

PENGARUH BEBAN LEDAKAN PADA PERMUKAAN TANAH TERHADAP PELAT LANTAI ATAP BANGUNAN TINGGI

Erwin Susanto¹⁾, Sofia W. Alisjahbana²⁾

¹⁾ Magister Teknik Sipil Universitas Tarumanegara, Jakarta

²⁾ Universitas Bakrie, Jakarta

email : Erwin@tylin.co.id

Abstract

This research was conducted to know the impact of near ground explosion against high-rise building roof slab. Blast loading on the ground within certain distance from building regarding to terrorist acts by bomb blast in front of Australia Embassy. Blast loadings are an exceptional dynamic load that is able to weigh down a building structure other than normal load. Blast loadings are rarely counted as design loads in building structural planning. In this research, a set of slabs is modeled with partial fixity boundary conditions on its sides and variations of geometry which given blast load on the ground at the nearest distance possible to building. The main system responses that are observed are the transversal deflections at midspan and the internal stresses of the plate, particularly the maximum principle stress, minimum principle stress and maximum shear stress. Three loading phases are included in the analysis, namely: the positive phase, the negative phase, and the free vibration phase. Analyses are carried out utilizing a numeric approach termed the Modified Bolotin Method. The results are presented as stress contours that are then compared between each model. Based on the results from this research, the slab without stiffener has larger value of plate deflection and stress than the slab with stiffener. Small dimension of stiffener doesn't affect the slab response to deflection, but be able to reduce the stress that occurs on the slab. The slab with adequate stiffener dimension can increase slab response to deflection and stress.

Keywords: *Localized blast load, Thickness, Modified Bolotin Method, principle stress*

Abstrak

Pada penelitian ini membahas mengenai akibat beban ledakan yang terjadi pada permukaan tanah terhadap lantai atap bangunan tinggi. Beban ledakan terjadi pada permukaan tanah pada jarak tertentu dari bangunan yang mengacu pada kejadian ledakan bom yang terjadi didepan kedutaan besar Australia. Beban ledakan merupakan beban dinamik yang luar biasa sehingga dapat membebani suatu struktur bangunan diluar kondisi pembebanan biasa. Didalam perencanaan struktur bangunan beban ledakan hampir tidak pernah diperhitungkan sebagai beban desain. Dalam penelitian ini, pelat lantai dimodelkan dengan syarat batas *partial fixity* pada sisi-sisinya dengan variasi geometri pada ketebalan pelat lantai dan penambahan pengaku lalu diberikan beban ledakan pada permukaan tanah pada jarak terdekat dari bangunan yang mungkin terjadi. Respons sistem yang diamati adalah lendutan transversal pada tengah bentang dan tegangan dalam pada pelat, khususnya tegangan utama maksimum, tegangan utama minimum dan tegangan geser maksimum. Tiga tahap beban disertakan dalam analisis, yaitu fase positif, fase negatif dan fase getaran bebas. Analisis dikerjakan dengan pendekatan numerik yang disebut *Modified Bolotin Method*. Hasil tegangan disajikan dalam bentuk grafik kontur yang dapat dibandingkan antara setiap model. Berdasarkan hasil penelitian, pelat lantai tanpa pengaku mempunyai nilai lendutan dan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan pelat yang menggunakan pengaku. Dimensi pengaku yang kecil tidak memberikan peningkatan respon pelat lantai terhadap lendutan tetapi dapat mengurangi tegangan yang terjadi pada pelat lantai. Pelat lantai dengan dimensi pengaku yang memadai dapat meningkatkan respon pelat terhadap lendutan dan tegangan.

Kata kunci: Beban ledakan pada permukaan tanah, pengaku, *Modified Bolotin Method*, tegangan utama

1. PENDAHULUAN

Berawal dari kejadian pemboman pada kedutaan besar Australia di Indonesia pada tahun 2004 yang menyebabkan kerusakan pada gedung sekitar pusat ledakan. Dimana aksi terorisme tersebut menggunakan mobil van sebagai media untuk membawa bahan peledak dan diledakkan tepat di depan kedutaan besar Australia. Beban ledakan merupakan beban dinamik yang luar biasa sehingga dapat membebani suatu struktur bangunan diluar kondisi pembebanan biasa yang dapat menyebabkan keruntuhan pada gedung.

Berdasarkan latar belakang tersebut penulis merasa perlu untuk dilakukan suatu study untuk melihat respon dari elemen struktur terhadap beban ledakan yang terjadi. Untuk itu penulis melakukan penelitian secara numerik mengenai respon pelat lantai atap akibat beban ledakan yang terjadi pada permukaan tanah pada jarak tertentu dari gedung.

2. TIPE LEDAKAN

Berdasarkan posisi sumber ledakan dengan struktur yang diamati, tipe ledakan dapat dibedakan menjadi tiga (Karlos, V dan Solomos, G, 2013), yaitu:

1. Free-air bursts

Ledakan terjadi di udara, gelombang ledakan merambat secara spherical dan langsung mengenai struktur tanpa mengalami hambatan.

2. Air bursts

Ledakan terjadi di udara, gelombang ledakan merambat secara spherical menuju dan mengenai struktur setelah terjadi interaksi dengan tanah.

3. Surface bursts

Ledakan terjadi di permukaan tanah, gelombang ledakan langsung berinteraksi dengan tanah yang kemudian merambat secara spherical menuju struktur.

3. MENENTUKAN PARAMETER LEDAKAN

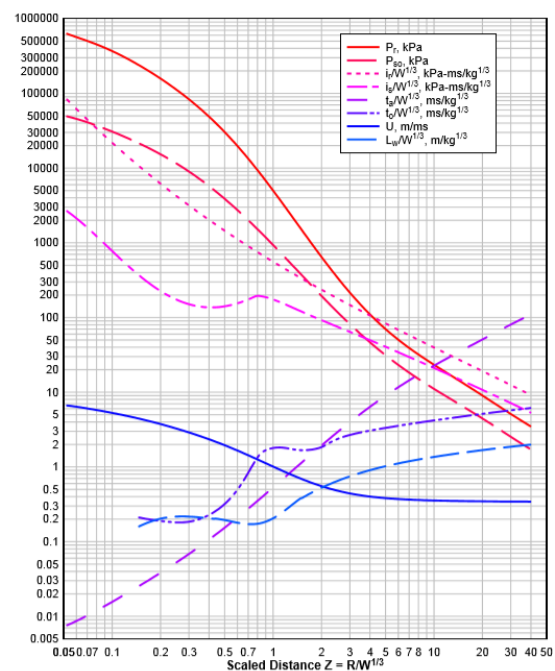
Untuk membentuk suatu fungsi pada beban ledakan diperlukan beberapa parameter yang harus dicari. Terdapat beberapa penelitian yang telah mengembangkan metode untuk menentukan parameter-parameter dari beban ledakan. Karlos, V dan Solomos, G (2013) menjelaskan cara untuk menentukan parameter-parameter beban ledakan dalam *JRC Technical Reports* yang berjudul *Calculation of blast*

Loads for Application to Structural Components.

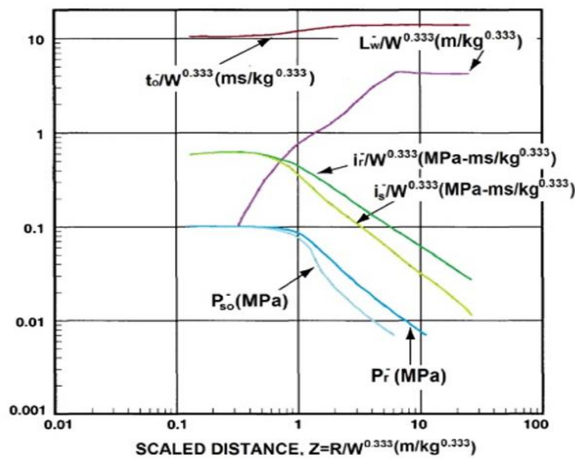
Dalam laporan tersebut dijelaskan cara-cara untuk mendapatkan parameter dari beban ledakan dengan menggunakan bantuan grafik. Parameter yang perlu dicari untuk membentuk fungsi beban ledakan yaitu *Scaled distance (Z)*, amplitudo fase positif (P_{so}), amplitudo fase negatif (P_{so}^-), durasi fase positif linier (t_{of}), durasi fase positif (t_o), durasi fase negatif (t_o^-) dan durasi fase negatif linier (t_{of}^-).

Terdapat beberapa pendekatan yang dapat digunakan untuk menentukan nilai tekanan maksimum dan minimum dari beban ledakan. Semua pendekatan yang ada merupakan fungsi dari *scaled distance (Z)*, dimana nilai Z tergantung dari jarak dan massa dari bahan peledak. Salah satu cara atau pendekatan yang dapat digunakan untuk menentukan parameter beban ledakan adalah yang diusulkan oleh Kingery-Bulmas (Karlos, V dan Solomos, G, 2013).

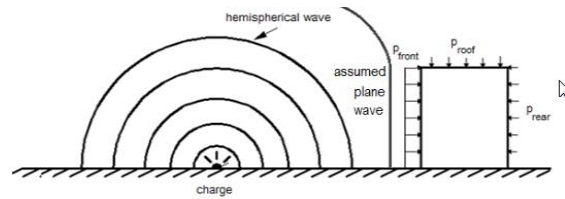
Untuk menentukan parameter beban ledakan baik fase positif dan negatif, Kingery-Bulmas menyajikannya dalam bentuk grafik dengan skala logaritma yang dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2. Dari kedua grafik tersebut dapat diperoleh amplitudo fase positif (P_{so}), amplitudo fase negatif (P_{so}^-), durasi fase positif (t_o), durasi fase negatif (t_o^-), dan nilai impuls fase positif i_s , dan impuls fase negatif (i_s^-) secara langsung.



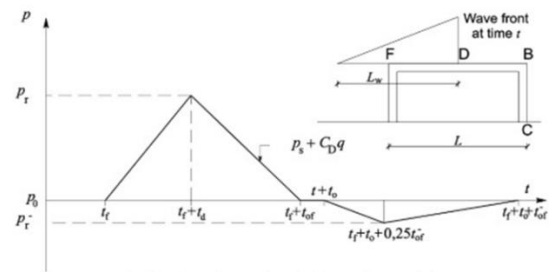
Gambar 1. Parameter Fase Positif akibat ledakan TNT dengan jenis ledakan Surface Burst (Karlos, V dan Solomos, G, 2013)



Gambar 2. Parameter Fase Positif akibat ledakan TNT dengan jenis ledakan Surface Burst (Karlos, V dan Solomos, G, 2013)



Gambar 3. Ilustrasi Beban Ledakan Pada Permukaan Tanah (Karlos, V dan Solomos, G, 2013)



Gambar 4. Beban pada atap bangunan (Draganic, H dan Sigmund, V, 2012)

4. TEKANAN PADA ROOF DAN DINDING SAMPING

Bagian depan struktur yang pertama kali terkena beban ledakan sebagai konsekuensi langsung dari gelombang ledakan yang terjadi. Ketika gelombang merambat, ia mengelilingi struktur yang menyebabkan tekanan naik di atap, sisi samping dan permukaan belakang. Seperti yang telah ditunjukkan, jika dinding samping dan atap struktur sejajar dengan arah gelombang ledakan, bagian tersebut mengalami tekanan berlebih sisi samping-atas yang sama dengan tekanan yang terjadi.

Fenomena kompleks terjadi, seperti diferensiasi nilai tekanan antara bagian depan dan bagian belakang atap atau permukaan dinding samping, yang dimulai sebagai hasil dari aliran gelombang di sekitar tepi bagian depan struktur. Biasanya detail-detail ini diabaikan dalam desain dan tekanan yang setara, waktu-ekuivalen yang berbeda diterapkan, yang nilai puncaknya PR diberikan oleh Persamaan (1).

Berdasarkan pendekatan ini durasi fase positif aktual (t_0) diganti dengan *fictitious time* (t_{of}) yang nilainya dapat dihitung menggunakan persamaan (1)

$$P_R = C_E P_{sof} + C_D q_{sof} \quad (1)$$

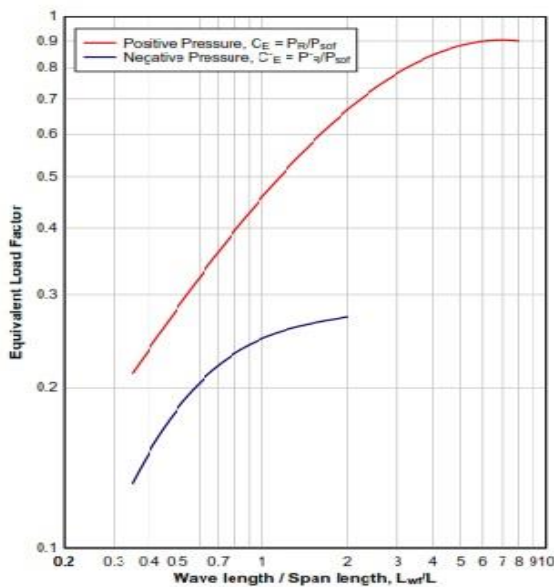
Dimana,

- P_{sof} = Tekanan yang terjadi pada point F dari tepi depan Atap
- C_E = Faktor Beban
- C_D = Faktor Drag
- q_{sof} = Tekanan dinamis yang berhubungan dengan $C_E P_{sof}$

Perlu dicatat bahwa difraksi yang terjadi ketika gelombang melalui sisi depan, menghasilkan penurunan tekanan pada sisi samping. Ini diperhitungkan dalam (II.68) dengan pengenalan faktor C_E , yang mengurangi beban yang bekerja pada permukaan dan tergantung pada rasio panjang gelombang ledakan terhadap panjang rentang permukaan (L_w / L). Panjang gelombang L_{wf} yang akan digunakan dalam gambar-gambar berikut sesuai dengan titik f (tepi depan atap), di mana tekanan berlebih adalah P_{sof} ; L_{wf} dapat ditentukan dari gambar 1.

Peak dynamic pressure [kPa]	Drag coefficient
0-170	-0.40
170-350	-0.30
350-900	-0.20

Gambar 5. Koefisien Drag C_D untuk Atap dan Dinding Samping (Karlos, V dan Solomos, G, 2013)



Gambar 6. Faktor Beban C_E untuk Fase Positif dan Negatif (Karlos, V dan Solomos, G, 2013)

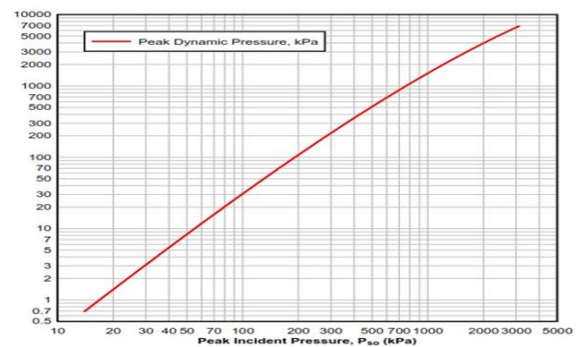
5. TEKANAN DINAMIK

Gelombang ledakan merambat di udara dengan kecepatan yang terus menurun yang lebih besar dari kecepatan suara. Udara di belakang bagian depan gelombang ledakan juga bergerak sepanjang arah yang sama seperti angin tetapi dengan kecepatan yang lebih kecil. Angin di belakang front gelombang ledakan menyebabkan beban yang terjadi pada permukaan struktur selama seluruh fase positif dan juga untuk waktu yang singkat sesudahnya. Tekanan yang dihasilkan dikenal sebagai tekanan dinamik atau drag $q(t)$.

Perbedaannya adalah bahwa kedua tekanan terjadi dan tekanan pantulan hanya bertahan untuk waktu yang sangat singkat

(biasanya jauh lebih sedikit dari satu detik), sedangkan tekanan dinamik dapat berlangsung untuk periode yang lebih lama (hingga 2-3 detik).

Gambar 7 menunjukkan variasi tekanan puncak dinamis sebagai fungsi dari nilai tekanan puncak yang terjadi. Tekanan dinamis tergantung pada kerapatan udara dan kecepatan angin di belakang gelombang ledakan, yang semuanya dipengaruhi oleh tekanan berlebih puncak yang terjadi. Nilai efektifnya lebih lanjut tergantung, melalui koefisien hambatan, pada orientasi permukaan sehubungan dengan arah angin ledakan.



Gambar 7. Variasi Tekanan Puncak Dinamis q_0 terhadap Tekanan Puncak yang

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

Terjadi (Karlos, V dan Solomos, G, 2013).

6. BERAT BAHAN PELEDAK

Berat bahan peledak biasanya diperkirakan dengan mempertimbangkan skenario serangan yang relevan yang melibatkan kendaraan atau perorangan. Semakin besar kendaraan yang dapat diarahkan ke suatu struktur, semakin besar bobot bahan peledak yang dapat ditimbulkannya sehingga menghasilkan nilai bobot TNT yang setara. Dalam gambar 8 disajikan perkiraan jumlah bahan peledak yang dapat diangkut oleh berbagai jenis kendaraan. Perencana dapat mengikuti peraturan yang relevan dan berkonsultasi dengan pemilik gedung untuk memutuskan jenis bahan peledak dan ukuran kendaraan yang mungkin dapat digunakan untuk melakukan aksi peledakan sehingga didapatkan beban ledakan yang sesuai.

Vehicle type	Charge mass / kg
Compact car trunk	115
Trunk of a large car	230
Closed van	680
Closed truck	2 270
Truck with a trailer	13 610
Truck with two trailers	27 220

Gambar 8. Estimasi Berat Bahan Peledak (Draganic, H dan Sigmund, V, 2012)

7. ANALISIS GERAKAN BEBAS

Persamaan gerak untuk pelat ortotropik (diperkaku pada salah satu arah) persegi empat yang teredam dan dibebani oleh beban dinamik dapat dinyatakan sebagai persamaan 2 berikut.

$$D_x \left(\frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^4} \right) + 2B \left(\frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^2 \partial y^2} \right) + D_y \left(\frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial y^4} \right) + \gamma h \left(\frac{\partial w(x,y,t)}{\partial t} \right) + \rho h \left(\frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial t^2} \right) = p_z(x,y,t) \quad (2)$$

Keterangan :

D_x = Kekakuan lentur (*flexural rigidity*) pelat ortotropik arah tegak lurus pengaku [Nm/rad/m³]

D_y = Kekakuan lentur (*flexural rigidity*) pelat ortotropik arah sejajar pengaku [Nm/rad/m³]

$$D_y = \frac{h^3}{12} \left(\frac{E_y}{1 - \nu_x \nu_y} \right) \quad (4)$$

B = Kekakuan torsi (*torsional rigidity*) pelat ortotropik [Nm/rad/m³]

$$B = \sqrt{D_x D_y} \quad (5)$$

E_x = Modulus elastisitas pelat arah x [N/m²]

E_y = Modulus elastisitas pelat arah y [N/m²]

ρ = Massa jenis [kg/m³]

h = Tebal pelat [m]

γ = Koefisien redaman [N.s/m]

$w(x,y,t)$ = Fungsi lendutan vertikal yang tergantung pada posisi (x,y) dan waktu (t) [m]

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

Persamaan trial function yang dipilih merupakan perkalian dua komponen, yaitu fungsi spasial atau posisi dan fungsi waktu. Defleksi transversal pelat sebagai fungsi posisi dan waktu dapat dinyatakan seperti pada persamaan (6)

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

Keterangan:

$W(x,y)$ = Fungsi posisi atau spatial function

ω = Frekuensi alami 37ertic

Persamaan (6) disubstitusikan ke dalam persamaan (2) dan untuk sementara nilai redaman dan ruas kanan diambil nol untuk menghasilkan persamaan (7) berikut ini.

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2B \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \rho h \omega^2 w = 0 \quad (7)$$

Pelat pada awalnya diasumsi memiliki syarat batas (*boundary condition*) sendi atau terletak sederhana. Kondisi ini tidak terdapat translasi 37ertical dan momen lentur pada keempat sisi pelat. Syarat batas untuk pelat seperti ini adalah sebagai berikut:

$$m(x,y) = -D_x \left[\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right] = 0 \text{ di } x = 0 \text{ dan } x = a \quad (8)$$

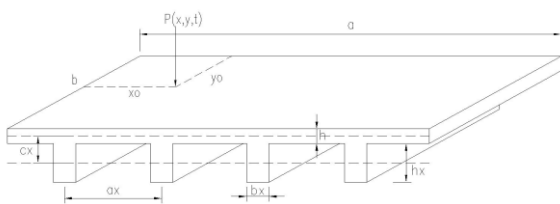
$$m(x,y) = -D_y \left[\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} \right] = 0 \text{ di } y = 0 \text{ dan } y = b \quad (9)$$

Pelat dengan syarat batas *partial fixity* pada sisi-sisinya akan terjadi momen lentur pada sisinya, nilai momen lentur tergantung pada kekakuan rotasi pada sisi-sisi tersebut. Syarat batas untuk kondisi *partial fixity* diperoleh dengan menggantikan persamaan (8) dan (9) menjadi persamaan (10) dan (11).

$$m(x,y) = -D_x \left[\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right] = k_1 \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} \text{ di } x = 0 \text{ dan } x = a \quad (10)$$

$$m(x,y) = -D_y \left[\frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} \right] = k_2 \frac{\partial w(x,y)}{\partial y} \quad \text{di } y = 0 \text{ dan } y = b \quad (11)$$

Dalam persamaan 10 dan 11 diatas, k_1 adalah konstanta elastik putaran sudut sepanjang sisi $x = 0$ dan $x = a$ dan k_2 adalah konstanta elastic putaran sudut sepanjang sisi $y = 0$ dan $y = b$. Berdasarkan persamaan gerak pelat serta syarat batas perletakan pelat, lantai bangunan yang dikenai beban ledakan dapat dianalisis sebagai sebuah pelat orthotropik persegi panjang yang diperkaku dengan balok anak seperti terlihat pada gambar:



Gambar 9. Pelat lantai bangunan yang dimodelkan sebagai sebuah pelat orthotropik persegi panjang (Szilard, R, 2004)

Tahap selanjutnya adalah memilih suatu trial function yang memenuhi syarat batas untuk kondisi terletak sederhana pada semua sisinya. Trial function yang memenuhi persamaan (8) sampai dengan (10) dinyatakan sebagai persamaan (12) ini.

$$W_{mn} = A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \quad (12)$$

Keterangan:

- A_{mn} = Koefisien besaran amplitudo lendutan
- m = Integer index untuk pola getar di arah x
- n = Integer index untuk pola getar di arah y
- a = Panjang pelat pada arah sejajar sumbu x
- b = Panjang pelat pada arah sejajar sumbu y

Persamaan trial function disubstitusikan ke dalam persamaan diferensial gerak untuk sistem pelat ortotropik dan dilakukan operasi aljabar untuk memperoleh persamaan (13) di bawah ini.

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\pi^4}{\rho h} \left[D_x \left(\frac{m}{a}\right)^4 + 2B \left(\frac{mn}{ab}\right)^2 + D_y \left(\frac{n}{b}\right)^4 \right] \quad (13)$$

Persamaan (13) di atas adalah persamaan untuk besaran eigenvalue untuk salah satu bentuk ragam struktur. Dengan menghitung akar positif dari nilai eigenvalue dapat diperoleh besaran frekuensi alami struktur. Persamaan untuk memperoleh eigenvalue di atas hanya berlaku untuk struktur dengan syarat batas terletak sederhana pada semua sisinya, sedangkan objek penelitian ini adalah struktur pelat dengan syarat batas yang Partial Fixity sehingga persamaan tersebut perlu dimodifikasi terlebih dahulu

8. MODIFIED BOLOTIN METHOD

Modified Bolotin Method adalah salah satu cara untuk menyelesaikan persamaan diferensial pelat dengan syarat batas semi-rigid dan juga dapat memperhitungkan pengaruh dari mode yang tinggi. Eigenvalue untuk pelat persegi panjang dengan kondisi semi-rigid pada semua sisinya dapat dicari dengan menganalogikan pelat tersebut sebagai pelat yang tertumpu sederhana pada semua sisinya. Nilai integer index untuk arah x dan arah y digantikan dengan koefisien p untuk pola getar arah x dan q untuk pola getar arah y. Nilai p dan q adalah bilangan riil yang diperoleh mencari solusi untuk masalah auxiliary. Persamaan eigenvalue untuk pelat dengan syarat batas partial fixity dinyatakan sebagai persamaan (14) berikut ini.

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\pi^4}{\rho h} \left[D_x \left(\frac{p}{a}\right)^4 + 2B \left(\frac{pq}{ab}\right)^2 + D_y \left(\frac{q}{b}\right)^4 \right] \quad (14)$$

Keterangan:

- p = Bilangan riil yang diperoleh dari solusi auxiliary pada arah x
- q = Bilangan riil yang diperoleh dari solusi auxiliary pada arah y

Nilai p dan q diperoleh menggunakan Modified Bolotin Method dengan menyelesaikan dua buah persamaan transcendental, satu untuk arah x dan . Kedua persamaan transcendental ini diperoleh dari determinan dua matriks yang memperhitungkan kondisi syarat batas untuk kedua arah x dan y. Karena pada proses mencari solusi untuk satu auxiliary hanya ditinjau salah satu arah dan pengaruh arah yang satu lagi terhadap arah

yang ditinjau tidak diperhitungkan, masalah ini dapat digolongkan sebagai tipe Levy. Untuk arah x dan y , masing-masing mempunyai masalah tipe Levy yang disebut sebagai auxiliary 1 dan auxiliary 2. Auxiliary 1 akan memberikan solusi fungsi pada posisi $X(x)$ di arah x sedangkan arah y hanya mengikuti gerakan harmonis, sedangkan auxiliary 2 akan memberikan solusi fungsi pada posisi $Y(y)$ di arah y sedangkan arah x hanya mengikuti gerakan harmonis.

9. HASIL NUMERIK

Pada penelitian ini menggunakan dua jenis beban ledakan sebesar 100kg dengan jarak R dari pusat ledakan kesisi bangunan sepanjang 15 meter dan 25 meter. Berikut hasil beban ledakan yang telah dihitung menggunakan grafik pada penjelasan diatas:

Notasi	Besaran	Besaran	Satuan	Keterangan
R	15	25	m	Jarak Ledakan terhadap Bangunan
Z	3,23	5,39	m kg/1,3)	Scaling laws
W	100	100	kg	Massa dari bahan peledak (Asumsi)
Pr	13300	6260	Newton /m ² [N/m ²]	Amplitudo fase positif
Pr-	1890	220	Newton/m ² [N/m ²]	Amplitudo fase negatif
ta	0	0	Detik [s]	Waktu awal beban
td	0,0049	0,0067	Detik [s]	Fase Positif I
tof	0,0098	0,0134	Detik [s]	Positive fictitious time
to	0,0133	0,0186	Detik [s]	Durasi fase linier positif + fase nol
tf+to + 0,25to-	0,0698	0,0673	Detik [s]	Fase Negatif I
tof-	0,0844	0,0743	Detik [s]	Negatif fictitious time

Tabel 1. Parameter-Parameter Beban Ledakan Pada Jarak 15 meter dan 25 meter.

Sumber: Olahan Sendiri

Untuk permodelan pelat lantai akan digunakan lima buah model sebagai berikut:

Model Pelat		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 1/R25
Notasi	Parameter [satuan]					
a	Panjang pelat [m]	8	8	8	8	8
b	Lebar pelat [m]	6	6	6	6	6
h	Tebal pelat [m]	0,25	0,25	0,20	0,25	0,25
n	Jumlah Pengaku	0	1	1	2	0
	Dimensi Pengaku	0	300x500	400x800	300x500	0

Tabel 2. Parameter Geometri dan Jumlah Pengaku Pelat Lantai.

Sumber: Olahan Sendiri

10. FREKUENSI ALAMI STRUKTUR

Salah satu langkah yang dikerjakan pada awal penelitian adalah mencari besaran frekuensi

alami (ω_n) untuk setiap model. Pada kenyataannya, terdapat satu nilai frekuensi alami untuk satu derajat kebebasan (degree of freedom) tetapi penelitian ini hanya membuat sampai 5 bentuk getar ragam untuk masing-masing arah x dan y , sehingga akan diperoleh 25 nilai frekuensi alami terkecil untuk setiap model.

Besaran frekuensi alami struktur dipengaruhi oleh geometri dan propertis material yang digunakan dalam pemodelan struktur. Dalam proses penurunan nilai frekuensi alami yang dijabarkan pada analisis getaran bebas, nilai redaman viskos dari struktur diabaikan. Nilai frekuensi alami alami dapat memberikan gambaran flexibility suatu struktur, semakin kecil nilai frekuensi alami, semakin fleksibel suatu struktur.

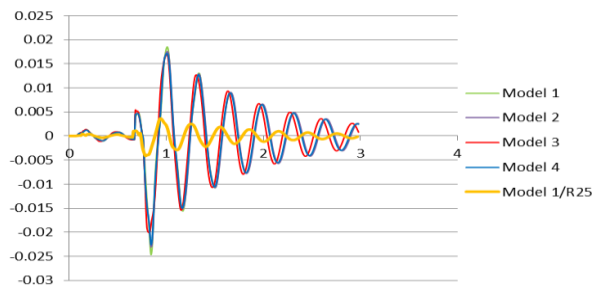
Berikut ini merangkum nilai auxiliary p dan q, serta nilai frekuensi alami dan periode alami untuk semua model pelat untuk 5 mode pertama dalam masing-masing arah ortogonal.

m	n	Frekuensi Alami dan Periode Alami Struktur																			
		Model 1				Model 2				Model 3				Model 4				Model 1/R25			
p	q	ω_n rad/s	T, s	p	q	ω_n rad/s	T, s	p	q	ω_n rad/s	T, s	p	q	ω_n rad/s	T, s	p	q	ω_n rad/s	T, s		
1	1	2,36	4,03	392,475	0,0026	2,32	4,04	392,639	0,0026	2,34	4,02	396,346	0,0026	2,29	4,10	392,165	0,0027	2,31	4,07	392,918	0,0027
1	2	1,19	1,47	464,742	0,0019	1,20	1,47	464,217	0,0019	1,21	1,46	466,593	0,0019	1,19	1,48	465,158	0,0019	1,20	1,47	466,152	0,0019
1	3	1,10	1,49	462,566	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019
1	4	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018
1	5	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018
2	1	2,36	4,03	392,475	0,0026	2,32	4,04	392,639	0,0026	2,34	4,02	396,346	0,0026	2,29	4,10	392,165	0,0027	2,31	4,07	392,918	0,0027
2	2	1,19	1,47	464,742	0,0019	1,20	1,47	464,217	0,0019	1,21	1,46	466,593	0,0019	1,19	1,48	465,158	0,0019	1,20	1,47	466,152	0,0019
2	3	1,10	1,49	462,566	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019
2	4	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018
2	5	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018
3	1	2,36	4,03	392,475	0,0026	2,32	4,04	392,639	0,0026	2,34	4,02	396,346	0,0026	2,29	4,10	392,165	0,0027	2,31	4,07	392,918	0,0027
3	2	1,19	1,47	464,742	0,0019	1,20	1,47	464,217	0,0019	1,21	1,46	466,593	0,0019	1,19	1,48	465,158	0,0019	1,20	1,47	466,152	0,0019
3	3	1,10	1,49	462,566	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019
3	4	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018
3	5	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018
4	1	2,36	4,03	392,475	0,0026	2,32	4,04	392,639	0,0026	2,34	4,02	396,346	0,0026	2,29	4,10	392,165	0,0027	2,31	4,07	392,918	0,0027
4	2	1,19	1,47	464,742	0,0019	1,20	1,47	464,217	0,0019	1,21	1,46	466,593	0,0019	1,19	1,48	465,158	0,0019	1,20	1,47	466,152	0,0019
4	3	1,10	1,49	462,566	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019
4	4	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018
4	5	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018
5	1	2,36	4,03	392,475	0,0026	2,32	4,04	392,639	0,0026	2,34	4,02	396,346	0,0026	2,29	4,10	392,165	0,0027	2,31	4,07	392,918	0,0027
5	2	1,19	1,47	464,742	0,0019	1,20	1,47	464,217	0,0019	1,21	1,46	466,593	0,0019	1,19	1,48	465,158	0,0019	1,20	1,47	466,152	0,0019
5	3	1,10	1,49	462,566	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019	1,10	1,49	462,540	0,0019
5	4	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018	1,00	1,51	458,238	0,0018
5	5	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018	1,06	1,50	464,6	0,0018

Tabel 3. Frekuensi Alami dan Periode Alami Semua Model
Sumber: Olahan Sendiri

11. RIWAYAT WAKTU (TIME HISTORY) DEFLEKSI PELAT

Semua model pelat pada penelitian ini dibebani dengan beban dinamik yang berupa ledakan pada permukaan tanah, sehingga besaran beban akan berubah terhadap waktu dan begitu waktu pula untuk respons struktur. Lendutan pelat pada tengah bentang diplot terhadap waktu sehingga dapat menghasilkan riwayat waktu defleksi pelat tersebut dalam durasi tertentu. Durasi waktu yang ditampilkan adalah waktu dari 0 detik sampai 0,30s sehingga semua fase beban dapat ditampilkan.



Gambar 10. Time History Lendutan Akibat beban ledakan pada permukaan tanah.

Dari riwayat waktu lendutan terlihat bahwa semua model struktur adalah *under-damped* karena pada fase *free vibration* amplitudo lendutan berkurang secara bertahap dan akan mencapai lendutan nol setelah beberapa siklus. Hal ini sesuai teori dinamika struktur yang menyatakan struktur dengan rasio redaman kurang dari satu adalah underdamped. Dari hasil analisis lendutan terlihat model 3 memiliki lendutan yang paling kecil dengan beban ledakan pada jarak 15 meter dari bangunan dibandingkan dengan model 1,2 dan 4 memiliki besaran lendutan yang hampir sama. Pada model 5 terlihat lendutan yang terjadi akibat beban ledakan pada permukaan tanah pada jarak 25 meter dari bangunan berkurang drastis apabila dibandingkan dengan model 1 dengan beban ledakan pada permukaan tanah pada jarak 15 meter.

12. LENDUTAN MAKSIMUM ABSOLUT

Lendutan maksimum absolut adalah defleksi terbesar yang timbul pada pelat selama durasi pembebanan dan setelah beban sudah tidak bekerja lagi (*free vibration*). Nilai lendutan maksimum absolut bersifat kritis karena ini adalah respons yang paling besar yang mungkin terjadi pada struktur, sehingga perlu diperiksa apakah besaran ini tetap memenuhi syarat *service-ability* dan asumsi-asumsi dalam analisis yang ditetapkan.

Model	Model1		Model2		Model3		Model4		Model1/R25	
	Maksimum [m]	Minimum [m]	Maksimum [m]	Minimum [m]	Maksimum [m]	Minimum [m]	Maksimum [m]	Minimum [m]	Maksimum [m]	Minimum [m]
Fase Positif 1	0.0000190	0.000000	0.0000190	0.000000	0.0000180	0.000000	0.0000190	0.000000	0.0000138	0.000000
Fase Positif 2	0.000145	0.000001	0.000145	0.000006	0.000173	0.000020	0.000147	0.000006	0.000108	0.000018
Fase-Nol	0.0006286	0.000305	0.0006286	0.000305	0.000746	0.000390	0.000636	0.000302	0.000418	0.000091
Fase Negatif 1	0.001250	-0.000989	0.001250	-0.000989	0.00138	-0.001120	0.001237	-0.000982	0.000420	-0.000351
Fase Negatif 2	0.004000	-0.000460	0.004000	-0.000460	0.005000	-0.016900	0.004683	-0.000512	0.001109	0.000106
Getaran Bebas	0.0175	-0.023200	0.0175	-0.023200	0.0169	-0.020000	0.017196	-0.022647	0.003645	-0.004168

Tabel 4. Lendutan Absolut Akibat Beban Ledakan Pada Permukaan Tanah. Sumber: Olahan Sendiri

Dari tabel diatas terlihat model 3 memiliki lendutan Maksimum Absolut yang lebih kecil dibandingkan dengan model 1, model 2 dan model

4. Sedangkan untuk model 1 dan 3 memiliki lendutan yang sama. Untuk model 4 memiliki lendutan yang lebih kecil dari model 1 dan model 2. Pada model 5 dengan beban ledakan pada jarak 25meter dari permukaan tanah dari bangunan lendutan yang terjadi berkurang secara signifikan sebesar 82% jika dibandingkan dengan lendutan yang terjadi pada model 1.

13. TEGANGAN UTAMA MAKSIMUM (MAXIMUM PRINCIPLE STRESSES)

Tegangan utama maksimum adalah tegangan normal maksimum pada saat orientasi partikel diubah sehingga nilai tegangan geser adalah nol. Besaran dan arah tegangan utama maksimum dihitung dengan persamaan yang diperoleh oleh teori Mohr.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \tag{15}$$

$$\tan 2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \tag{16}$$

Model	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4		Model 1/R25	
	Maksimum [mPa]	Minimum [mPa]	Maksimum [mPa]	Minimum [mPa]	Maksimum [mPa]	Minimum [mPa]	Maksimum [mPa]	Minimum [mPa]	Maksimum [mPa]	Minimum [mPa]
Fase Positif 1	0.001373	0.000000	0.000971	0.000000	0.000673	0.000000	0.0010	0.000000	0.0006	0.0000
Fase Positif 2	0.002800	-0.000216	0.003240	0.000148	0.004587	0.001217	0.003259	0.000183	0.005051	0.001022
Fase-Nol	0.016213	0.002321	0.017884	0.022612	0.009475	0.000390	0.017985	0.004663	0.019580	0.005931
Fase Negatif 1	0.036870	-0.004380	0.028366	-0.003246	0.030125	-0.004031	0.028901	-0.003304	0.014817	-0.001860
Fase Negatif 2	0.165714	0.001996	0.119850	0.002771	0.160884	-0.005570	0.122158	0.002922	0.044756	0.006730
Getaran Bebas	0.500181	-0.130020	0.322314	-0.096430	0.327711	-0.088894	0.32667	-0.09764	0.112785	-0.03032

Tabel 5. Tegangan Utama Maksimum dan Minimum Pada Setiap fase Pembebanan. Sumber: Olahan Sendiri

Berdasarkan Hasil analisis tegangan akibat beban ledakan pada permukaan tanah terlihat tegangan terbesar pada semua model terjadi pada saat fase getaran bebas ketika beban ledakan menghilang. Model 1 memiliki Nilai tegangan maksimum yang paling besar yaitu sebesar 0.5 Mpa dibandingkan dengan model lainnya. Untuk Model 2 sebesar 0.322 Mpa, Model 3 sebesar 0.327 Mpa dan Model 4 sebesar 0.326 Mpa memiliki nilai tegangan maksimum yang hampir sama besarnya.

Tegangan maksimum pada fase negative pertama memiliki nilai tegangan kedua terbesar setelah fase getaran bebas. Pada fase ini Model 1 memiliki nilai tegangan yang paling besar yaitu sebesar 0.0368 Mpa. Sedangkan Model 2 dan model 4 memiliki nilai tegangan yang hampir sama yaitu sebesar 0.028 Mpa. Untuk model 3 memiliki tegangan maksimum sebesar 0.03 Mpa. Pada

model 5 dengan beban ledakan pada permukaan tanah pada jarak 25 meter dari bangunan tegangan maksimum yang terjadi berkurang secara signifikan sebesar 77% jika dibandingkan dengan model 1 dengan beban ledakan yang terjadi pada permukaan tanah pada jarak 15 meter dari bangunan.

14. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis respons beberapa macam pelat terhadap beban ledakan setempat yang telah dikerjakan pada penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan Analisis untuk beban ledakan dengan berat 100 kg pada jarak 15 meter untuk konfigurasi pelat lantai dengan panjang delapan meter dan lebar 6 meter tanpa pengaku di tengah bentang membutuhkan ketebalan pelat minimum 250 milimeter. Untuk pelat lantai dengan pengaku lebar 400 milimeter dan tinggi 800 milimeter pada tengah bentang dapat mereduksi ketebalan pelat lantai menjadi 200 milimeter. Berdasarkan hasil analisis, nilai frekuensi alami pelat untuk Model 1, Model 2, Model 3, Model 4 dan Model 1/R25 berturut-turut adalah 191.47 rad/s, 190.86 rad/s, 196.05 rad/s, 191.93 rad/s dan 209.9 rad/s. Dengan demikian penambahan pengaku dengan dimensi lebar 300mm dan tinggi 500mm pada panel pelat panjang 8 meter dan lebar 6 meter tidak memiliki pengaruh untuk meningkatkan respon pelat lantai terhadap lendutan. Begitupun dengan penambahan dua pengaku dengan dimensi lebar 300mm dan tinggi 500mm tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan respon pelat bila dibandingkan dengan pelat dengan konfigurasi dan ketebalan yang sama tanpa pengaku. Pelat dengan satu pengaku dengan dimensi lebar 400mm dan tinggi 800mm memberikan dampak yang signifikan dalam meningkatkan respon pelat dan dapat mereduksi ketebalan pelat dari 250mm menjadi 200mm dengan respon yang jauh lebih baik.
2. Dengan pemodelan beban ledakan yang memperhitungkan fase positif, fase nol, dan fase negatif, lendutan pelat terbesar terjadi setelah fase negatif. Hal ini terbukti dari pengukuran respons lendutan pada setiap kasus yang diteliti. Walaupun beban sudah tidak bekerja lagi pada pelat, initial condition yang terjadi akibat akhir durasi

pembebanan fase sebelumnya ternyata dapat menyebabkan nilai lendutan yang lebih besar dibandingkan lendutan selama durasi ledakan.

3. Penambahan satu atau dua pengaku dengan dimensi kecil tidak memberikan dampak untuk meningkatkan respon pelat terhadap lendutan dibandingkan dengan pelat dengan konfigurasi dan ketebalan yang sama tanpa pengaku. Penambahan pengaku dengan dimensi yang cukup mampu mereduksi ketebalan pelat dan memberikan respon yang lebih baik terhadap lendutan.
4. Penambahan Pengaku pada pelat lantai dapat mengurangi tegangan maksimum dan minimum yang terjadi sebesar 35%.
5. Jarak ledakan yang terjadi terhadap bangunan sangat berpengaruh terhadap lendutan dan tegangan yang terjadi pada pelat lantai atap. Bila dibandingkan ledakan pada jarak 15 meter dengan ledakan pada jarak 25 meter. Lendutan pada pelat lantai atap dengan jarak ledakan 25 meter dari bangunan berkurang sebesar 80% dan tegangan maksimum yang terjadi berkurang 77%.

DAFTAR RUJUKAN

- Alisjahbana, S.W. (2011). *Dinamika Struktur Pelat II*, UB Press, ISBN 978-95879-4-8.
- Alisjahbana, S.W. and Wiratman Wangsadinata (2015). *Behavior of the Orthotropic Stiffened Plate Subjected to Localized Blast Load*, WiTness Press, Jakarta, Indonesia.
- Alisjahbana, S.W. and Wiratman Wangsadinata (2009). *Dynamics Response of Stiffened Orthotropic Plate Subjected to Blast Loading*, in 8th International Conference on SHOCK & IMPACT LOADS ON STRUCTURES, Adelaide, Australia.
- Chopra, A.K. (2012). *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
- Draganic, Hrvoje and Vladimir Sigmund (2012). *Blast Loading On Structures*, J.J Strossmayer University of Osijek Faculty of Civil Engineering, Croatia.
- Karlos, V. dan Solomos, G. (2013). *Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components*, JRC Technical Reports, Italy.
- Szilard, R. (2004). *Theories and Applications of Plate Analysis: Classical, Numerical, and Engineering Methods*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

Timoshenko, S. (1951). Theory of Elasticity 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.

Wight, J.K. (2016). Reinforced Concrete Mechanics and Design Seventh Edition, Pearson Education, Inc., Hoboken, New Jersey.