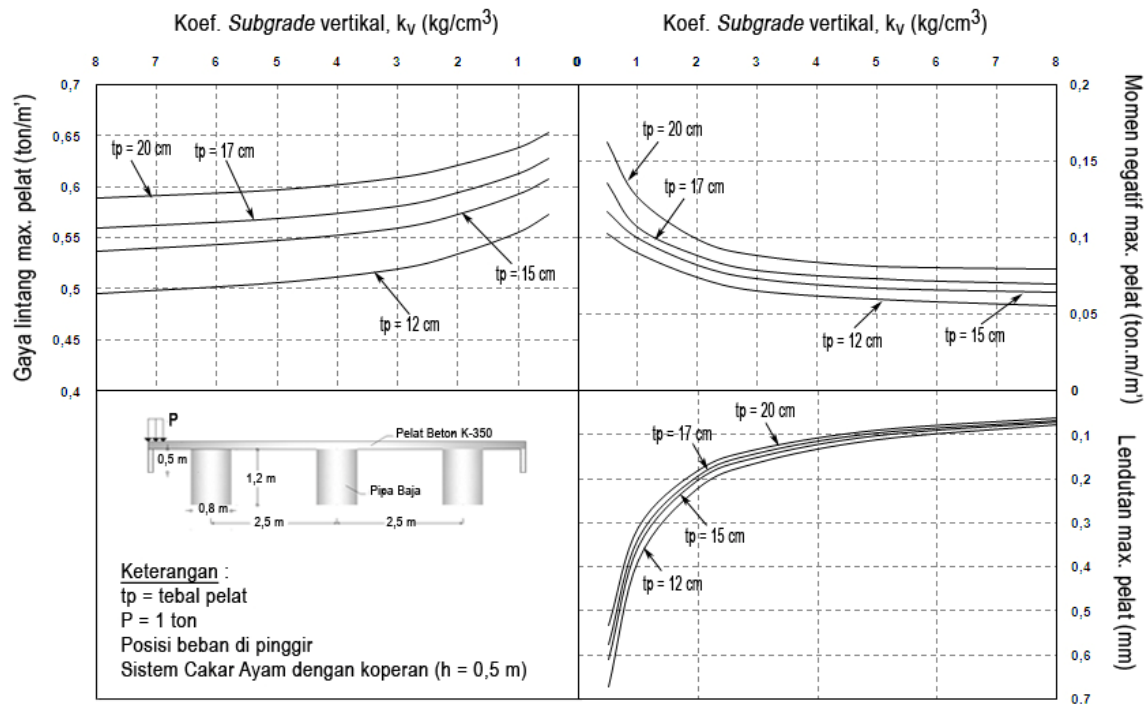
Gambar 4. Hitungan Sistem Cakar Ayam Modifikasi tanpa pelat penutup tepi untuk beban 1 ton (10 kN) di tengah.



Gambar 5. Hitungan Sistem Cakar Ayam Modifikasi **tanpa pelat penutup tepi** untuk beban 1 ton (10 kN) di tepi.



Gambar 6. Hitungan Sistem Cakar Ayam Modifikasi **dengan pelat penutup tepi** untuk beban 1 ton (10 kN) di tengah.



Gambar 7. Hitungan Sistem Cakar Ayam Modifikasi dengan pelat penutup tepi untuk beban 1 ton (10 kN) di tepi.

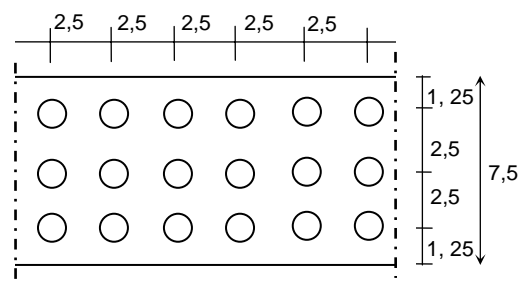
Hasil-hasil hitungan dalam Gambar 4 sampai Gambar 7 menunjukkan bahwa pada beban dan modulus reaksi tanah-dasar vertikal vertikal ( $k_v$ ) yang sama, momen yang terjadi akan semakin besar bila tebal pelat bertambah.

Lendutan dan momen terbesar terjadi bila beban terletak di tepi. Selisih lendutan bila beban terletak di tepi dan di tengah bisa mencapai empat kalinya. Sebagai contoh, untuk tebal pelat 15 cm,  $k_v = 2 \text{ kg/cm}^3$ , untuk beban di tepi, lendutan maksimum yang terjadi 0,35 mm, sedang untuk beban di tengah hanya 0,08 mm. Untuk beban di tepi, momen negatif terbesar terjadi di sisi luar cakar. Untuk tebal pelat 15 cm dan  $k_v = 2 \text{ kg/cm}^3$ , momen negatif maksimum yang terjadi 0,17 t.m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, sedangkan untuk beban di tengah, momen maksimum terjadi di bawah beban sebesar 0,065 t.m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.

Cara hitungan lendutan, momen dan gaya lintang maksimum adalah sebagai berikut: misalnya ditentukan lebar jalan beton 7,5 m, Sistem Cakar Ayam Modifikasi tanpa pelat penutup tepi dan disyaratkan lendutan maksimum untuk beban 10 ton di tepi pelat harus tidak melebihi 5 mm. Dari uji beban pelat, diperoleh  $k_v = 30000 \text{ kN/m}^3$  ( $3 \text{ kg/cm}^2$ ). Digunakan 3 pipa cakar berdiameter 0,8 m, panjang 1,2 m dan jarak 2,5 m (Gambar 8). Penyelesaiannya adalah sebagai berikut ini.

Untuk Sistem Cakar Ayam tanpa pelat penutup tepi, maka untuk hitungan digunakan Gambar 4 dan Gambar 5. Dalam perancangan telah disyaratkan untuk beban 10 ton (100 kN) di tepi, lendutan maksimum 5 mm. Jika dipilih tebal pelat 15 cm, untuk  $k_v = 30000 \text{ kN/m}^3$  ( $3 \text{ kg/cm}^2$ ), dengan menggunakan nilai-nilai dalam Gambar 5, maka untuk beban 1 ton, lendutan maksimum yang terjadi 0,273 mm. Untuk beban 10 ton, lendutan maksimum =  $10 \times 0,273 = 2,73 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$  (jadi memenuhi syarat). Hitungan selanjutnya, dari Gambar 5, dengan menggunakan:  $k_v = 3 \text{ kg/cm}^2$ , beban di tepi 1 ton, diperoleh momen negatif maksimum = 0,15 ton.m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, gaya lintang maksimum = 0,723 ton/m<sup>2</sup>. Untuk beban 10 ton, momen negatif maksimum =  $10 \times 0,15 = 1,5 \text{ t.m}^2/\text{m}^2$  dan gaya lintang maksimum =  $10 \times 0,723 = 7,23 \text{ ton/m}^2$ . Letak-letak terjadinya lendutan maksimum, momen

negatif maksimum dan gaya lintang maksimum dapat dilihat pada Gambar 3.



Ukuran dalam meter

Gambar 8. Denah Sistem Cakar Ayam dengan lebar jalan 7,5 m dan jarak cakar 2,5 m tanpa pelat penutup tepi.

Cara yang sama digunakan untuk beban di tengah, baik Sistem Cakar Ayam Modifikasi yang menggunakan pelat penutup tepi, maupun tanpa pelat penutup tepi.

## KESIMPULAN

1. Nilai modulus reaksi tanah-dasar vertikal sangat berpengaruh terhadap nilai lendutan dan momen yang terjadi. Hal ini, terutama untuk  $k_v$  kurang dari  $3 \text{ kg/cm}^3$ . Untuk  $k_v > 3$ , nilai lendutan dan momen perbedaannya tidak signifikan.
2. Pada beban dan modulus reaksi tanah-dasar vertikal ( $k_v$ ) yang sama, momen yang terjadi akan semakin besar, bila tebal pelat bertambah.
3. Hasil hitungan menunjukkan bahwa perancangan pada kondisi paling kritis, bila beban terletak di tepi pelat Sistem Ca-

kar Ayam, karena lendutan, momen dan gaya lintang maksimum lebih besar dibanding dengan beban di tengah.

4. Hitungan lendutan, momen dan gaya lintang maksimum pada pelat Sistem Cakar Ayam untuk beban sampai 10 ton (100 kN) dapat dilakukan dengan menggunakan **Gambar 4** sampai **Gambar 7**, yaitu dengan mengalikan nilai-nilai dalam gambar-gambar tersebut secara linier (proporsional).

## SARAN

Contoh hitungan lendutan momen dan gaya lintang yang disajikan dalam pembahasan di atas, hanya untuk ukuran Sistem Cakar Ayam Modifikasi 7,5 m x 2,5 m dan pola penempatan pipa-pipa cakar berbentuk bujur sangkar berjarak satu sama lain 2,5 m. Untuk pola susunan cakar dan jarak yang lain, maka nilai-nilai dalam **Tabel 1** sampai **Tabel 6** dan **Gambar 4** sampai **Gambar 7** menjadi tidak cocok.

## DAFTAR PUSTAKA

Firdiansyah, A, 2009, *Evaluasi Dimensi Sistem Cakar Ayam Akibat Pengaruh Variasi Letak Beban dan Kondisis Tanah*, Tesis Magister Pengelolaan Sarana Prasarana (MPSP), Program Pasca Sarjana, UGM, Yogyakarta.

Hardiyatmo, H.C, Suhendro, B., Hutagamis sufardal, Susanto, H.A., 1999, *Perilaku Fondasi Cakar Ayam pada Model di Laboratorium Kontribusi untuk Perancangan*, *Prosiding Seminar Nasional Geoteknik*, UGM, Yogyakarta.

Hardiyatmo, H.C, Suhendro, B., Adi, A.D, 2000, *Perilaku Fondasi Cakar Ayam pada model di laboratorium-Kontribusi untuk Perancangan*, Lembaga Penelitian UGM, Yogya-karta.

Hardiyatmo, H.C., 2008, *Sistem Cakar Ayam sebagai Alternatif Penyelesaian Masalah Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) pada Tanah-dasar Ekspansif*, *Seminar Nasional Tepat Guna Penanganan Sarana Prasarana di Indonesia*, Magister Pengelolaan Sarana Prasarana UGM, Yogyakarta.

Hetenyi, M., 1974, *Beams On Elastic Foundation*, Ann Arbor, The University Of Michigan Press.

Nawangalam, P., 2008, *Pemodelan Elemen Hingga Sistem Cakar Ayam dengan Analisis Tanah-dasar Non-Linier*, *Tesis S-2 Program Pasca Sarjana*, UGM, Yogyakarta.

Romadhoni, J., 2008, *Perilaku Perkerasan Sistem Cakar Ayam dengan Metode Elemen Hingga*, *Tugas Akhir S-1*, Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan FT UGM.

Suhendro, B., 1992, " *Laporan Kemajuan ke III, Studi Optimalisasi Formula Cakar Ayam*, Jurusan Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Suhendro, B., 2006, *Sistem Cakar Ayam Modifikasi sebagai Alternatif Solusi Konstruksi Jalan di atas Tanah Lunak*, Saduran dari buku 60 tahun RI, Jakarta.