

# PERBANDINGAN DEFLEKSI ABSOLUT MAKSIMUM DARI PELAT ORTOTROPIK *SEMI RIGID* DENGAN BERBAGAI MACAM JENIS TANAH YANG DIMODELKAN MENGGUNAKAN PEMODELAN PASTERNAK AKIBAT BEBAN *IN-PLANE* TEKAN DAN BEBAN DINAMIK TRANSVERSAL

Riyawan Aid Kuncoro<sup>1</sup> dan Sofia W. Alisjahbana<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mahasiswa Magister, Universitas Tarumanagara, Jakarta  
Email: yehezkiel.riawan@gmail.com

<sup>2</sup> Profesor, Universitas Bakrie  
Email: sofia.wangsadinata@gmail.com

## ABSTRAK

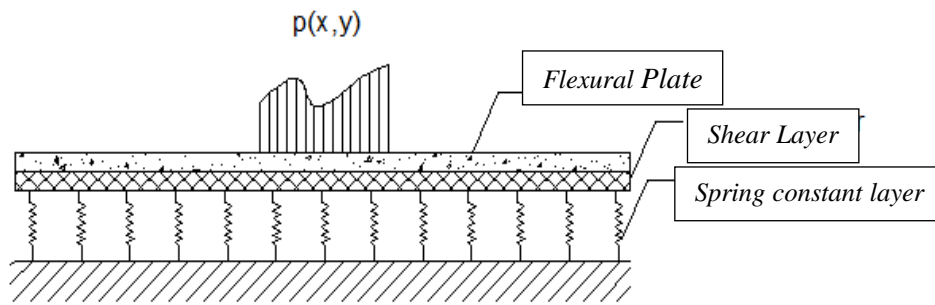
*Di dalam paper ini, analisis respons dinamik dari pelat ortotropik diteliti. Pelat ortotropik memiliki perletakan semi rigid yang mencerminkan keadaan sebenarnya dari pelat. Pelat ortotropik didukung dengan tanah yang dimodelkan dengan menggunakan pemodelan yang diusulkan oleh Pasternak. Pemodelan elastis ini digunakan untuk dapat mengakomodasi interaksi gaya geser antar elemen pegas. Modified Bolotin Method (MBM) dengan dua buah persamaan transcedental digunakan untuk menyelesaikan permasalahan respons dinamik dari pelat. Respons dinamik dari pelat diperoleh dengan basis ortogonalitas dari fungsi eigen yang dapat diekspresikan dalam bentuk integral, sehingga dapat diselesaikan dengan mudah menggunakan Metode Duhamel. Beban transversal dimodelkan sebagai sebuah beban terpusat yang bergerak dengan kecepatan konstan di arah  $x$  yang dapat diselesaikan dengan menggunakan karakteristik khusus dari Dirac-delta, sedangkan beban *in-plane* diasumsikan sebagai beban static dari kedua arah ( $x$  dan  $y$  axis).*

**Kata Kunci:** *semi rigid*, pelat, Modified Bolotin Method (MBM), *in-plane* tekan, beban dinamik bergerak, pondasi Pasternak

## 1. PENDAHULUAN

Pelat merupakan sebuah elemen struktur yang memiliki banyak fungsi antara lain sebagai pelat lantai, pelat perkerasan kaku, dan masih banyak lagi fungsi yang lain. Sebagai sebuah pelat lantai, pelat memiliki setidaknya dua macam fungsi yang cukup memegang peranan penting yaitu: sebagai pengaku struktur dan sebagai media untuk mentransfer beban dari elemen di atas pelat ke elemen yang terdapat di bawah pelat. Dari fungsinya untuk mentransfer beban, pelat sangat berkaitan dengan beban *in-plane*, dimana salah satunya beban *in-plane* tekan. Beban *in-plane* tekan dapat dengan mudah menyebabkan tekuk seketika yang mengakibatkan kegalalan struktur (Timoshenko, 1974). Di beberapa metode konstruksi sering dijumpai pelat yang ada menerima beban seketika seperti pada metode *top-down structure* dimana pelat yang ada menerima beban transfer seketika setelah tanah di bawahnya digali.

Untuk memodelkan tanah dibawah pelat, berbagai macam model dapat digunakan. Salah satu yang cukup baik untuk digunakan adalah pemodelan yang diusulkan oleh Pasternak. Pemodelan yang diusulkan oleh Pasternak mengasumsikan tanah yang ada di bawah pelat dibagi menjadi dua model yaitu lapisan geser dan lapisan pegas. Metode ini sangat direkomendasikan dikarenakan metode ini mudah untuk digunakan dan dapat menggambarkan keadaan tanah yang mendekati kenyataan karena pemodelan ini mengakomodasi interaksi geser dari lapisan pegas. Beberapa penelitian terdahulu membuktikan penggunaan yang baik dari metode yang diusulkan oleh Pasternak ini. Sebagai contoh penelitian mengenai perkerasan kaku yang berada di atas pondasi Pasternak akibat beban bergerak (Zaman et al, 1993), dan respons dinamik dari perkerasan kaku di atas pondasi Pasternak yang dianalisis menggunakan metode elemen hingga (Patil et al, 2010). Gambaran mengenai pemodelan yang diusulkan oleh Pasternak dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pemodelan Tanah oleh Pasternak

Sebelumnya, telah banyak penelitian menggunakan Modified Bolotin Method (MBM) untuk menganalisis berbagai macam permasalahan numerik terkait dengan pelat. Sebagai contoh penelitian mengenai pelat persegi ortotropik di atas Pondasi Pasternak yang terjepit di seluruh sisinya akibat beban dinamik (Alisjahbana and Wangsadinata, 2005). Pada penelitian tersebut jumlah gelombang dipresentasikan ke dalam bentuk  $p\pi/a$  dan  $q\pi/b$ , dimana  $a$  dan  $b$  merupakan dimensi panjang dan lebar dari pelat, sementara  $p$  dan  $q$  merupakan bilangan riil yang harus diselesaikan dengan dua persamaan *transcendental* yang diperoleh dari dua *auxiliary* tipe Levy yang juga dikenal dengan MBM (Pevzner et al, 2000).

Pada penelitian ini, masalah pelat ortotropik *semi rigid* di atas tanah yang dimodelkan dengan metode Pasternak yang mengalami beban dinamik berupa beban berjalan dengan kecepatan konstan dan juga beban *in-plane* tekan dicoba untuk dianalisis. Respons dinamik dari pelat diperoleh dengan basis ortogonalitas dari fungsi eigen yang dapat diekspresikan dalam bentuk integral, sehingga dapat diselesaikan dengan mudah menggunakan Metode Duhamel.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### Rumus Umum

Menggunakan teori klasik dari sebuah pelat ortotropik tipis dengan beban transversal  $p(x,y,t)$  dan didukung oleh tanah dibawah pelat yang dimodelkan menggunakan pemodelan dari Pasternak, serta adanya beban *in-plane* pada arah  $x$  maupun arah  $y$  maka persamaan umumnya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$D_x \left( \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^4} \right) + 2.B \left( \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} \right) + D_y \left( \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial y^4} \right) + N_x \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + r_{if} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \rho.h \left( \frac{\partial^4 w(x, y, t)}{\partial t^4} \right) + \gamma.h \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial t} + k.w(x, y, t) - G_s \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = p_z(x, y, t) \quad (1)$$

di mana:

$D_x$  = Kekakuan lentur (*flexural rigidity*) pelat ortotropik arah sumbu  $x$

$$D_x = \frac{h^3}{12} \cdot \left( \frac{E_x}{1 - \nu_x \cdot \nu_y} \right) \quad (2)$$

$D_y$  = Kekakuan lentur (*flexural rigidity*) pelat ortotropik arah sumbu  $y$

$$D_y = \frac{h^3}{12} \left( \frac{E_y}{1 - \nu_x \cdot \nu_y} \right) \quad (3)$$

B = Kekakuan puntir (*torsional rigidity*) pelat ortotropik

$$B = \sqrt{D_x \cdot D_y} \quad (4)$$

$E_x$  = modulus elastisitas pelat arah x

$E_y$  = modulus elastisitas pelat arah y

$\nu_x$  = *Poisson's ratio* arah x

$\nu_y$  = *Poisson's ratio* arah y

$\rho$  = massa jenis

h = tebal pelat

$\gamma$  = koefisien redaman

$w(x,y,t)$  = fungsi lendutan yang tergantung pada fungsi posisi dan fungsi waktu

$p_z(x,y,t)$  = fungsi beban transversal arah z yang tergantung pada fungsi posisi dan fungsi waktu

$N_x$  = Beban *in-plane* arah x

$N_y$  = Beban *in-plane* arah y

$r_{if}$  = rasio beban *in-plane*

k = kekakuan pegas Pondasi Pasternak

$G_s$  = kekakuan geser Pondasi Pasternak

Beban transversal  $p(x,y,t)$  didefinisikan sebagai beban kendaraan yang bergerak dengan kecepatan konstan pada arah x dengan posisi arah y yang selalu sama ( $b/2$ ) dapat diekspresikan sebagai berikut.

$$p(x,y,t) = P_o (1 + \alpha \cos \omega t) \delta[x - x(t)] \delta[y - y(t)] \quad (5)$$

di mana:

$P_o$  = amplitudo dari beban

$x(t), y(t)$  = fungsi posisi dari beban di arah x dan y

$\alpha$  = koefisien beban

$\omega$  = frekuensi dari kendaraan

### Analisis Umum

Untuk menyelesaikan persamaan pelat ortotropik dengan berbagai macam perletakan, diasumsikan terlebih dahulu dalam kondisi elastis di seluruh sisinya sehingga persamaan getaran bebas dapat diperoleh dengan mengalikan fungsi posisi dengan fungsi waktu yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$w(x,y,t) = W(x,y)T(t) = W(x,y) \sin \omega t \quad (6)$$

Di mana:  $W(x,y)$  merupakan fungsi posisi dan  $\omega$  merupakan frekuensi alami dari sistem. Bila persamaan (1) disubstitusikan ke dalam persamaan (6), maka akan diperoleh persamaan frekuensi alami dari sistem untuk berbagai macam perletakan yang dapat diekspresikan sebagai berikut.

$$(\omega_{pq})^2 = \frac{\pi^4}{\rho h} \left[ D_x \left( \frac{p}{a} \right)^4 + (G_s - N_x) \left( \frac{p}{\pi a} \right)^2 + 2B \left( \frac{pq}{ab} \right)^2 + \frac{k}{\pi^4} + D_y \left( \frac{q}{b} \right)^4 + (G_s - r_{if} N_x) \left( \frac{q}{\pi b} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Di mana: a dan b merupakan dimensi dari pelat sedangkan p dan q merupakan bilangan riil yang dapat ditentukan dengan melakukan analisis pelat tipe Levy dengan dua *auxiliary* yang juga dikenal sebagai Modifeid Bolotin Method (MBM) (Pevzner et al, 2000).

### Masalah Pelat Tipe Levy

Masalah pelat tipe Levy dengan dua *auxiliary* menghasilkan dua solusi untuk posisi arah x dan juga posisi arah y. *Auxiliary* pertama memberikan solusi untuk posisi arah x sedangkan *auxiliary* kedua memberikan solusi untuk posisi di arah y.

### Persamaan *Auxiliary* I

Untuk masalah *auxiliary* I, solusi fungsi posisi di arah x dalam  $X(x)$  dan fungsi posisi arah y dalam fungsi getaran harmonis sehingga persamaan gerak dapat dituliskan menjadi seperti berikut.

$$W(x,y) = X(x) \sin\left(\frac{qy\pi}{b}\right) \quad (8)$$

Bila persamaan (8) di atas serta persamaan (7) disubstitusikan ke dalam persamaan (1) maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$X(x) \left[ D_y \left( \frac{q\pi}{b} \right)^4 - \rho h \omega^2 + k + N_x r_{if} \left( \frac{q\pi}{b} \right)^2 \right] - X'' \left[ 2B \left( \frac{q\pi}{b} \right)^2 - N_x + G_s \right] + X^{IV} D_x = 0 \quad (9)$$

Dengan melakukan faktorisasi maka diperoleh persamaan karakteristik sebagai berikut ini.

$$\lambda^4 - \lambda^2 \left( \frac{2Bq^2\pi^2 + 2G_s b^2 - b^2 N_x}{b^2 D_x} \right) - \left( \frac{p^2 \pi^2}{D_x} \right) \left( \frac{G_s}{a^2} - \frac{N_x}{a^2} + \frac{D_x p^2 \pi^2}{a^4} + \frac{Bq^2 \pi^2}{(ab)^2} \right) = 0 \quad (10)$$

Adapun persamaan karakteristik di atas memiliki empat buah akar persamaan yang terdiri dari dua buah akar riil dan dua buah akar imajiner yang dapat dinyatakan sebagai:

$$l_{1,2} = \pm i \left( \frac{p \cdot \rho}{a} \right) \text{ dan } l_{3,4} = \pm \left( \frac{\rho}{ab} \right) b \quad (11)$$

di mana:

$$\beta = \sqrt{(b \cdot p)^2 + \frac{(ab)^2}{\pi^2 D_x} (G_s - N_x) + \frac{2B(a \cdot q)^2}{D_x}} \quad (12)$$

Solusi untuk menyelesaikan persamaan (9) dapat diperoleh sebagai berikut:

$$X(x) = A_1 \cosh\left(\frac{\beta\pi x}{ab}\right) + A_2 \sinh\left(\frac{\beta\pi x}{ab}\right) + A_3 \cos\left(\frac{p\pi x}{a}\right) + A_4 \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \quad (13)$$

Persamaan di atas dapat diselesaikan dengan syarat batas (*boundary condition*) untuk pelat *semi rigid*. Adapun syarat batas pelat *semi rigid* pada arah x adalah sebagai berikut:

$$W(x,y) = 0 \text{ dan } -D_x \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) = k_1 \frac{\partial W}{\partial x} \text{ yaitu pada } x = 0 \text{ dan } x = a \quad (14)$$

Menggunakan syarat batas pada persamaan (14) dan disubstitusikan ke dalam persamaan (13) maka dapat diperoleh empat buah persamaan yang dapat dituliskan ke dalam bentuk matrix sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{ab}k_1 & -F_2 & \frac{p}{a}k_2 \\ C_1 & S_1 & c_1 & s_1 \\ F_1C_1 + \frac{\beta}{ab}S_1k_1 & (F_1S_1 + \frac{\beta}{ab}C_1k_1) & -(F_2c_1 + \frac{p}{a}s_1k_1) & -(F_2s_1 - \frac{p}{a}c_1k_1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

di mana:

$$F_1 = (D_x \left( \frac{\beta}{ab} \right)^2 \pi - \nu y \cdot D_x \left( \frac{q}{b} \right)^2 \pi) \quad (16)$$

$$F_2 = (D_x \left( \frac{p}{a} \right)^2 \pi + \nu y \cdot D_x \left( \frac{q}{b} \right)^2 \pi) \quad (17)$$

$$C_1 = \cosh \left( \frac{\rho b}{b} \right) \quad c_1 = \cos(\rho \rho) \quad (18)$$

$$S_1 = \sinh \left( \frac{\pi \beta}{b} \right) \quad s_1 = \sin(\pi p) \quad (19)$$

Selanjutnya dengan menormalkan nilai  $A_2$ ,  $A_3$ , dan  $A_4$  terhadap  $A_1$  dan dengan mensubsitusikan koefisien yang diperoleh ke dalam persamaan (15), maka diperoleh fungsi posisi di arah x, yaitu:

$$X(x) = \cosh \left( \frac{\pi \beta x}{ab} \right) + \frac{b(c_1 k_1 p - C_1 k_1 p + a(F_1 + F_2)s_1)}{k_1(bpS_1 - s_1\beta)} \sinh \left( \frac{\pi \beta x}{ab} \right) - \cos \left( \frac{\pi p x}{a} \right) - \frac{ab(F_1 + F_2)S_1 + (c_1 - C_1)k_1\beta}{k_1(bpS_1 - s_1\beta)} \sin \left( \frac{\pi p x}{a} \right) \quad (20)$$

## Persamaan Auxiliary II

Seperti halnya pada persamaan *auxiliary* I, maka untuk masalah *auxiliary* II digunakan untuk memecahkan solusi fungsi posisi di arah y dalam  $Y(y)$  sedangkan fungsi posisi arah x dalam fungsi getaran harmonis sinus sehingga dapat diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$W(x, y) = Y(y) \sin \left( \frac{p \pi x}{a} \right) \quad (21)$$

Adapun syarat batas untuk pelat arah y adalah sebagai berikut:

$$W(x, y) = 0 \text{ dan } -D_y \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu x \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) = k_2 \frac{\partial W}{\partial y} \text{ yaitu pada } y = 0 \text{ dan } y = b \quad (22)$$

Dengan cara yang sama seperti pada masalah *auxiliary* I, fungsi posisi di arah y dapat

dinyatakan:

$$Y(y) = \cosh\left(\frac{\pi\theta y}{ab}\right) + \frac{a(c_2 k_2 q - C_2 k_2 q + b(F_3 + F_4)s_2)}{k_1(bpS_1 - s_1\beta)} \sinh\left(\frac{\pi\theta y}{ab}\right) - \cos\left(\frac{\pi q y}{b}\right) - \frac{ab(F_3 + F_4)S_2 + (c_2 - C_2)k_2\theta}{k_2(aqS_2 - s_2\theta)} \sin\left(\frac{\pi q y}{b}\right) \quad (23)$$

di mana:

$$\theta = \sqrt{(a.q)^2 + \frac{(a.b)^2}{\pi^2 D_y} (G_s - N_x r_{if}) + \frac{2B(b.p)^2}{D_y}} \quad (24)$$

$$F_3 = \left[ D_y \left( \frac{\theta}{ab} \right)^2 \pi - \nu x . D_y \left( \frac{p}{a} \right)^2 \pi \right] \quad (25)$$

$$F_4 = \left[ D_y \left( \frac{q}{b} \right)^2 \pi + \nu x . D_y \left( \frac{p}{a} \right)^2 \pi \right] \quad (26)$$

$$C_2 = \cosh\left(\frac{\pi\theta}{a}\right) \quad c_2 = \cos(q\pi) \quad (27)$$

$$S_2 = \sinh\left(\frac{\pi\theta}{a}\right) \quad s_2 = \sin(q\pi) \quad (28)$$

### Solusi Homogen

Penyelesaian solusi homogen dapat dilakukan dengan menggunakan metode pemisahan variabel, sehingga diperoleh dua buah persamaan yang terpisah yaitu persamaan diferensial spasial dan persamaan diferensial temporal. Adapun melalui pemisahan variabel maka diperoleh:

$$w_H = w(x,y,t) = \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} W_{pq}(x,y) T_{pq}(t) = \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} [X_{pq}(x) Y_{pq}(y)] e^{-\xi . \omega_{pq} . t} (a_{0[pq]} . \text{Cos}[\omega_D]t + b_{0[pq]} . \text{Sin}[\omega_D]t) \quad (29)$$

di mana:

$X_{pq}(x)$  and  $Y_{pq}(y)$  adalah fungsi spasial dan  $T_{pq}(t)$  adalah fungsi temporal.  $a_0$  dan  $b_0$  merupakan nilai konstan sedangkan  $\omega_D = \omega_{pq} \sqrt{1 - \xi^2}$ , dimana  $\omega_{pq}$  adalah natural frekuensi dari sistem dan  $\xi$  adalah merupakan damping ratio dari sistem.

### Solusi Partikuler

Solusi partikuler dari persamaan diferensial gerak sistem  $w_P$ , dapat diperoleh dengan cara menggunakan metode pemisahan variabel. Koefisien-koefisien yang terdapat pada solusi homogen sesuai dengan persamaan (29) diekspansikan sesuai dengan pengaruh beban luar (*excitation forces*) yang belum ada pada solusi homogen yang dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$w_p = \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} X_{pq}(x) Y_{pq}(y) T_{pq}(t) \quad (30)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (30) ke dalam persamaan (1) dan dengan menggunakan karakteristik ortogonalitas dari fungsi *eigen* maka persamaan solusi partikuler dapat diperoleh dengan bantuan integrasi Duhamel dan juga fungsi Green sehingga diperoleh solusi partikuler yang dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$w_p = \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{q=1}^{\infty} \left( X_{pq}(x) Y_{pq}(y) \int_0^t \left[ \frac{P_z(x, y, t)}{\rho \cdot h \cdot Q_{pq}} \int_{x=0}^a X_{pq}(x) dx \int_{y=0}^b Y_{pq}(y) dy \left( \frac{e^{-\xi \cdot \omega_{pq}(t-\tau)}}{\sqrt{1-\xi^2} \cdot \omega_{pq}} \text{Sin}(\sqrt{1-\xi^2} \omega_{pq}(t-\tau)) \right) \right] dt \right) \quad (31)$$

### Respons Dinamik dari Pelat

Solusi total dapat diselesaikan dengan terlebih dahulu menentukan persamaan untuk mengganti fungsi P (x,y,t) yang berasal dari beban luar. Pada penelitian kali ini beban luar berupa beban kendaraan bergerak dengan kecepatan konstan. Beban yang ada dilimitasi hanya bergerak pada arah x axis sementara pada arah y diasumsikan konstan di tengah – tengah bentang. Sehingga persamaan P(x,y,t) dapat diekspresikan sebagai berikut.

$$P(x, y, t) = P[x(t), y(t), t] = P(t) \delta[x - x(t)] \delta[y - y(t)] \quad (32)$$

di mana:

$$P(t) \text{ merupakan beban dinamik yang bekerja di pelat } = P_0 + P(t) = P_0(1 + \alpha \cdot \text{Cos}[\omega t]) \quad (33)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (29), (31), (32) dan (33) maka dapat diperoleh persamaan total sebagai berikut:

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ X_{pq}(x) Y_{pq}(y) \right] \left[ e^{-\xi \cdot \omega_{pq}(t-t_0)} \left[ a_{0pq} \cdot e^{(i \cdot \omega_{pq} \sqrt{1-\xi^2})(t-t_0)} + b_{0pq} \cdot e^{(-i \cdot \omega_{pq} \sqrt{1-\xi^2})(t-t_0)} \right] + e^{-\xi \cdot \omega_{pq} \cdot t} \int_0^t \frac{P_0(1 + \alpha \cdot \text{Cos}[\omega \tau]) Y_{pq}(y_0)}{\rho \cdot h \cdot Q_{pq}} X_{pq}(v_0 \tau) \left( \frac{e^{\xi \cdot \omega_{pq} \cdot \tau}}{\sqrt{1-\xi^2} \omega_{pq}} \text{Sin}(\sqrt{1-\xi^2} \omega_{pq}(t-\tau)) d\tau \right) \right] \quad (34)$$

Waktu yang diperlukan beban untuk membebani pelat dari ujung hingga ujung dapat diperoleh dengan persamaan gerak sederhana yaitu  $t = s/V$ , sehingga dapat diperoleh waktu selama beban berada di dalam pelat.

### 3. ANALISIS NUMERIK & PEMBAHASAN

Penelitian ini melakukan analisis terhadap pelat ortotropik dengan perletakan *semi rigid* di atas sebuah medium tanah yang bervariasi akibat beban *in-plane* tekan dan juga beban transversal dinamik. Adapun spesifikasi dari pelat dapat dilihat pada Tabel 1 sedangkan spesifikasi beban luar dapat dilihat pada Tabel 2.

Tanah yang akan digunakan dalam penelitian ini diklasifikasikan menjadi tiga macam yaitu tanah lunak, tanah sedang dan tanah keras. Adapun nilai konstanta pegas serta kekuatan lapisan geser masing – masing jenis tanah disajikan di dalam Tabel 3.

Tabel 1 Parameter dari Pelat Beton

Nama	Notasi	Nilai	Satuan
Panjang pelat (sejajar sumbu x)	a	6	m
Lebar pelat (sejajar sumbu y)	b	3	m
Tebal pelat	h	0.15 – 0.20	m
Massa jenis beton	$\rho$	2400	kg/m <sup>3</sup>
Kekakuan rotational arah x	k <sub>1</sub>	7.7 x 10 <sup>6</sup>	N.m/rad
Kekakuan rotational arah y	k <sub>2</sub>	3.4 x 10 <sup>7</sup>	N.m/rad
Kekakuan lentur beton arah x	D <sub>x</sub>	7.89 x 10 <sup>6</sup>	N.m
Kekakuan lentur beton arah y	D <sub>y</sub>	8.61 x 10 <sup>6</sup>	N.m

Tabel 2 Data Beban Transversal

Nama	Notasi	Nilai	Satuan
Beban kendaraan terpusat	P <sub>o</sub>	20000	N
Frekuensi beban	$\omega_b$	450	rad/s
Koefisien beban	$\alpha$	00.05	
Kecepatan kendaraan	v	50	km/jam
Waktu beban di dalam pelat	t <sub>0</sub>	0,3	sec

Tabel 3. Konstanta Pegas k dan Geser G<sub>s</sub> dari Pondasi Pasternak

Konstanta	Jenis Tanah		
	Lunak ( <i>Soft</i> )	Sedang ( <i>Medium</i> )	Keras ( <i>Hard</i> )
Pegas k (MN/m/m <sup>2</sup> )	27.02.00	54.04.00	108.08.00
Geser G <sub>s</sub> (MN/m)	09.52	19.04	38.08.00

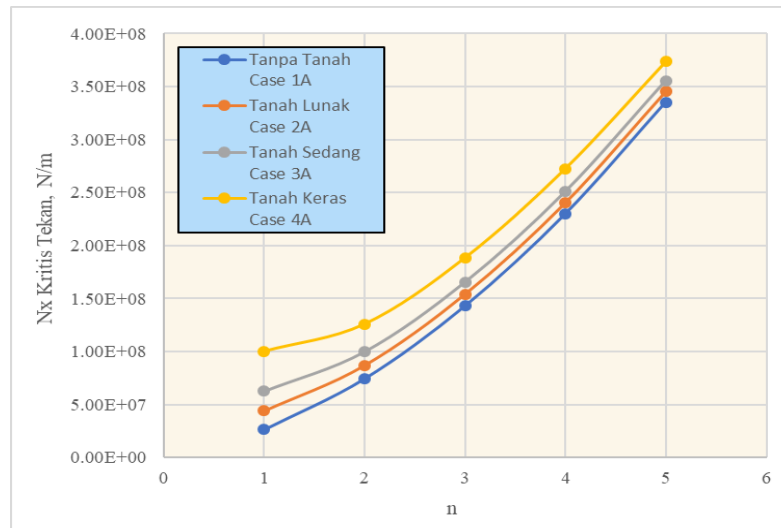
### Beban *In-Plane* Tekan Kritis

Dengan menggunakan persamaan (7) dan diasumsikan nilai natural frekuensi dari sistem adalah nol maka akan diperoleh nilai *in-plane* tekan kritis dari pelat. *In-plane* tekan kritis ini mencerminkan besarnya gaya *in-plane* yang masih mampu dipikul oleh sebuah pelat sebelum pelat tersebut mengalami tekuk atau kegagalan struktur akibat beban *in-plane* tekan. Adapun gambaran hasil beban *in-plane* kritis maksimum berbagai variasi jenis tanah berbanding dengan



*mode shape* di arah y saat *mode shape* di arah x sama dengan satu dapat dilihat pada Gambar 2.

Dari Gambar 2, diperoleh hasil semakin bagus tanah yang terdapat di bawah pelat maka semakin besar pula *in-plane* kritis tekan yang mampu dipikul oleh pelat. Pada tanah lunak pelat dapat memikul gaya *in-plane* kritis tekan lebih besar 68% sedangkan pada tanah sedang dapat memikul gaya hingga 140% lebih besar sedangkan pada tanah keras dapat memikul gaya 280% lebih besar dibandingkan dengan pelat tanpa adanya dukungan tanah di bawahnya. Dukungan tanah sangat membantu pelat untuk lebih tahan terhadap tekuk yang timbul akibat beban *in-plane* tekan.



Gambar 2. Beban In-Plane Kritis Tekan saat mode 1 pada arah x

Dengan diperoleh kisaran nilai *in-plane* tekan kritis maka untuk penelitian selanjutnya digunakan nilai *in-plane* tekan sebesar  $2 \times 10^7$  N/m untuk melihat pengaruh beban *in-plane* tekan terhadap defleksi absolut maksimum dari pelat.

### Defleksi Absolut Maksimum

Defleksi absolut maksimum diperoleh dengan bantuan program *Wolfram Mathematica*. Grafik *time history* yang menampilkan defleksi absolut maksimum total dengan waktu dapat diperoleh untuk damping ratio 5%. Gambaran riwayat waktu berbagai jenis tanah baik dengan atau tanpa *in-plane* tekan dapat dilihat pada Gambar 3.

Dari grafik yang ditampilkan pada Gambar 3, secara umum didapati waktu tercapainya defleksi absolut maksimum berbagai kasus adalah pada sekitar 0.21 detik. Defleksi absolut maksimum disajikan pada Tabel 4.

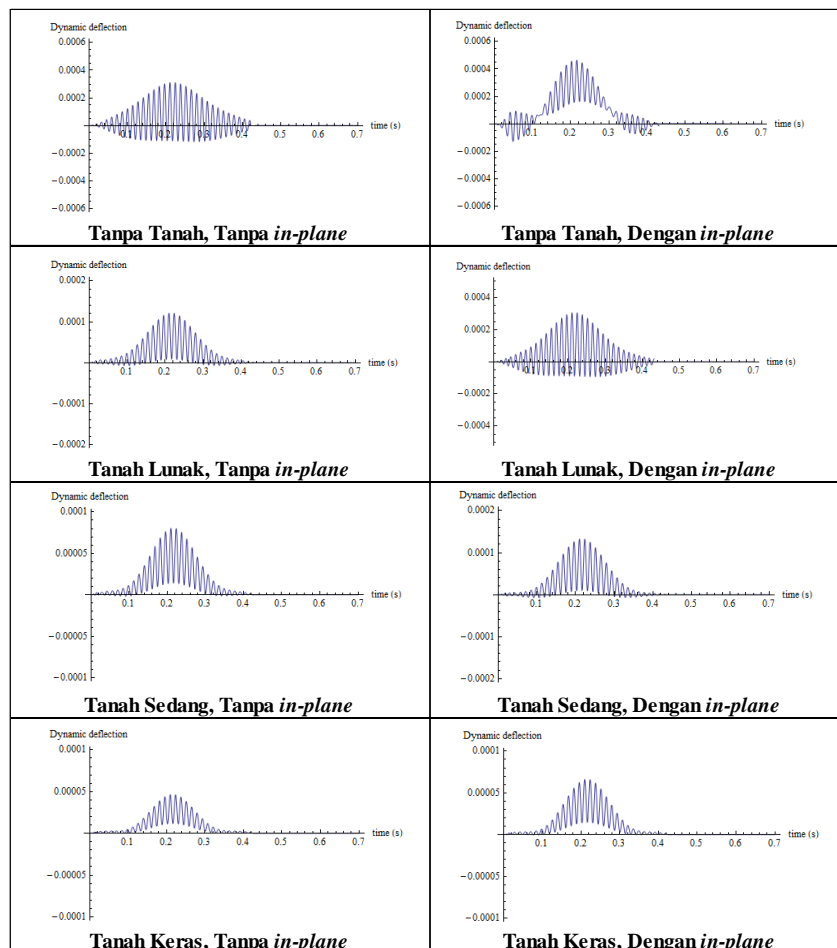
Tabel 4. Defleksi Absolut Maksimum Berbagai Kasus

Damping Ratio = 5%		
Soil Support	Maximum Absolut Deflection (m)	
	$N_x = 0$ N/m	$N_x = 2 \times 10^7$ N/m
Tanpa Tanah	0.000311556	0.000465237
Tanah Lunak	0.000121218	0.000305049
Tanah Sedang	0.000080427	0.000132937
Tanah Keras	0.000046464	0.000066153

Tabel 4 menunjukkan secara konsisten bahwa dengan adanya beban *in-plane* tekan dapat meningkatkan defleksi absolut maksimum dari suatu pelat. Selain itu, semakin meningkatnya kekuatan tanah yang digunakan di bawah pelat, maka diperoleh penurunan defleksi absolut maksimum dari pelat. Penurunan defleksi absolut maksimum pada tanah lunak mencapai 35% hingga 60% sedangkan pada tanah sedang penurunannya mencapai 70% hingga 75% sedangkan pada tanah keras penurunan berkisar antara 85% dibandingkan dengan pelat tanpa ada dukungan tanah.

#### 4. KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan betapa besar pengaruh tanah di bawah dasar pelat serta beban *in-plane* tekan yang bekerja pada pelat. Beban *in-plane* tekan dapat meningkatkan defleksi pelat hingga sekitar 70% dibandingkan dengan pelat tanpa beban *in-plane*. Sementara tanah di bawah pelat sangat signifikan dalam membantu pelat menahan beban yang ada. Akibat adanya tanah lunak dapat memperbesar kapasitas beban *in-plane* maksimum hingga 68% dan memperkecil defleksi hingga mencapai 35% hingga 60%. Tanah sedang dapat memperbesar kapasitas beban *in-plane* maksimum hingga 140% sedangkan tanah keras hingga 280%, sementara tanah sedang dapat memperkecil defleksi hingga mencapai 70% sedangkan tanah keras bisa mengurangi defleksi hingga 85%.



Gambar 3. Defleksi Absolut Maksimum Berbagai Variasi Kasus, Damping Ratio 5%

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- Alisjahbana, S. W., Wangsadinata, W. (2006), “*Dynamic Response of Rectangular Orthotropic Plate Supported by Pasternak Foundation Subjected to Dynamic Load*”, *First International Structural Specialty Conference*, Calgary, Alberta, Canada
- Alisjahbana, S. W., Wangsadinata, W, dan Baadilla, D.A. (2007), “*Dynamic Behaviour of Rigid Concrete Pavements Under Dynamic Traffic Loads.*” *1<sup>st</sup> International Conference of European Asian Civil Engineering Forum*, Jakarta.
- Alisjahbana, S. W., Wangsadinata, W. (2012). “*Dynamic Analysis of Rigid Roadway Pavement Under Moving Traffic Loads with Variable Velocity.*” *Interaction and Multiscale Mechanics: An International Journal*, Vol. 5, No. 2, pp 105 - 114.
- Baadilla, D. A. (2006). “*Dinamika Pelat Perkerasan kaku dengan Tahanan Tepi Sembarang*”, Disertasi Doktor Teknik Sipil, Pascasarjana Universitas Tarumanegara, Jakarta.
- Dickinson, S. M., 1975, “*Modified Bolotin’s Method Applied to Buckling and Lateral Vibration of Stressed Plates*”, *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 1, January 1975, pp. 109-110.
- Dickinson, S. M., 1975, “*Modified Bolotin’s Method Applied to Buckling and Vibration of Stressed Plates*”, *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 12, December 1975, pp. 1672-1673.
- Kerr, A. D., 1964, “*Elastic and Viscoelastic Foundation Models*”, *Journal of Applied Mechanics Transactions, ASME*, 31, pp 491-498.
- Kerr, A. D., 1964, “*A Study of New Foundation Model*”, *Acta Mechanica*, Springer-Verlag
- Patil, V.A., Sawant, V.A. and Deb, Kousik, 2010, “*Use of Infinite Elements in the Dynamic Analysis of Rigid Pavement Resting on Two Parameter Soil Medium*”, *Indian Geotechnical Conference*, 895-98, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay.
- Pevzner, P. & Weller, T. & Berkovits, A., 2000, “*Further Modification of Bolotin Method in Vibration Analysis of Rectangular Plates*”, *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 9, September 2000, pp. 1725-1729.
- Vijayakumar, K., 1971, “*New Method for Analysis of Flexural Vibration of Rectangular Orthotropic Plates*”, *Journal of Aeronautical Society of India*, Vol 23, pp 198-204.
- Timoshenko, S. P., and J. N. Goodier., 1974, “*Theory of Elasticity*”, International Student Edition, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Zaman, M., Alvappillai, A. and Taheri, MR., 1993, “*Dyanamic Analysis of Concrete Pavements Resting on a Two Parameter Medium*”, *Intl. J. Num. Meth. Engg.*, 36, 1465-86.