



Seminar Sehari & Pameran

Rabu, 1 Desember 2004
Hotel Borobudur - Jakarta



INOVASI TEKNOLOGI BETON DI INDONESIA

MAKALAH

Pemanfaatan Perkerasan Beton pada Jalan Tol

Inovasi Teknologi Konstruksi dengan Menggunakan
Beton Pracetak

Some Thoughts on The Construction and Concreting of
Jakarta Tower

Usulan Standar Nasional Indonesia untuk
Konstruksi Beton Pracetak - Prategang

Concrete Admixtures for Flowing Concrete

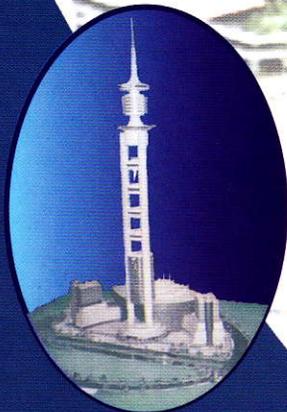
Concrete Boat : Students of Civil Engineering Dept. UI
Tribute to Indonesian Fishermen

Inovasi Beton GRC - GRS

Jenis - Jenis Semen dan
Karakteristiknya

Sistem Pracetak Girder pada
Proyek Pasopati - Bandung

Perencanaan Perkerasan Kaku
Jalan Raya dengan Cara Dinamik



PERENCANAAN PERKERASAN KAKU JALAN RAYA DENGAN CARA DINAMIK

Prof. Ir. Sofia W. Alisjahbana, M.Sc., Ph.D.
Direktur Program Pascasarjana, Universitas Tarumanagara

Prof. DR. Ir. Wiratman Wangsadinata
Guru Besar Universitas Tarumanagara, Presiden Direktur PT Wiratman & Ass.

ABSTRAK: Dalam tulisan ini disajikan suatu metoda baru perencanaan perkerasan kaku jalan raya dari beton berdasarkan keadaan yang sesungguhnya, di mana beban kendaraan yang ditinjau bersifat dinamik dengan kedudukan di atas pelat dan kecepatan gerak yang sembarang. Berhubung solusi yang didapat adalah tepat dan akurat, perkerasan kaku jalan raya dapat direncanakan dengan lebih ekonomis. Untuk memecahkan persoalannya, perkerasan kaku jalan raya dimodelkan sebagai suatu pelat persegi ortotropik teredam, yang ditunjang oleh fondasi elastik yang menerus. Dengan menganggap pelat ditumpu bebas pada ke empat tepinya, frekuensi-frekuensi alaminya dapat dihitung, di mana jumlah gelombangnya adalah $m\pi/a$ dan $n\pi/b$, dengan 'a' and 'b' merupakan panjang sisi pelat dalam arah x dan arah y, sedangkan m dan n merupakan bilangan bulat positif yang menunjukkan nomor ragamnya. Bentuk ragam disajikan sebagai perkalian fungsi-fungsi eigen. Fungsi beban dinamik dinyatakan sebagai suatu beban terpusat yang nilainya bervariasi secara harmonik dan bergerak dengan kecepatan yang tetap. Beban demikian dapat dianggap sebagai beban roda truk yang melintas di atas perkerasan jalan raya. Solusi umum untuk fungsi beban ini dijabarkan dalam bentuk integral, yang kemudian dipecahkan untuk mendapatkan respons pelat terhadap beban yang bekerja. Maksud dari tulisan ini adalah untuk menunjukkan, bahwa dengan teori yang disajikan perkerasan jalan raya dapat dianalisis untuk mendapatkan frekuensi-frekuensi alami dan respons dinamikanya berupa simpangan, momen lentur dan gaya geser akibat beban dinamik suatu truk yang melintas di atasnya.

1. PENDAHULUAN

Sampai sekarang perencanaan perkerasan kaku jalan raya dari beton secara konvensional dilakukan berdasarkan beban kendaraan yang bersifat statik dengan kedudukan tertentu yang tetap. *Westergaard* (Yoder, Witczak, 1975) misalnya, memberikan rumus-rumus untuk 3 macam kedudukan beban, yaitu di sudut pelat, di tepi pelat dan di tengah-tengah pelat. Di samping itu, pelat beton dan tanah bawah selalu dipandang sebagai 2 bahan tersendiri, yang masing-masing harus memenuhi persyaratan tertentu. Di dalam tulisan ini disajikan suatu metoda baru perencanaan perkerasan kaku jalan raya berdasarkan keadaan yang sesungguhnya. Beban kendaraan yang ditinjau bersifat dinamik (nilainya berubah-ubah sesuai karakteristik kendaraan), kedudukannya di atas pelat adalah sembarang dan melintas dengan kecepatan gerak yang juga sembarang. Di samping itu sesuai dengan kenyataan, pelat beton dan tanah bawah dipandang sebagai satu sistem terpadu, sehingga kinerja perkerasan jalan ditentukan oleh kombinasi sifat keduanya, bukan oleh sifat beton dan tanah sendiri-sendiri. Dengan metoda perencanaan yang baru ini, diperoleh solusi yang tepat dan akurat berdasarkan kondisi yang sesungguhnya, sehingga perkerasan kaku jalan raya dapat direncanakan dengan lebih ekonomis.

Persoalan yang dihadapi pada perkerasan kaku jalan raya menyangkut persoalan unsur struktur yang ditunjang oleh suatu media elastik atau visco-elastik, yang dibebani oleh beban dinamik. Persoalan seperti ini ditemukan juga kecuali di bidang teknik sipil

lainnya, juga di bidang kedirgantaraan dan kelautan. Pendekatan yang biasa dilakukan untuk memecahkan persoalan ini adalah dengan memasukkan reaksi media penunjang ke dalam persamaan diferensial dari pelat yang bersangkutan. Media penunjang tersebut seringkali merupakan hal yang kompleks, tetapi karena yang ingin dipecahkan di sini adalah respons dari pelat, maka cukup ditemukan suatu persamaan matematik yang dapat menggambarkan respons dari medium penunjang pada bidang kontak. Suatu pemodelan sederhana dari suatu fondasi elastik yang menerus, adalah yang diberikan oleh *Winkler* (Kerr, 1964), yaitu berupa pegas-pegas linier independen yang tersebar merata secara berdekatan. Dalam hal ini, diasumsikan adanya hubungan beban-simpangan yang linier, sehingga bila pada fondasi dikerjakan suatu lendutan w , maka fondasi tersebut memberikan gaya reaksi sebesar $k_1 w$, di mana k_1 merupakan modulus fondasinya. Beberapa hasil studi akhir-akhir ini mengenai stabilitas dan respons dinamik pelat ortotropik, ditunjukkan oleh *Paliwal dan Gohsh* (Paliwal, Gohsh, 2000), yang menentukan stabilitas pelat-pelat ortotropik yang ditunjang oleh suatu fondasi Kerr. Dalam tahun 2001 *Alisjahbana* (Alisjahbana, 2001) menyajikan suatu analisis respons pelat ortotropik persegi terhadap beban dinamik akibat manusia. Kemudian, *Alisjahbana* (Alisjahbana, 2001) menyajikan analisis pelat ortotropik yang ditunjang oleh suatu fondasi Winkler, dengan memperhitungkan pula efek dari beban-beban kritis yang bekerja dalam bidangnya.

2. ANALISIS UMUM

Sisi-sisi 'a' dan 'b' dari pelat persegi ortotropik teredam adalah sisi-sisi yang sejajar dengan arah sumbu x dan sumbu y , seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.

Pelat dibebani oleh suatu beban dinamik umum $p(x,y,t)$ yang bergerak, dan ditunjang oleh suatu fondasi Winkler dengan modulus fondasi k_1 . Persamaan diferensial secara umum dari lendutan pelat w dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$D_x \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^4} + 2B \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial y^4} + \gamma \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial t} + \dots \dots \dots (1)$$

$$+ \rho \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} + k_1 w = p(x, y, t)$$

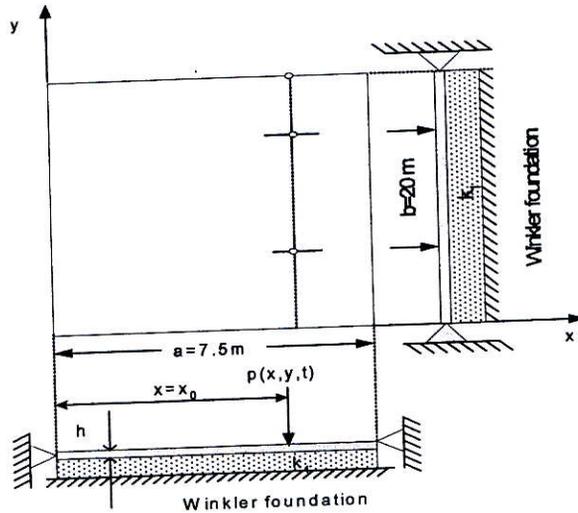
di mana D_x dan D_y adalah kekakuan lentur dalam arah x dan arah y , B adalah kekakuan torsional efektif, γ adalah rasio redaman dan ρ adalah kerapatan massa. Solusi dari persamaan homogen yang bersangkutan dapat ditentukan dengan metoda separasi variabel-variabel. Dengan mengisikan variabel-variabel separasi yang memenuhi syarat-syarat batas menurut :

$$w_{mn}(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn}(x, y) T_{mn}(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) T_{mn}(t) \quad (2)$$

ke dalam persamaan homogen yang bersangkutan menurut pers.(1), maka didapat :

$$\left[D_x \frac{m^4 \pi^4}{a^4} + 2B \frac{m^2 n^2 \pi^4}{a^2 b^2} + D_y \frac{n^4 \pi^4}{b^4} + k_1 \right] W_{mn}(x, y) T_{mn}(t) = \dots (3)$$

$$= -\rho h \frac{\partial^2 T_{mn}(t)}{\partial t^2} W_{mn}(x, y) - \gamma h \frac{\partial T_{mn}(t)}{\partial t} W_{mn}(x, y) = \beta_{mn}^4$$



Gambar 1. Suatu pelat persegi ortotropik yang ditunjang oleh suatu fondasi Winkler yang mengalami beban dinamik yang bergerak.

Mengingat $W_{mn}(x, y)$ hanya bergantung pada variabel-variabel ruang (*spatial*) dan $T_{mn}(t)$ hanya bergantung pada variabel-variabel waktu (*temporal*), ruas kiri dan ruas kanan dari pers.(3) harus merupakan suatu konstanta. Konstanta-konstanta separasi ini atau juga disebut nilai-nilai eigennya, dapat dinyatakan dengan β_{mn}^4 yang ditentukan oleh persamaan berikut :

$$\beta_{mn}^4 = \pi^4 \left[D_x \frac{m^4}{a^4} + 2B \frac{m^2 n^2}{a^2 b^2} + D_y \frac{n^4}{b^4} \right] + k_1 \dots (4)$$

Selanjutnya, frekuensi sudut alami dari pelat, yang berhubungan dengan konstanta-konstanta separasi β_{mn}^4 ditentukan oleh:

$$\omega_{mn}^2 = \beta_{mn}^4 / \rho h \dots (5)$$

Dengan demikian, solusi dari persamaan homogen dapat dinyatakan sebagai :

$$w_{mn}(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin \left[\frac{m\pi x}{a} \right] \sin \left[\frac{n\pi y}{b} \right] \right] e^{-\bar{\gamma} \omega_{mn} t} \left[a_{omn} e^{i\sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn} t} + b_{omn} e^{-i\sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn} t} \right] \dots (6)$$

di mana a_{omn} dan b_{omn} merupakan konstanta-konstanta yang didapat dari kondisi awal.

3. RESPONS YANG DIPAKSAKAN

Mengingat seperangkat solusi fundamental dari persamaan diferensial parsial homogen yang dinyatakan oleh fungsi-fungsi eigen diketahui, maka metoda variasi parameter

dapat digunakan sebagai metoda umum untuk menentukan solusi khusus (*particular*) dari persamaan diferensial parsial non-homogen yang bersangkutan. Dengan menggunakan fungsi karakteristik dari pers.(2), suatu solusi yang benar untuk respons yang dipaksakan dapat ditulis dalam bentuk :

$$w_{mn}(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin\left[\frac{m\pi x}{a}\right] \sin\left[\frac{n\pi y}{b}\right] T_{mn}(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

di mana $T_{mn}(t)$ adalah suatu fungsi waktu yang harus ditentukan melalui analisis lebih lanjut. Setelah mengisikan pers.(7) ke dalam pers.(1), persamaan diferensial parsial non-homogen yang dihadapi dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut:

$$\left[D_x \frac{m^4 \pi^4}{a^4} + 2B \frac{m^2 n^2 \pi^4}{a^2 b^2} + D_y \frac{n^4 \pi^4}{b^4} + k_1 \right] W_{mn}(x, y) T_{mn}(t) + \rho h \frac{\partial^2 T_{mn}(t)}{\partial t^2} W_{mn}(x, y) + \gamma h \frac{\partial T_{mn}(t)}{\partial t} W_{mn}(x, y) = p(x, y, t) \quad \dots\dots\dots (8)$$

Persamaan diferensial untuk fungsi-fungsi koefisien $T_{mn}(t)$ dapat diperoleh dengan mengalikan ke dua belah pihak dari pers.(8) dengan $\sin [m\pi x/a]$ atau $\sin [n\pi y/b]$, kemudian mengintegrasikannya melalui daerah pelat $0 < x < a$ dan $0 < y < b$. Dengan demikian, didapatkan suatu persamaan diferensial biasa untuk $T_{mn}(t)$ dalam bentuk sebagai berikut:

$$\ddot{T}_{mn}(t) + 2\bar{\gamma}\omega_{mn} \dot{T}_{mn}(t) + \omega_{mn}^2 T_{mn}(t) = \left[\int_0^a \sin \frac{m\pi x}{a} dx \int_0^b \sin \frac{n\pi y}{b} dy \right] \frac{p(x, y, t)}{\rho h Q_{mn}} \quad \dots\dots (9)$$

di mana $\bar{\gamma} = [\gamma/2\rho\omega_{mn}]$ adalah suatu faktor redaman dan Q_{mn} adalah suatu faktor normalisasi. Perlu dicatat, bahwa solusi homogen dari pers.(9) adalah identik dengan yang didapat sebelumnya dengan menggunakan metoda solusi separasi variabel-variabel. Solusi total dari pers.(9) menjadi:

$$T_{mn}(t) = \hat{T}_{mn}(t) + T_{mn}^*(t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

di mana $\hat{T}_{mn}(t)$ adalah solusi homogen dan $T_{mn}^*(t)$ adalah solusi khusus yang dapat dinyatakan dalam bentuk integral konvolusi dari *Duhamel* sebagai berikut:

$$T_{mn}^*(t) = \int_0^t \left[\frac{p(x, y, \tau)}{\rho h Q_{mn}} \int_0^a x_m(x) dx \int_0^b y_n(y) dy \right] \left[\frac{e^{-\bar{\gamma}\omega_{mn}(t-\tau)}}{\sqrt{1-\bar{\gamma}^2}} \sin \sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn}(t-\tau) \right] d\tau \quad \dots\dots (11)$$

Solusi homogen $\hat{T}_{mn}(t)$ mengandung konstanta-konstanta yang harus ditentukan dari kondisi awal, yang menunjukkan suatu keadaan vibrasi transien. Sifat dari respons pelat yang dipaksakan yang bersifat vibrasi terus-menerus (*steady*), hanya mengandung fungsi-fungsi $T_{mn}^*(t)$ yang ditentukan oleh pers.(11). Dengan mengisikan persamaan-persamaan koefisien ke dalam pers.(11), solusi umum untuk lendutan respons yang

dipaksakan dari pelat akibat suatu beban dinamik umum $p(x,y,t)$ ditentukan dalam bentuk integral sebagai berikut:

$$w(x,y,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[x_m(x) y_n(y) e^{-\bar{\gamma} \omega_{mn} t} \left[a_{mn} e^{i\sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn} t} + b_{mn} e^{-i\sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn} t} \right] \right] + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^t \int_0^a \int_0^b \frac{p(x,y,\tau)}{\rho h Q_{mn}} x_m(x) dx y_n(y) dy \left[\frac{e^{-\bar{\gamma} \omega_{mn} (t-\tau)}}{\sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn}} \sin \sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn} (t-\tau) \right] d\tau \right] \quad (12)$$

Solusi umum yang disajikan di atas dapat diintegrasikan untuk menentukan respons dari pelat terhadap suatu beban dinamik umum $p(x,y,t)$.

Suatu beban terpusat yang nilainya bervariasi secara harmonik yang bergerak dalam arah y dengan kecepatan tetap v dalam suatu lintasan garis lurus pada kedudukan x yang tetap, sebagai perwujudan dari suatu beban roda sebuah truk yang melintas di atas perkerasan jalan raya, dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$p(x,y,t) = P_0 [1 + \frac{1}{2} \cos \omega t] \delta [x-x_0] \delta [y-vt] \quad \dots \dots \dots (13)$$

di mana P_0 adalah beban roda rata-rata dan ω adalah frekuensi sudut dari variasi harmonik. Dengan mengisikan fungsi beban menurut pers.(13) ke dalam pers.(12), solusi lendutan secara umum menjadi :

$$w(x,y,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[x_m(x) y_n(y) e^{-\bar{\gamma} \omega_{mn} t} \left[a_{mn} e^{i\sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn} t} + b_{mn} e^{-i\sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn} t} \right] \right] + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^t \int_0^a \int_0^b \frac{p(x,y,\tau)}{\rho h Q_{mn}} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \delta [x-x_0] \delta [y-v\tau] dx dy \right] \times \left[\frac{e^{-\bar{\gamma} \omega_{mn} (t-\tau)}}{\sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn}} \sin \sqrt{1-\bar{\gamma}^2} \omega_{mn} (t-\tau) \right] d\tau \quad \dots \dots (14)$$

Integral-integral ruang dalam pers.(14) dapat dievaluasi secara langsung yaitu:

$$\int_0^a \int_0^b P(x,y,\tau) \left[\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \delta [x-x_0] \delta [y-v\tau] \right] dx dy = P_0 [1 + \frac{1}{2} \cos(\omega t)] \sin \frac{m\pi x_0}{a} \sin \left[\frac{n\pi}{b} v\tau \right] \quad \dots (15)$$

4. RESPONS DINAMIK DARI PELAT

Tinjau beban roda truk $P_0 [1 + \frac{1}{2} \cos (\omega t)]$, yang melintas dengan kecepatan tetap v sejajar dengan arah y . Pada saat $t = t_0$, di mana $t_0 = b/v$, beban tersebut meninggalkan pelat. Dengan demikian, persoalan ini dapat dipecahkan dalam dua bagian. Bagian pertama menyangkut suatu beban terpusat yang nilainya bervariasi secara harmonik yang melintas dalam arah y dengan kecepatan tetap v pada kedudukan x_0 yang tetap. Bagian ke dua menyangkut suatu keadaan, di mana beban sudah meninggalkan pelat,

sehingga respons pelat berupa vibrasi bebas. Kedua bagian persoalan ini berhubungan satu dengan lainnya melalui kondisi batas. Gerakan pelat pada $t = t_0$ akibat beban pada $x = x_0$ menjadi kondisi awal dari pelat pada saat terjadi perubahan mendadak dalam beban pada saat $t = t_0$. Dengan menggunakan prinsip-prinsip di atas, gerakan pelat selama suatu interval waktu setelah beban meninggalkan pelat dapat dihitung. Dengan menganggap gerakan pelat sudah mencapai gerakan terus-menerus (*steady*) sebelum beban meninggalkan pelat, gerakan pada saat $t = t_0$ dapat dihitung. Gerakan pada saat itu merupakan kondisi awal bagi bagian kedua dari persoalan.

Lendutan respons dari sistem dapat dihitung dari persamaan sebagai berikut:

$$w_{mn}(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\bar{\gamma}\omega_{mn}(t-t_0)} \left[w_{omn} \cos[\sqrt{1-\bar{\gamma}^2}\omega_{mn}(t-t_0)] + \frac{v_{omn} + \bar{\gamma}\omega_{mn}w_{omn}}{\sqrt{1-\bar{\gamma}^2}\omega_{mn}} \sin[\sqrt{1-\bar{\gamma}^2}\omega_{mn}(t-t_0)] \right] \quad (16)$$

di mana w_{omn} dan v_{omn} adalah lendutan awal dan kecepatan awal pada saat $t = t_0$. Momen lentur dan gaya geser di dalam pelat dapat dihitung sebagai fungsi dari lendutan menurut pers.(16) dan penurunannya menurut persamaan-persamaan berikut:

$$\begin{aligned} M_x &= - \left[D_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] ; & M_y &= - \left[D_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \\ Q_x &= - \frac{\partial}{\partial x} \left[D_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + H \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] ; & Q_y &= - \frac{\partial}{\partial y} \left[D_x \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] \end{aligned} \quad \dots \quad (17)$$

di mana $H = B + 2G$ dan G adalah modulus geser dari pelat. Kekakuan lentur dan kekakuan torsional efektif dari pelat ditentukan oleh persamaan-persamaan berikut:

$$D_x = \frac{E_x h^3}{12(1-\nu_x \nu_y)} ; \quad D_y = \frac{E_y h^3}{12(1-\nu_x \nu_y)} ; \quad B = \sqrt{D_x D_y} \quad \dots \quad (18)$$

di mana E_x dan E_y adalah modulus elastisitas dan ν_x dan ν_y adalah rasio Poisson masing-masing dalam arah x dan arah y , sedangkan h adalah tebal pelat.

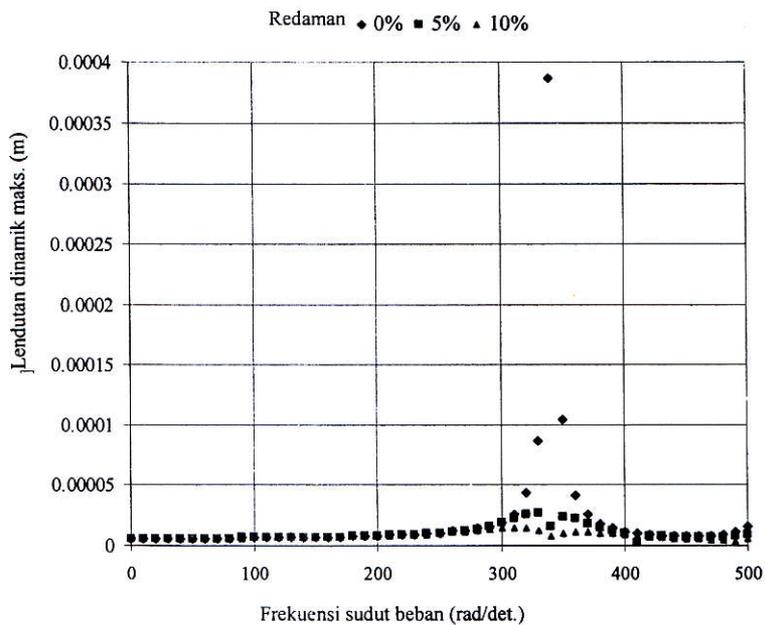
5. CONTOH NUMERIK

Dengan menggunakan prosedur yang diuraikan di atas, suatu perkerasan kaku jalan raya dari beton yang dibebani oleh suatu beban roda truk dinamik yang melintas di atasnya, akan dianalisis. Pengaruh dari perubahan frekuensi sudut beban ω dan rasio redaman akan diselidiki. Beban roda rata-rata adalah $P_0 = 10^4$ N, melintas dengan kecepatan tetap $v = 60$ km/jam di arah y pada kedudukan $x_0 = 3,5$ m yang tetap. Hasil-hasil perhitungan numerik berikut telah didapat untuk kasus berikut : $a = 7$ m, $b = 20$ m, $\rho = 2.4 \times 10^3$ kg/m³, $h = 0.35$ m, $E_x = 30 \times 10^9$ N/m², $E_y = 20 \times 10^9$ N/m², $\nu_x = 0.2$, $\nu_y = 0.1$, $G = 10^{10}$ N/m², $k_1 = 7.5 \times 10^7$ N/m²/m.

Di dalam tabel 1 dicantumkan frekuensi-frekuensi alami pelat untuk 5 ragam yang pertama. Dari tabel tersebut dapat dilihat, bahwa nilai frekuensi alami meningkat dengan meningkatnya nomor ragam.

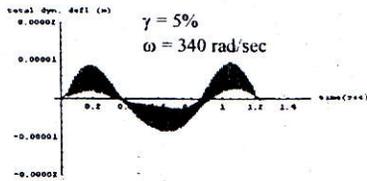
Tabel 1. Frekuensi alami dari pelat untuk 5 ragam pertama

n	m=1	n	m=2	n	m=3	n	m=4	n	m=5
	ω_{mn}								
	(rad/det.)								
1	340.582	1	442.833	1	734.738	1	1209.36	1	1845.46
2	424.688	2	514.072	2	783.805	2	1243.36	2	1870.97
3	536.314	3	614.723	3	859.38	3	1298.05	3	1912.73
4	661.676	4	732.765	4	955.192	4	1370.95	4	1969.71
5	794.296	5	861.076	5	1065.8	5	1459.34	5	2040.63

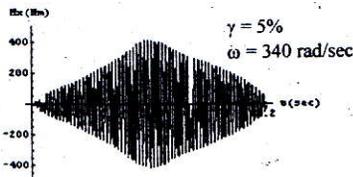


Gambar 2. Respons spektrum lendutan dinamik maksimum sebagai fungsi dari frekuensi sudut beban dan rasio redaman.

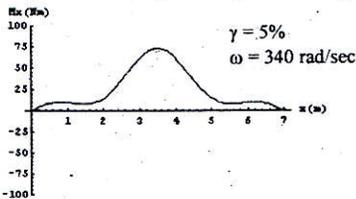
Gambar 2 menunjukkan spektrum respons lendutan sebagai fungsi dari frekuensi sudut beban dan rasio redaman. Dari gambar tersebut dapat dilihat, bahwa lendutan dinamik mencapai nilai maksimum bila nilai frekuensi beban mendekati nilai frekuensi alami pelat.



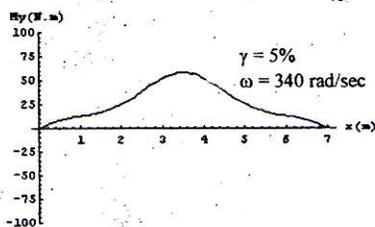
Riwayat waktu lendutan dinamik total di tengah bentang



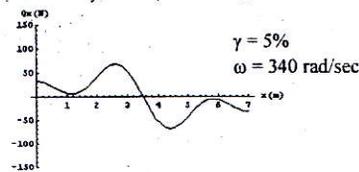
Riwayat waktu M_x di tengah bentang



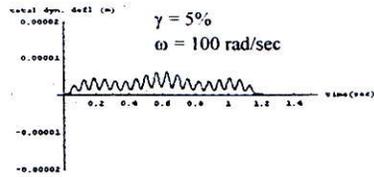
Distribusi M_x dalam arah x pada $t=1$ det.



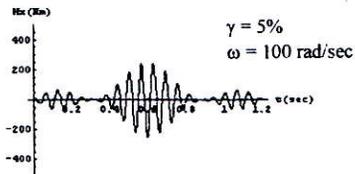
Distribusi M_y dalam arah x pada $t=1$ det.



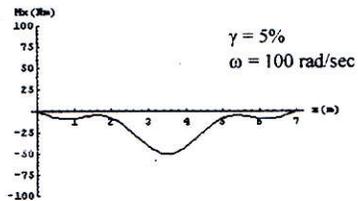
Distribusi gaya geser dalam arah x pada $t=1$ det.



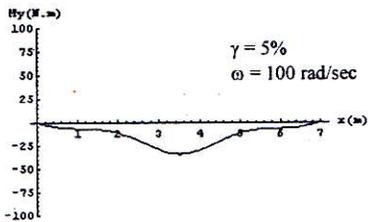
Riwayat waktu lendutan dinamik total di tengah bentang



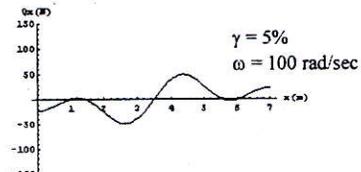
Riwayat waktu M_x di tengah bentang



Distribusi M_x dalam arah x pada $t=1$ det.



Distribusi M_y dalam arah x pada $t=1$ det.

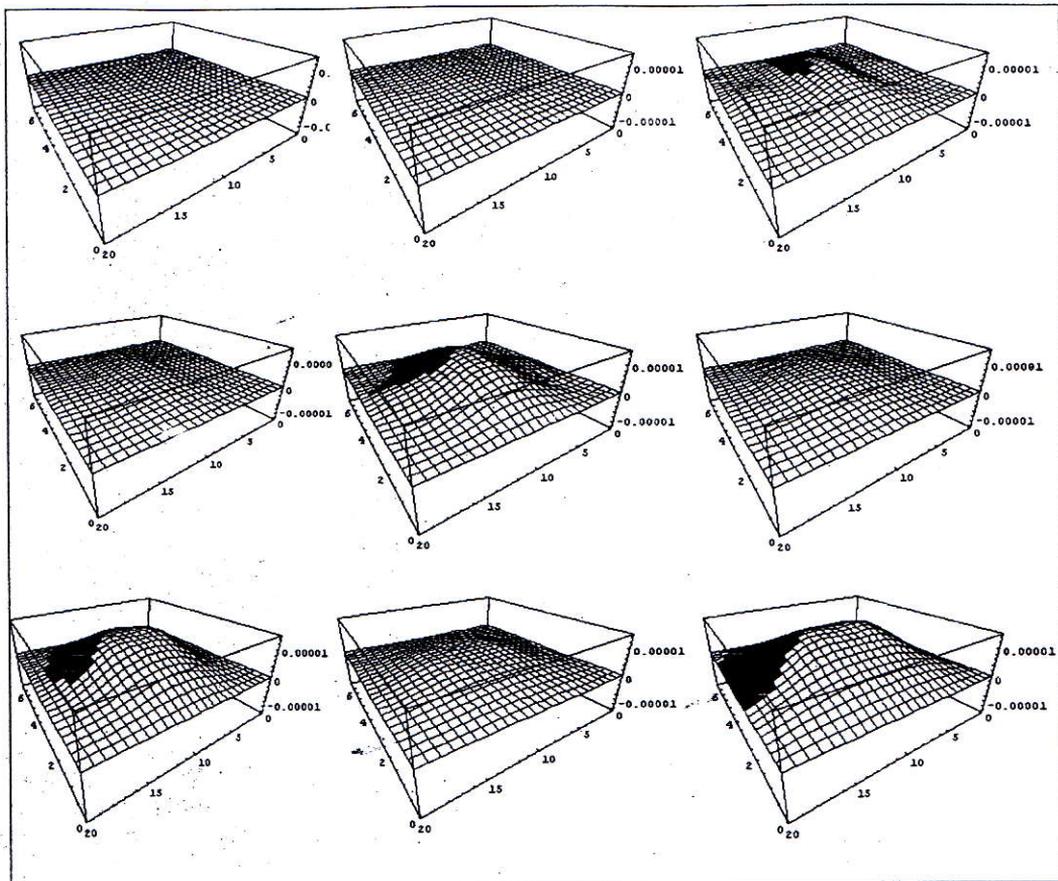


Distribusi gaya geser dalam arah x pada $t=1$ det.

Gambar 3. Respons dinamik pelat pada keadaan dekat pada keadaan resonansi (sebelah kiri) dan pada keadaan jauh dari keadaan resonansi (sebelah kanan).

Gambar 3 menunjukkan berbagai jenis respons pelat terhadap beban roda truk yang melintas. Dengan membandingkan keadaan dekat pada keadaan resonansi (sebelah kiri) dengan keadaan jauh dari keadaan resonansi (sebelah kanan), maka dapat dilihat betapa pentingnya menghindari keadaan resonansi.

Akhirnya, dalam Gambar 4 ditunjukkan bentuk dari lendutan respons pelat terhadap beban roda truk yang melintas pada saat-saat tertentu.



Gambar 4. Bentuk-bentuk lendutan dinamik pelat untuk saat-saat $0 \leq t \leq t_0$ ($\gamma = 5\%$, $\omega = 340$ rad/sec.).

6. KESIMPULAN

Sebagai kesimpulan dapat dikemukakan hal-hal sebagai berikut :

- 1) Teori pelat persegi ortotropik teredam yang ditunjang oleh fondasi elastik menerus yang dibebani oleh beban dinamik yang bergerak berdasarkan metoda analisis yang disajikan, dapat diterapkan dengan baik untuk analisis perkerasan kaku jalan raya yang dibebani oleh beban dinamik roda truk yang melintas.
- 2) Analisis respons dinamik ini memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai perilaku perkerasan jalan yang dibebani oleh beban dinamik kendaraan yang melintas, sehingga menjadi metoda perencanaan alternatif dari metoda konvensional yang selama ini dipakai berdasarkan beban statik. Mengingat solusi yang didapat adalah tepat dan akurat, maka perencanaan dinamik dapat menghasilkan perkerasan jalan raya yang lebih ekonomis.
- 3) Pendekatan perencanaan berdasarkan respons dinamik ini memberi kebebasan yang lebih besar kepada perencana untuk memilih mutu bahan perkerasan jalan dan tanah bawah, karena kinerja perkerasan jalan ditentukan oleh kombinasi sifat ke dua bahan tersebut, bukan oleh sifat masing-masing bahan sendiri-sendiri.
- 4) Untuk beban kendaraan dengan karakteristik variasi beban tertentu yang bergerak dengan kecepatan tertentu, dapat dibuat spektrum respons untuk perencanaan, yang merupakan topik penelitian selanjutnya dari para penulis.

DAFTAR PUSTAKA

1. Yoder, E.J. ; Witzczak, M.W. (1975). "*Principles of Pavement Design*", John Wiley & Sons, Inc., 2nd ed., 1975.
2. Kerr, A.D. (1964). "*Elastic and Viscoelastic Foundation Models*", Journal of Applied Mechanics, Sept. 1964.
3. Paliwal, D.N. ; Gohsh, S.K. (2000). "*Stability of Orthotropic Plates on a Kerr Foundation*", AIAA Journal, Vol. 38, No.10, pp. 1994-1996.
4. Alisjahbana, S.W. (2001). "*Dynamic Response of Orthotropic Stiffened Plate*", Proceeding Seminar on The Advancement & Trend in Soil-Structural Engineering in the Third Millennium, Jakarta, pp. 21-34.
5. Alisjahbana, S.W. (2001). "*Stabilitas Pelat Orthotropic Persegi Panjang di atas Pondasi Winkler*", Jurnal Teknik Sipil, Univ. Tarumanagara, No: 1, Th. VII, 2001.