Spirit of Civil Engineering (SPRING) Journal
Journal ISSN: 2528-6234

Artikel

Perilaku Dinamik Pelat Lantai Dasar Di Atas Lapisan Pendukung Modifikasi Pasternak Akibat Beban Ledakan 6 Fase

Dhebi Tri Astuti[1] dan Sofia W. Alisjahbana[1,*]

[1]*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Bakrie, Jl. H. R. Rasuna Said, Kuningan, DKI Jakarta, 12940, Indonesia*

[*] Korespondensi: sofia.Alisjahbana@bakrie.ac.id

Abstrak

Perencanaan bangunan semakin maju seiring berkembangnya jaman. Manusia menjadi lebih terbuka untuk memikirkan berbagai kemungkinan ancamanancaman apa saja yang bisa terjadi dan melakukan pencegahan demi mengurangi akibat yang dapat ditimbulkan oleh ancaman tersebut. Melihat kembali ke belakang banyak sekali terjadi peristiwa gedung roboh dikarenakan sebuah ledakan. Apabila berfokus pada gedung maka pelat menjadi pilihan untuk diperkuat guna mengurangi dampak ledakan. Penentuan dimensi pelat sendiri ditentukan berdasarkan berapa banyak beban yang harus ditanggung. Pada penelitian ini pelat yang dianalisis adalah pelat orthotropik semi rigid di atas lapisan pendukung modifikasi Pasternak. Untuk mengetahui respons dinamik yang ditimbulkan pada pelat divariasikan ketebalan pelat dan durasi ledakan setempat. Metode analisis yang digunakan adalah Modified Bolotin Method (MBM) dan menggunakan program Wolfram Mathematica.

Kata Kunci: Black water, Grey Water, IPAL, Pencemaran Lingkungan
Pelat, Modified Bolotin Method (MBM), lapisan pendukung modifikasi Pasternak, beban ledakan, respons dinamik

1 Pendahuluan

Perencanaan sebuah bangunan seperti gedung kini semakin maju seiring berkembangnya jaman, sekarang dalam perencanaannya lebih memperhatikan faktor-faktor yang dulunya seringkali terabaikan. Manusia menjadi lebih terbuka untuk memikirkan berbagai kemungkinan ancamanancaman apa saja yang bisa terjadi dan melakukan pencegahan demi mengurangi bahkan menghilangkan akibat yang dapat ditimbulkan oleh ancaman tersebut. Melihat kembali ke belakang banyak sekali terjadi peristiwa gedung roboh dikarenakan sebuah ledakan. Dimana ledakan itu sendiri berasal dari dalam gedung maupun luar gedung dengan efek ledakan yang berbeda pada lokasi-lokasi yang terdampak.

Para ahli struktur melakukan berbagai upaya untuk mengurangi dampak dari ledakan terhadap gedung-gedung yang berada di jangkauan ledakan. Apabila berfokus pada gedung tinggi maka pelat menjadi pilihan untuk diperkuat guna mengurangi dampak sebuah ledakan. Hal ini dikarenakan pelat adalah komponen struktur yang secara matematis perencanaan maupun di lapangan pasti sebagai bagian yang pertama kali menerima beban-beban yang ada seperti beban mati, beban hidup, dan beban-beban yang lain seperti beban angin, gempa, dan ledakan. Penentuan dimensi pelat sendiri salah satunya seperti disebutkan sebelumnya ditentukan berdasarkan beban yang harus ditanggung.

Pelat berdasarkan sifat bahannya dikategorikan menjadi 3 macam yaitu pertama pelat isotropik yang mempunyai sifat elastis yang sama arah atau mempunyai keluatan lentur yang sama dari segala arah. Selanjutnya ada pelat anisotropik yang mempunyai sifat elastis yang tidak teratur dari seluruh/segala arahnya dan untuk tugas akhir ini khusus menggunakan tipe pelat orthotropik yang mempunyai sifat homogen dan kekuatan lentur yang berbeda pada arah x dan y atau arah tegak lurusnya. Pemodelan ini selaras dengan keadaan di lapangan pada pelat bangunan gedung.

Penelitian dilakukan guna menemukan solusi terbaik yang dapat diimplementasikan pada struktur pelat lantai gedung yang akan langsung menerima efek pertama menahan beban ketika terdampak ledakan. Peneliti membuat perencanaan mengenai respon beban ledakan yang mana merupakan beban dinamik. Beban ledakan dinyatakan membebani suatu struktur di luar kondisi biasa struktur tersebut sehingga perhitungannya berbeda dengan perencanaan gedung-gedung biasa. Pada tahun 2004 Alisjahbana, S.W. menyampaikan hasil penelitiannya melalui paper yang berjudul “Dynamic Response of Clamped Orthotropic Plates to Dynamic Moving Loads” yang kemudian dijadikan salah satu referensi oleh Gigibaye dalam penelitiannya yang membahas respon dinamik di atas inertial soil atau dapat disebut sebagai lapisan pendukung modifikasi Pasternak.

Pemodelan lapisan pendukung sendiri ada berbagai macam pertama yang paling sederhana adalah lapisan pendukung model Winkler yang memodelkan keseluruhan tanah sebagi lapisan pegas linear. Pemodelan ini merupakan pemodelan yang paling sederhana dan memiliki beberapa keterbatasan

seperti beban yang diterapkan pada pelat berupa beban statis dan terdapat diskontinuitas defleksi antara bagian pelat perkerasan yang tidak diisi dan pelat yang diisi (Gigibaye 2016). Terdapat pemodelan lapisan pendukung Pasternak dimana pada lapisannya ditambahkan parameter asumsi lapisan geser diatas lapisan pegas linear yang membuat pemodelan ini lebih akurat dibandingkan Winkler. Kemudian ada pemodelan Kerr dimana terdapat 3 lapisan terdiri dari lapisan pegas linear diantara lapisan geser yang berada di tengah. Pemodelan Pasternak sendiri sudah mampu memberikan hasil yang baik namun apabila ditambahkan parameter m0 atau inersia tanah maka akan memberikan hasil yang lebih akurat. Penambahan m0 sendiri merupakan modifikasi Pasternak yang dapat disebut juga sebagai model Inertial soil yang dipopulerkan oleh Gigibaye.

Penelitian ini secara khusus menggunakan pemodelan lapisan pendukung modifikasi Pasternak dengan penambahan parameter m0 atau bisa disebut sebagai pemodelan lapisan pendukung Inertial soil dengan model perletakan semi rigid yang dinilai lebih mewakili kondisi di lapangan. Beban ledakan yang diberikan mengacu pada penelitian Vasilis Karlos dan George Solomos tahun 2013 dengan judul "Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components". Pada tugas akhir ini akan dilakukan pengecekan respons dinamik pelat lantai bawah ketika diberi beban ledakan sebanyak 6 fase di atas lapisan pendukung dengan pemodelan modifikasi atau penambahan parameter m0 pada Pasternak. Ledakan terjadi dalam radius tertentu dari struktur gedung sehingga letak seberapa jauh dan durasi ledakan sangat berpengaruh pada tingkat beban ledakan yang diterima oleh pelat.

2 Metode

2.1 Teori Pelat

Pada penelitian ini diperlukan kajian studi dengan mengetahui keadaan Pelat adalah bagian dari lantai yang merupakan pembatas antara tingkat satu dengan tingkat yang lainnya dalam suatu bangunan bertingkat. Menurut Szilard dapat dikatakan pelat mempunyai ketebalan h dimana ketebalannya jauh lebih kecil dibandingkan dimensi struktur lainnya dan dikatakan sebagai suatu struktur yang mempunyai bidang permukaan yang lurus, datar, dan tidak melengkung. Ahli pertama yang melakukan pendekatan matematis pada teori membran pelat adalah Euler pada tahun 1766. Pendekatan ini berhasil memecahkan permasalahan getaran bebas pada membran elastis berbentuk persegi dan melingkar yang dimana menggunakan analogi balok silang.

Setelah beberapa tahun berlalu akhirnya terpecahkan persamaan diferensial yang benar untuk getaran bebas pelat yang dikemukakan oleh Lagrange (1813). Lagrange berhasil memperbaiki pekerjaan Shopie Germain yang telah menemukan persamaan diferensial getaran pelat dengan variasi kalkulus namun kurang pada bagian penjelasan kinerja yang dilakukan puntiran permukaan tengah (Katili, 2003).

Berdasarkan strukturalnya apabila memperhatikan rasio panjang dan tebal pelat dapat dibagi menjadi 5 jenis (Szilard, 1989):

1. Pelat kaku Merupakan pelat tipis dengan tegangan lentur yang dapat menopang beban dengan aksi dua dimensi. Pelat ini juga dapat menopang momen lentur dan torsi, serta gaya geser lateral dimana umumnya sama dengan balok. Pelat ini memiliki nilai rasio perbandingan $\frac{h}{L} = \frac{1}{50} - \frac{1}{10}$.
2. Pelat membran Merupakan pelat tipis yang tidak memiliki tegangan lentur namun dapat menopang beban lateral dengan gaya geser aksial dan terpusat. Pelat ini memiliki ketebalan yang cenderung sangat tipis sehingga daya tahan momennya dapat diabaikan. Pelat ini memiliki rasio perbandingan antara $\frac{h}{L} < \frac{1}{30}$.
3. Pelat tebal Merupakan pelat tipis yang berupa gabungan antara pelat kaku dan pelat membran. Kondisi tegangan pelat ini sama dengan kondisi kontinyu tiga dimensi. Pelat ini memiliki rasio perbandingan antara $\frac{h}{L} < \frac{1}{5}$.
4. Pelat cukup tebal Merupakan pelat tipis yang memiliki tegangan lentur yang dapat menopang beban dengan aksi 2 dimensi dan menyerupai kondisi kontinyu tiga dimensi. Pelat ini juga dapat menopang momen dalam lentur dan puntir. Pelat ini memiliki pengecualian bahwa efek dari gaya transversal pada komponen tegangan normal tidak diperhitungkan. Pelat ini memiliki rasio perbandingan $\frac{h}{L} = \frac{1}{10} - \frac{1}{5}$.
5. Pelat flexibel Merupakan pelat tipis yang terdiri dari kombinasi pelat kaku dan pelat membran dan dapat mendukung beban eksternal dengan aksi gabungan momen lentur, gaya geser transversal, dan gaya geser pusat serta mampu memikul gaya aksial.

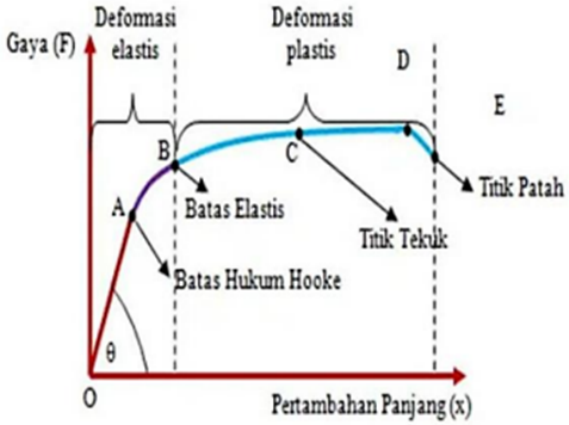
Berdasarkan sifat-sifat bahannya, pelat dapat dikategorikan dalam tiga jenis yaitu:

1. Pelat isotropik Merupakan pelat yang memiliki sifat elastis bahan atau dapat dikatakan memiliki kekuatan lentur yang sama pada segala arah sehingga memiliki sifat elastis bahan pelat yang seragam.
2. Pelat anisotropik Merupakan pelat yang sangat berkebalikan dengan pelat isotropik dimana pelat ini memiliki kekuatan lentur yang tidak teratur atau tidak seragam pada segala arahnya.
3. Pelat orthotropik Merupakan pelat yang memiliki kekuatan lentur yang berbeda pada arah yang saling tegak lurus. Pelat ini memiliki sifat bahan homogen dan biasanya pengaplikasiannya pada pelat jaringan balok silang, jembatan baja, dan landasan pacu.

2.2 Teori Elatisitas

Merupakan teori yang sangat penting dalam bidang fisika keteknikan. Teori ini mengkaji hubungan antara gaya, perpindahan, tegangan, dan regangan dalam benda elastis. Elastisitas sendiri merupakan kemampuan yang dimiliki benda untuk kembali ke kondisi awal saat gaya yang diberikan pada benda tersebut dihilangkan. Pada dasarnya, semua benda di bumi mengalami deformasi jika diberikan gaya tertentu, tetapi efeknya mungkin berbeda ketika gaya tertentu diterapkan, sehingga beberapa benda kembali ke bentuk aslinya dan yang lain kembali ke bentuk baru.

Benda yang memiliki sifat elastis seperti karet gelang, pegas, per, dll. Benda yang memiliki sifat plastis berkebalikan sifatnya dengan benda elastis seperti di atas. Benda plastis ketika diberi gaya dan mengalami deformasi maka tidak akan kembali ke kondisi semula ketika gaya yang diberikan ditiadakan. Menurut Timoshenko (1974) semua material struktural memiliki elastisitas sampai batas tertentu. Apabila terdapat gaya eksternal yang membuat deformasi struktur dimana tidak melebihi batas tertentu, perubahan atau deformasi yang terjadi akan hilang ketika gaya yang bekerja di hilangkan (dapat dilihat pada **Gambar 1**).



Gambar 1. Grafik Hubungan Gaya dan Pertambahan Panjang

2.3 Hukum Hooke

Hukum ini berbunyi, perubahan panjang suatu benda berbanding lurus dengan gaya/beban yang diterimanya (Robert Hooke, 1660). Hukum ini menyelidiki hubungan antara gaya yang bekerja pada benda elastis seperti pegas supaya benda tersebut dapat kembali ke keadaan awal dan tidak melampaui batas elastisitasnya.

Dalam struktur bangunan ketika diberi sebuah gaya dan terjadi suatu deformasi diharapkan masih dalam batas elastis sehingga struktur dapat kembali pada bentuk/posisi semula dengan aman. Apabila gaya yang diterima terlalu besar dan struktur memasuki fase plastis maka tidak dapat kembali ke bentuk/posisi semula dan dikhawatirkan akan memasuki fase selanjutnya yaitu fase struktur yang tidak mampu lagi menahan beban yang diterima sehingga mengalami kegagalan struktur seperti keruntuhan/roboh (dapat dilihat pada **Gambar 2**).

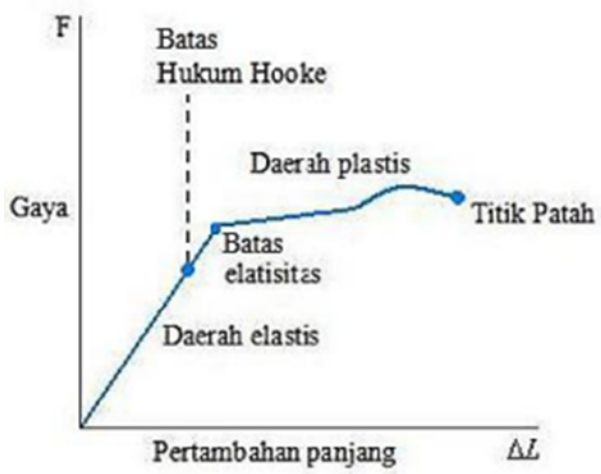
Sesuai dengan Hukum Hooke dimana dinyatakan hubungan antara tegangan dan regangan adalah linear. Persamaan tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1}$$

dimana σ ialah tegangan (N/m^2). E ialah Modulus eleastisitas (Young's modulus) (N/m). ε ialah Regangan

2.4 Teori Lapisan Pendukung

Defleksi yang terjadi pada pelat tidak hanya disebabkan oleh gaya luar yang bekerja pada pelat saja namun faktor tanah yang

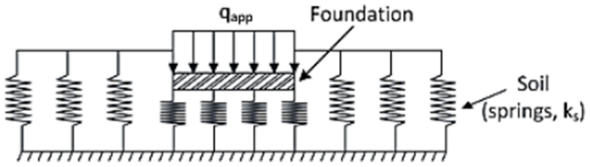


Gambar 2. Grafik Batas Hukum Hooke

berada di bawah pelat pun berdampak pada besarnya gaya yang diterima pelat secara total. Dengan demikian diperlukan pemodelan lapisan pendukung tanah yang mampu mendeskripsikan gaya-gaya apa saja yang berada di lapisan pendukung tersebut. Contoh pemodelan lapisan tanah sebagai berikut:

1. Lapisan Pendukung Winkler

Merupakan pemodelan lapisan pendukung yang sederhana karena mengasumsikan tanah itu hanya berupa kekakuan pegas linear arah vertikal yang independen satu sama lain dan tidak ada kontinuitas karena kurangnya interaksi antara pegasnya. Kekakuan pegas tersebut dinyatakan menjadi koefisien kekakuan pegas (kf) dalam perhitungan matematisnya. Pemodelan ini berdasarkan pada hipotesis Winkler yang dimana disebutkan bahwa defleksi pada titik permukaan elastis menerus proporsional dengan beban yang diterapkan ke permukaan tertentu dan tidak bergantung pada beban yang diterapkan di titik lainnya yang berada di permukaan, seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 3**.

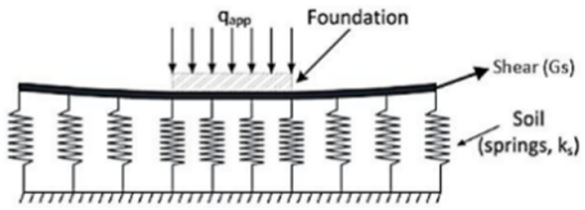


Gambar 3. Pemodelan lapisan lapisan pendukung Winkler

2. Lapisan Pendukung Pasternak

Merupakan pemodelan lapisan pendukung yang disebut lapisan pendukung dua parameter karena terdiri dari lapisan geser (Gs) dan kekakuan pegas (kf). Interaksi geser antara elemen pegas diasumsikan dapat dicapai dengan menghubungkan ujung pegas ke pelat yang mengalami deformasi geser transversal. Hubungan load deflection diperoleh dengan mempertimbangkan keseimbangan vertikal dari lapisan geser. Terdapat

kontinuitas dengan adanya pemodelan lapisan geser di atas kekakuan pegas, seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4**.



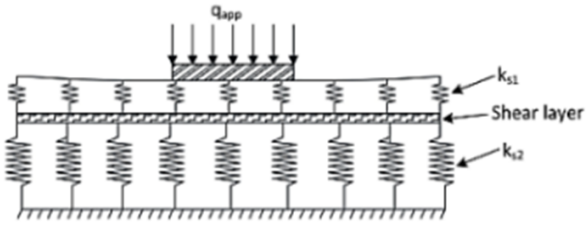
Gambar 4. Pemodelan lapisan lapisan pendukung Pasternak

3. Lapisan Pendukung Modifikasi Pasternak

Merupakan pemodelan lapisan pendukung dengan modifikasi Pasternak penambahan parameter inersia tanah yang dilambangkan (m0). Faktor inersia tanah sendiri merupakan parameter dalam tanah yang mampu memberikan daya dukung akibat beban dinamik yang diterima tanah berdasarkan kedalaman tanahnya. Pemodelan ini berdasarkan model Pasternak-Vlasov yang memperhitungkan penurunan logaritmik tanah digunakan oleh Rahman dan Anam dengan metode finite element. Studi tersebut menunjukkan bahwa Pasternak-Vlasov lebih ekonomis daripada Winkler. Melalui studi yang panjang oleh para ahli ditemukanlah modifikasi Pasternak-Vlasov dengan memperkenalkan inersia tanah sampai kedalaman tanah yang rentan terhadap gaya dinamik yang diberikan pada struktur. Secara keseluruhan lapisan pendukung modifikasi Pasternak dimodelkan dengan tiga parameter yaitu kekakuan pegas (kf), lapisan geser (Gs), dan faktor inersia (m0) (Gigibaye, 2016).

4. Lapisan pendukung Kerr

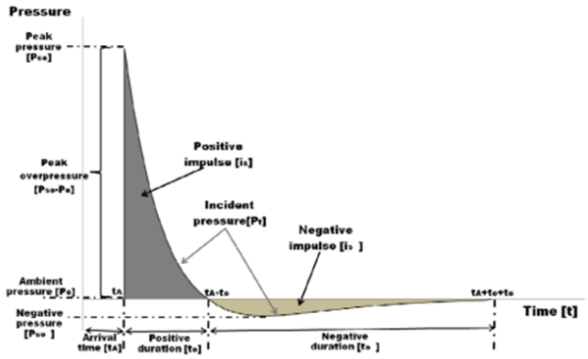
Merupakan pemodelan lapisan pendukung yang merupakan gabungan Winkler dan Pasternak dimana terdapat dua lapisan kekakuan pegas diantara lapisan geser. Pemodelan ini dirasa paling mendekati atau akurat sesuai keadaan di lapangan, seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Pemodelan lapisan lapisan pendukung Kerr

2.5 Teori Ledakan

Tujuan utama pengembangan-pengembangan teori ledakan adalah untuk mengetahui pengaruh beban ledakan dan berapa kekuatan struktur yang dibutuhkan untuk mampu menahan beban ledakan tersebut. Menurut Karlos, Vasilis,. Solomos, George (2013) diperlukan perhitungan skenario ledakan tertentu pada tiap kasus yang berbeda-beda meliputi jenis dan berat bahan peledak kemudian jarak dan geometri area dari sumber ledakan. Melalui perhitungan yang matang dapat ditentukan kekokohan struktur bangunan yang cukup untuk bertahan dari efek ledakan.



Gambar 6. Riwayat waktu tekanan ledakan yang ideal

Gambar 6 menunjukkan profil ideal tekanan yang berkaitan dengan waktu kasus ledakan udara bebas dimana mencapai titik pada jarak tertentu dari ledakan. Terdapat dua fase dalam ledakan yaitu fase positif dimana lebih besar daripada nilai ambien dan fase negatif yang lebih kecil daripada nilai ambien. Melalui gambar di atas dapat dilihat bahwa fase negatif lebih panjang dibandingkan fase positif. Ketika terjadi fase negatif struktur dikenakan gaya hisap yang menjadi alasan kegagalan fasad ditemukan di luar gedung bukan di bagian interiornya (Karlos, Vasilis,. Solomos, George 2013).

2.6 Teori Modified Bolotin Method (MBM)

Metode efek tepi dinamis, atau Bolotin Method, diperkenalkan pertama kali pada tahun 1960 untuk menyelesaikan masalah plate dan shell. Metode ini menggunakan pendekatan dengan solusi umum yang terdiri dari fungsi trigonometri batas-batas, dengan penambahan koreksi untuk menentukan bentuk mode yang sesuai dengan kondisi batas yang diberikan. Kemampuannya mencakup berbagai masalah seperti frekuensi dan bentuk mode pelat di bawah kondisi-kondisi tertentu. Dalam pengembangan lebih lanjut, ditemukan Modified Bolotin Method (MBM) yang mempertahankan bentuk non-decaying dan memberikan hasil yang sangat akurat, terutama pada perhitungan mode tinggi. MBM juga berhasil memecahkan kasus pelat dengan perletakan semi rigid di keempat sisinya. Sejalan dengan penelitian ini, persamaan gerak pelat untuk model tersebut dapat dinyatakan sesuai dengan pelat yang ditempatkan di atas lapisan pendukung modifikasi Pasternak. Maka persamaan gerak pelat untuk model pelat tersebut dapat dinyatakan sebagai

berikut:

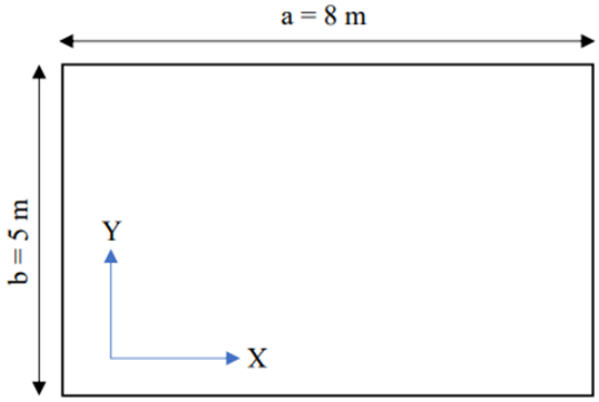
$$Dx\frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^4} + 2B\frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^4 \partial^4} + Dy\frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial y^4} + \gamma h\frac{\partial w(x,y,t)}{\partial t} + (\rho h + m_0)\frac{\partial w(x,y,t)}{\partial t^2} + k_f w(x,y,t) - G_s\left(\frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial y^2}\right) = p(x,y,t) \quad (2)$$

dimana Dx ialah Kekauan lentur pelat pada arah x. Dy ialah Kekakuan lentur pelat pada arah y. B ialah Kekauan punter efektif pelat (Torsional Rigidity). ρ ialah Massa jenis. h ialah Tebal pelat. $w(x,y,t)$ ialah Fungsi lendutan berdasarkan fungsi (posisi dan waktu). $p(x,y,t)$ ialah Fungsi beban berdasarkan fungsi (posisi dan waktu). Persamaan 2 terdiri dari dua solusi yaitu solusi homogen dan solusi partikuler yang akan diselesaikan menggunakan Modified Bolotin Method (Pevzner et al, 2000).

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Ukuran dan Sifat Bahan Pelat

Dimensi pelat lantai beton diambil sesuai dengan ukuran pelat-pelat beton yang digunakan pada lantai bangunan secara umum. Ukuran lantai digambarkan pada **Gambar 7** dan data lengkap pelat dapat dilihat pada **Tabel 1**.



Gambar 7. Denah pelat lantai yang di tinjau

3.2 Beban Ledakan

Berikut adalah parameter yang digunakan sebagai parameter pemodelan beban ledakan yang diasumsikan terjadi diluar bangunan dengan jarak pusat sumber ledakan dengan letak suatu kawasan atau struktur yang ditinjau ialah 10 m dan massa dari bahan peledak sebesar 10 kg TNT. Durasi ledakan divariasikan menjadi tiga tipe. Durasi A dengan fase positif dan negatif dengan durasi yag sama yaitu 5 ms. Durasi B untuk fase negatif diperpanjang menjadi 2 kali yaitu 10 ms sedangkan Durasi C diperpanjang untuk fase positif 2 kali nilai Durasi A menjadi 10 ms. Beban ledakan dimodelkan sebagai 6 fase arah gelombang ledakan pada **Tabel 2**.

Tabel 1: Data Pelat Lantai Bangunan

Notasi	Keterangan	Nilai	Satuan
a	Panjang Pelat	8	m
b	Lebar Pelat	5	m
h	Tebal Pelat	28, 29 dan 30	cm
	Massa Jenis Beton	2400	Kg/m^3
Ex	Modulus Elastisitas Arah x	4700 x 5 x 106	N/m^2
Ey	Modulus Elastisitas Arah y	4700 x 22 x 106	N/m^2
vx	Poisson Ratio Arah x	0,2	-
vy	Poisson Ratio Arah y	0,15	-
Dx	Kekakuan Lentur Arah x	$\frac{Exh^3}{12(1-v_x^2)}$	Nm
Dy	Kekakuan Lentur Arah y	$\frac{Eyh^3}{12(1-v_y^2)}$	Nm
K1	Kekakuan Rotasi Arah x	6,4 x 1012	Nm/rad/m
K2	Kekakuan Rotasi Arah y	4,0 x 1012	Nm/rad/m
ξ	Damping Ratio	0,05	-
Gs	Koefisien Geser Lapisan Tanah Pendukung	9,128 x 106	N/m2
Kf	Koefisien Kekakuan Tanah Lapisan Tanah Pendukung	1,662 x 109	N/m^2
m0	Inersia Tanah Lapisan Tanah Pendukung	252,326	kg/m^2

Tabel 2: Data Pelat Lantai Bangunan

Notasi	Keterangan	Nilai			Satuan
		Durasi A	Durasi B	Durasi C	
Z	Scalling law (asumsi)	4.642	4.642	4.642	m/kg
W	Massa dari bahan peledak (asumsi)	10	10	10	kg
Pmax	Amplitudo maksimum beban ledakan	6000	6000	6000	N/m2
Pmin	Amplitudo minimum beban ledakan	-5000	-5000	-5000	N/m2
t0	Waktu awal beban	0	0	0	detik
t1	Fase positif pertama	0,002	0,002	0,004	detik
t2	Fase positif kedua	0,005	0,005	0,010	detik
t3	Fase nol	0,007	0,007	0,012	detik
t4	Fase negatif pertama	0,010	0,013	0,015	detik
t5	Fase negatif kedua	0,012	0,017	0,017	detik

3.3 Frekuensi Alami (Natural Frequency)

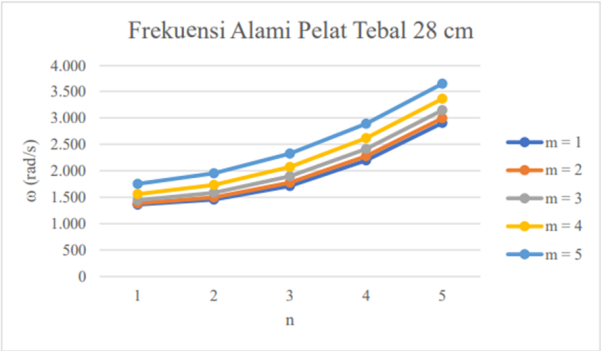
Analisis pelat lantai bangunan akibat beban setempat yang dimodelkan dengan fungsi linear dengan 6 fase menggunakan 5 mode ragam getar di tiap arahnya. Sebanyak 25 nilai diperoleh pada lima mode getaran pada arah X yang diwakili oleh huruf m dan lima mode getaran pada arah Y yang diwakili oleh huruf n.

Nilai frekuensi alami didapatkan melalui penyelesaian persamaan gerak pelat dengan boundary condition semi rigid yang dianggap dalam kondisi perletakan sendi di semua sisinya. Melalui cara yaitu mengganti pola getar di arah X(m) dengan p dan mengganti pada pola getar di arah Y(n) dengan q. Analisis dilakukan dengan bantuan program Wolfram Mathematica versi 11.2 yang akan menghasilkan nilai ragam getar frekuensi alami pelat lantai.

Berdasarkan nilai yang didapatkan **Gambar 8** dapat diambil kesimpulan bahwa semakin tinggi mode ragam getar maka semakin tinggi frekuensi alami yang dihasilkan. Hasil frekuensi alami pada mode m=1 dan n=5 pada pelat tebal 28 cm sebesar

1750,37 rad/sec.

Apabila dibandingkan dengan hasil frekuensi alami pada mode m=5 dan n=5 pada pelat tebal 28 cm sebesar 3641,71 rad/sec. Dapat disimpulkan bahwa semakin tebal pelat lantai, semakin tinggi nilai frekuensi naturalnya, dan nilai frekuensi tertinggi terjadi pada mode tertinggi, [5.5], karena perbedaan yang sangat besar. Nilai frekuensi alami yang semakin tinggi mengindikasikan semakin kaku pelat lantai dengan ketebalan tersebut dan sebaliknya semakin kecil nilai frekuensi maka semakin fleksibel pelat lantai tersebut.



Gambar 8. Ragam getar frekuensi alami pelat lantai tebal 28 cm

3.4 Defleksi Absolut Maksimum

Pemodelan pada penelitian ini yaitu pelat lantai orthotropik yang diberi beban ledakan sebanyak 6 fase dengan variasi ketebalan pelat lantainya dan variasi durasi ledakan. Defleksi maksimum pelat lantai yang diperhitungkan pada tengah bentang dimana x =a/2 dan y= b/2. Berdasarkan hasil Defleksi Absolut Maksimum yang diperoleh dari pembebanan ledakan 6 fase pada seluruh dimensi pelat lantai dan durasi ledakan diperoleh keseluruhan nilai Defleksi Absolut Maksimum pelat lantai yang memenuhi teori lendutan kecil. Pada teori tersebut dinyatakan bahwa lendutan maksimum yang terjadi tidak boleh lebih besar dari 10% atau 1/10 dari ketebalan pelat yang dilakukan pengujian. Di bawah ini merupakan nilai Defleksi Absolut Maksimum pada tiap variasi ketebalan pelat dan durasi ledakan 6 fase (ditunjukkan pada **Tabel 3**).

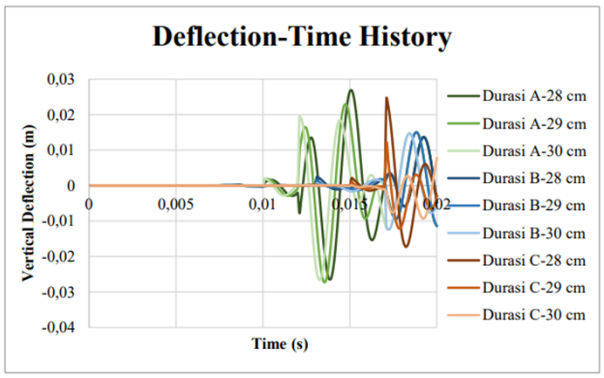
Tabel 3: Data Pelat Lantai Bangunan

Durasi Ledakan 6 Fase	Tebal Pelat (m)	Defleksi Absolut Maksimum	Persentase (%)	Kesimpulan
Durasi A	0,28	0,0268756	9,60	Memenuhi
	0,29	0,0271832	9,37	Memenuhi
	0,3	0,0264856	8,83	Memenuhi
Durasi B	0,28	0,0136073	4,86	Memenuhi
	0,29	0,0150331	5,18	Memenuhi
	0,3	0,0146984	4,90	Memenuhi
Durasi C	0,28	0,0245712	8,78	Memenuhi
	0,29	0,0120236	4,15	Memenuhi
	0,3	0,0093068	3,10	Memenuhi

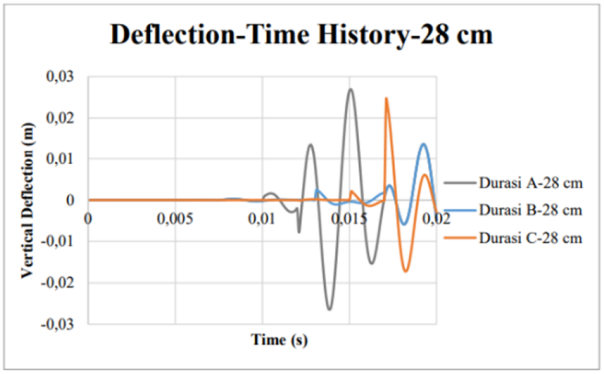
Berdasarkan **Tabel 3** dapat diambil kesimpulan bahwa semakin tebal pelat maka semakin kecil defleksi yang dihasilkan dengan durasi beban yang sama. Kemudian berdasarkan variasi durasi ledakan dapat diambil kesimpulan bahwa Durasi C yaitu variasi durasi ledakan dengan fase positif yang diperpanjang menghasilkan nilai defleksi yang lebih kecil dibandingkan Durasi A pada seluruh ketebalan pelat lantai yang diuji. Namun pada Durasi B dimana fase negatif yang diperpanjang terdapat anomali hasil nilai defleksi pada pelat tebal 28 cm = 4,86% nilai tersebut lebih kecil dibandingkan nilai defleksi pelat dengan ketebalan 29 cm = 5,18% dan 30 cm = 4,90%.

3.5 Riwayat Waktu (Time History-Deflection)

Time History Deflection atau riwayat waktu defleksi adalah suatu grafik yang menggambarkan hubungan antara defleksi pelat lantai dan waktu selama beban ledakan terjadi. Time history dianalisis dengan parameter beban Pmax= 6000 N, Pmin= 5000 N, rasio redaman ξ = 5%. Time History defleksi pelat pada setiap variasi ketebalan pelat dan durasi beban ledakan dapat dilihat pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Time History Defleksi Pelat Seluruh Variasi Tebal Pelat dan Durasi Beban Ledakan



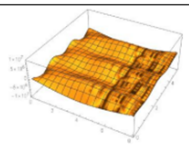
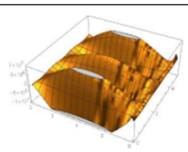
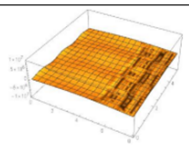
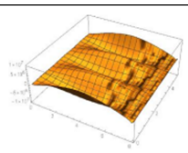
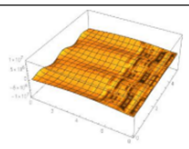
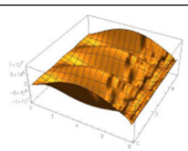
Gambar 10. Time History Defleksi Pelat Tebal 0,28 m

Berdasarkan **Gambar 9-10** di atas dapat diambil kesimpulan bahwa semakin tebal pelat maka semakin kecil defleksi yang dihasilkan dengan durasi beban yang sama. Berdasarkan variasi di atas dapat diambil kesimpulan bahwa Durasi A menghasilkan nilai defleksi paling tinggi dan Durasi C menghasilkan nilai defleksi paling kecil. Kemudian nilai Defleksi Absolut Maksimum pada tebal 29cm dan 30cm semakin kecil dari

Durasi A ke Durasi B lalu Durasi C. Namun berbeda pada pelat dengan tebal 28cm dimana Durasi B menghasilkan nilai defleksi lebih kecil dari Durasi C.

3.6 3.6 Momen Lentur dan Perilaku 3D Pelat Lantai

Momen lentur merupakan hasil turunan (derivative) kedua dari defleksi pada pelat lantai yang dilakukan pengujian. Berikut adalah distribusi momen lentur dan perilaku 3D momen lentur dimana analisis dilakukan pada posisi tengah bentang pelat dimana x=8 m dan y=5 m dengan parameter pelat dan beban ledakan seperti yang dicantumkan pada Tabel 1. dan Tabel 2. Berikut ini adalah tabel berisi grafik distribusi momen terhadap jarak pada arah X dan Y, dapat dilihat pada **Gambar 11**.

Tebal Pelat (m)	Durasi Ledakan Fase 6	3D Momen Lentur Arah X	3D Momen Lentur Arah Y
0,28	Durasi A		
	Durasi B		
	Durasi C		

Gambar 11. Perilaku 3D momen lentur arah X dan Y

Berdasarkan **Gambar 11** momen lentur di atas apabila dilihat dari ketebalan pelat maka momen lentur akan semakin kecil apabila pelat semakin tebal. Momen lentur pada arah Y lebih besar nilainya dibandingkan momen lentur pada arah X. Menurut variasi durasi ledakan paling besar yaitu Durasi A lalu Durasi B kemudian Durasi C. Namun berbeda pada pelat dengan tebal 28cm dimana Durasi B menghasilkan nilai momen lentur lebih kecil dari Durasi C.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis numerik pada struktur pelat lantai di atas lapisan pendukung modifikasi Pasternak yang diberi beban ledakan 6 fase dengan variasi ketebalan pelat dan durasi ledakan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Defleksi Absolut Maksimum pelat lantai terjadi pada fase 6/terakhir yaitu fase free vibration untuk setiap durasi beban ledakan (A, B, dan C) yang ditinjau pada penelitian ini. Terbukti pada pengukuran defleksi pada setiap fase, ketika fase terakhir free vibration dimana beban tidak bekerja lagi namun defleksi pada tiap akhir fase akan menjadi initial condition untuk fase berikutnya sehingga mempengaruhi respons dinamik pelat lantai untuk fase berikutnya.
2. Ketebalan pelat lantai berbanding lurus dengan nilai frekuensi alami dimana semakin tebal pelat maka semakin besar frekuensi alami yang menandakan bahwa pelat lantai semakin kaku. Semakin tebal pelat lantai maka defleksi absolut maksimum yang dihasilkan akan semakin kecil.
3. Durasi ledakan berpengaruh terhadap respons dinamik pelat lantai di atas lapisan pendukung modifikasi Pasternak akibat beban ledakan 6 fase. Ketika Durasi C (fase positif diperpanjang) defleksi yang dihasilkan paling kecil diantara Durasi A dan B. Demikian dengan Durasi B (fase negatif diperpanjang) menghasilkan nilai defleksi yang lebih kecil daripada Durasi A secara keseluruhan walaupun terdapat anomali. Walaupun demikian dalam analisis beban ledakan fase negatif tidak boleh diabaikan.
4. Respons dinamik pelat yaitu gaya-gaya dalam berupa momen lentur dan gaya geser dipengaruhi oleh ketebalan pelat dan durasi ledakan. Penambahan tebal pelat membuat gaya-gaya dalam yang dihasilkan semakin kecil dan ketika durasi diperpanjang maka gaya-gaya dalam akan semakin kecil.

Daftar Pustaka

[1] Alisjahbana, S.W., 2011. Dinamika Struktur Pelat II. Jakarta: UB Press.

[2] Alisjahbana, S.W. Alisjahbana, I., 2021. Pengaruh beban ledakan (Blast Load) terhadap perilaku dinamik pelat lantai dan pelat atap bangunan. Jakarta: UB Press.

[3] Alisjahbana, S.W. et al., 2019. Dynamic behaviour of stiffened orthotropic plates subjected to Friedlander blast load. In: 7th International Conference on Euro Asia Civil Engineering Forum, 7, pp.1-9.

[4] Chandra, S., 2014. Modelling of Soil Behaviour. Indian Institute of Technology Kanpur.

[5] Gibigaye, M., Crespin, P. Ezechiel, I., 2015. Dynamic response of a rigid pavement plate based on an inertial soil. Hindawi Publishing Corporation, 2016, article 4975345.

[6] Haji, T.K., 2017. Evaluating the effects of tunnel construction on buildings. PhD thesis, University of Nottingham.

[7] Katili, I., 2003. Aplikasi Metode Elemen Hingga untuk Pelat Lentur. Jakarta: UI Press.

[8] Pevzner, P., Weller, T. Berkovits, A., 2000. Further modification of Bolotin method in vibration analysis of rectangular plates. AIAA Journal, 38(9), pp.1725-1729.

[9] Rudolf, S., 1989. Teori dan Analisis Pelat Metode Klasik dan Numerik. Jakarta: Erlangga.

[10] Timoshenko, S.P. Goodier, J.N., 1974. Theory of Elasticity. Singapore: McGraw-Hill Book Company.