

## Perilaku Dinamik Pelat Lantai Atap Bangunan Akibat 5 Fase Beban Ledakan

Anggi Pranata<sup>1</sup> dan Sofia W. Alisjahbana<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>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

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku dinamik pelat lantai atap bangunan terhadap 5 fase beban ledakan, dasar dari penelitian ini karena banyaknya kasus teror yang dilakukan oleh pelaku teror yang menggunakan bahan peledak seperti bom untuk melancarkan aksinya, dan oleh sebab itu diperlukan suatu penelitian agar terciptanya suatu bangunan, khususnya pelat yang mampu menahan beban dari efek ledakan tersebut. Pada penelitian ini dilakukan analisis terhadap beberapa variasi dimensi dan permodelan pelat yang selanjutnya diberikan 5 fase beban ledakan agar dapat mengetahui distribusi tegangan, lendutan maksimum serta riwayat waktu yang dihasilkan akibat beban tersebut. Penelitian ini dilakukan dengan cara analisis numerik dengan *Modified Bolotin Method* (MBM) dan bantuan aplikasi Wolfram Mathematica. Dalam penelitian ini, pelat dimisalkan sebagai pelat orthotropik dengan perletakan *semi rigid* pada keempat sisinya, dan dibatasi dengan teori lendutan kecil atau lendutan maksimum tidak lebih dari 10% atau 1/10 dari tebal pelat tersebut.

Kata kunci: Beban ledakan, *Modified Bolotin Method*, Lendutan, Pelat, *Wolfram Mathematica*

### 1 Pendahuluan

Struktur pelat merupakan salah satu masalah struktur yang tidak mudah diselesaikan. Solusi pelat yang merupakan formulasi matematis yang rumit sering menimbulkan masalah – masalah yang sulit untuk dipecahkan sehingga diperlukan penyederhanaan dari formulasi pelat sehingga dapat dengan mudah diselesaikan. Penelitian mengenai masalah getaran pada pelat telah dilakukan sejak tahun 1766 oleh Euler. Pendekatan matematis yang pertama ditemukan oleh Euler adalah menggunakan teori membran. Euler menyelesaikan masalah getaran bebas membran elastik berbentuk segiempat dan lingkaran dengan menggunakan analogi dua buah sistem tali tegang yang saling tegak lurus [1].

Lagrange merupakan peneliti pertama yang menggunakan persamaan diferensial getaran bebas pelat yang tepat. Studi mengenai masalah getaran bebas pelat juga dilakukan oleh Kirehoff pada tahun 1850. Kirehoff melakukan penelitian dengan memperhitungkan faktor lentur dan perpanjangan dalam penyelesaian masalah pelat. Persamaan diferensial untuk getaran bebas pada pelat yang tepat pertama kali diterapkan oleh Lagrange. Dengan memperbaiki karya ahli matematika Perancis, Sophie Germain, yang menemukan persamaan diferensial pelat dengan menggunakan kalkulus variasi, yaitu menambahkan suku yang sebelumnya diabaikan [1].

Studi tentang pelat tidak hanya berhenti sampai disini, tetapi adanya penelitian secara lanjut oleh seorang ahli yang bernama Kirehoff. Kirehoff memperkenalkan teori pelat yang diperluas, dengan memperhitungkan pengaruh lentur dan perpanjangan, yang dikenal dengan nama teori pelat lendutan kecil. Penelitian mengenai respons pelat akibat beban dinamik yang

bergerak di atas struktur yang elastis dilakukan pertama kali oleh Cox, Stokes, dan Willis pada balok jembatan [1]. Berdasarkan hasil yang dikerjakan oleh ketiga ahli tersebut, kemudian diikuti oleh banyak ilmuwan – ilmuwan lain di dunia.

Raske dan Schalck meneliti respons dinamik pelat dan kondisi resonansi yang terjadi pada pelat dengan perletakan sendi pada keempat sisinya akibat beban dinamik yang bervariasi pada tahun 1967. Lima tahun kemudian, mereka melakukan penelitian tentang respons dinamik sebuah pelat annular yang dibebani oleh beban transversal dinamik yang berada di atas pondasi elastis. Berdasarkan penelitian tersebut, diperoleh respons dinamik dan kondisi stabilitas akibat beban *inplane* yang bersifat tekan.

Pada tahun 1987, Rao melakukan penelitian mengenai masalah *buckling* akibat kombinasi beban in-plane yang bersifat tekan bi-axial dan beban geser. Studi masalah *buckling* ini juga dilakukan oleh Nemeth pada tahun 1995 [1]. Adanya perlakuan studi parameter terhadap perilaku *buckling* dari sebuah pelat orthotropik yang sangat panjang.

Alisjahbana, S.W. (1999) meneliti respons dinamik pelat *isotropic* yang dibebani beban trasversal dinamik yang bergerak dengan kecepatan yang konstan. Struktur yang dipakai adalah pelat persegi panjang teredam di atas tumpuan elastis. Selain itu, Alisjahbana, S.W. (1999) meneliti kondisi stabilitas pelat orthotropik akibat beban *in-plane* yang bekerja sepanjang sisi pelat. Banyaknya penelitian yang dilakukan oleh para ahli menunjukkan bahwa pengetahuan tentang pelat sangat berguna untuk mendesain struktur yang aman di masa mendatang. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Alisjahbana, S.W. dan dengan menggunakan beberapa referensi mengenai masalah pelat, penulis mencoba menguraikan masalah pelat tersebut beserta masalah stabilitasnya pada penelitian ini.

**2 Metode**

**2.1 Persamaan Gerak Pelat**

Persamaan gerak pelat lantai bangunan dapat diperoleh dengan Hukum Newton II dengan persamaan sebagai berikut:

$$\Sigma F = m \cdot a \tag{1}$$

Sesuai dengan perkembangan yang ada, permodelan pelat telah berkembang juga dari Winkler, Pasternak, hingga Kerr. Setiap perkembangan pada permodelan terdapat tambahan parameter. Pada permodelan Winkler, hanya terdapat parameter gaya pegas. Pada permodelan Pasternak, terdapat parameter tambahan yaitu gaya geser. Lalu pada permodelan Kerr, terdapat 2 gaya geser yang berada di antara gaya pegas.

Berikut adalah persamaan permodelan Winkler:

$$D_x \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^4} + 2B \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial y^4} + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \gamma h \frac{\partial w}{\partial t} + k_f w(x,y,t) \tag{2}$$

Berikut adalah persamaan permodelan Pasternak yang terdapat Gs yaitu koefisien modulus geser:

$$D_x \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^4} + 2B \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w(x,y,t)}{\partial y^4} + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \gamma h \frac{\partial w}{\partial t} + k_f w(x,y,t) - Gs \left[ \frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x,y,t)}{\partial y^2} \right] \tag{3}$$

Berikut adalah persamaan permodelan Kerr yang memiliki 2 koefisien kekakuan pondasi:

$$\begin{aligned} & - \left( 1 + \frac{k_2}{k_1} \right) \left( D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2B \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \gamma h \frac{\partial w}{\partial t} - \right. \\ & q(x,y,t) \left. + \frac{Gs}{k_1} \left( D_x \left( \frac{\partial^6 w}{\partial x^6} + \frac{\partial^6 w}{\partial x^4 \partial y^2} \right) + 2B \left( \frac{\partial^6 w}{\partial x^4 \partial y^2} + \frac{\partial^6 w}{\partial x^2 \partial y^4} \right) D_y \left( \frac{\partial^6 w}{\partial y^6} + \frac{\partial^6 w}{\partial x^2 \partial y^4} \right) \right) + \frac{Gs}{k_1} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \left( \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \gamma h \frac{\partial w}{\partial t} - p(x,y,t) \right) = k_2 w - \right. \\ & \left. Gs \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right) \end{aligned} \tag{4}$$

Secara matematis, syarat – syarat batas (*boundary condition*) perletakan pelat *simply supported* pada keempat sisinya dapat dinyatakan sebagai:

1. Sepanjang sisi  $x = 0$  dan  $x = a$

$$W(x,y) = 0, -D_x \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0 \tag{5}$$

2. Sepanjang sisi  $y = 0$  dan  $y = b$

$$W(x,y) = 0, -D_y \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0 \tag{6}$$

**2.2 Teori Levy**

Dalam penelitian ini, digunakan Levy untuk

**2.4 Metode Pengumpulan Data**

Teknik pengambilan data dilakukan dengan cara penyebaran kuesioner kepada para responden untuk mendapatkan data primer, atau bisa juga data primer dilakukan secara *online* melalui Google Form, sedangkan untuk mendapatkan data sekunder berasal dari studi pustaka. Penelitian ini dilakukan daring karena kondisi saat penelitian yang berbahaya (Penyebaran Pandemi Virus Corona atau Covid-19) bagi peneliti dan para responden untuk melakukan observasi langsung di

menyelesaikan frekuensi getar alami (*natural frequency*) pada pelat perkerasan kaku yang memiliki perletakan *simply supported*. Metode Levy digunakan pada penyelesaian masalah pelat perkerasan kaku yang memiliki perletakan *simply supported* untuk menghasilkan hasil yang akurat pada masalah dinamik pelat perkerasan kaku di atas pondasi Kerr. Pelat yang dibahas pada penelitian ini adalah pelat perkerasan kaku berbentuk persegi Panjang di atas pondasi Kerr yang dibebani dengan dinamik lalu lintas kendaraan. Penelitian menganalisis dengan parameter kecepatan kendaraan, beban kendaraan, dan juga karakteristik tanah. Pada penelitian ini, persamaan perkerasan kaku pelat dapat diturunkan menggunakan keseimbangan gaya berdasarkan Hukum Newton II sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & - \left( 1 + \frac{k_2}{k_1} \right) \left( D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2B \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \gamma h \frac{\partial w}{\partial t} - \right. \\ & p(x,y,t) \left. + \frac{Gs}{k_1} \left( D_x \left( \frac{\partial^6 w}{\partial x^6} + \frac{\partial^6 w}{\partial x^4 \partial y^2} \right) + 2B \left( \frac{\partial^6 w}{\partial x^4 \partial y^2} + \frac{\partial^6 w}{\partial x^2 \partial y^4} \right) D_y \left( \frac{\partial^6 w}{\partial y^6} + \frac{\partial^6 w}{\partial x^2 \partial y^4} \right) \right) + \frac{Gs}{k_1} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \left( \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \gamma h \frac{\partial w}{\partial t} - p(x,y,t) \right) = k_2 w - \right. \\ & \left. Gs \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right) \end{aligned} \tag{7}$$

Pada persamaan (7) memiliki dua buah solusi yaitu solusi homogen dan solusi partikuler serta metode yang digunakan untuk memecahkan persamaan (7) adalah Levy.

**2.3 Analisis Umum**

Persamaan (7) merupakan perkalian dari fungsi posisi  $W(x,y)$  dan fungsi waktu  $T(t)$ , yaitu solusi persamaannya sebagai berikut:

$$w(x,y,t) = W(x,y)T(t) \sum_{m=1}^{m=10} \sum_{n=1}^{n=10} X_m(x) Y_n(y) T_{mn}(t) = \sum_{m=1}^{m=10} \sum_{n=1}^{n=10} A_{mn} \sin \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \sin \left( \frac{n\pi y}{b} \right) T_{mn}(t) \tag{8}$$

Keterangan:

- $W(x,y)$  = fungsi posisi (*spatial function*)
- $\omega$  = frekuensi alami sistem (*natural frequency system*)
- $T(t)$  = fungsi waktu
- $A_{mn}$  = koefisien amplitude
- $m$  = indeks integer, pola getar yang terjadi di arah  $x$
- $n$  = indeks integer, pola getar yang terjadi di arah  $y$
- $a$  = Panjang pelat di arah sumbu  $x$
- $b$  = Panjang pelat di arah sumbu  $y$

lapangan dengan cara wawancara (tatap muka). Pertanyaan di kuesioner ini dibuat berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia PM. 48 Tahun 2015 Tentang Standar Pelayanan Minimum Angkutan Orang Dengan Kereta Api. Sasarannya ialah pengguna jasa KRL *Commuter Line* trayek Bekasi – Jakarta yang bersedia menjadi responden. Pemilihan tersebut dilakukan selama penelitian pada jam operasional KRL *Commuter Line* trayek Bekasi – Jakarta. Jumlah responden dalam penelitian ini ditentukan dengan rumus Slovin dalam Umar (2005) yaitu:

$$n = \frac{N}{1+Ne^2} \quad (1)$$

Dimana, n adalah jumlah sampel, N adalah ukuran populasi, dan e adalah persentasi kelonggaran ketidaktelitian arena. Kesalahan sampel masih bisa ditolelir 10%.

Pada tahun 2019, diketahui jumlah pelanggan KRL *Commuter Line* sebanyak 336,162,186 penumpang sehingga jumlah sampel yang diperlukan yaitu:

$$n = \frac{336,162,186}{1+336.162.186(0.1)^2} = 100 \text{ orang}$$

## 2.5 Importance Performance Analysis (IPA)

Metode *Importance Performance Analysis* (IPA) merupakan suatu teknik penerapan yang mudah untuk mengatur atribut dari tingkat kepentingan dan tingkat pelaksanaan itu sendiri yang berguna untuk pengembangan program pemasaran yang efektif. Dalam metode ini, diperlukan pengukuran tingkat kesesuaian untuk mengetahui seberapa besar pelanggan merasa puas terhadap kinerja perusahaan, dan seberapa besar pihak penyedia jasa memahami apa yang diinginkan pelanggan terhadap jasa yang mereka berikan (Ruhimat, 2018).

Metode *Importance Performance Analysis* digunakan untuk mendapatkan informasi tentang tingkat kepuasan pengguna jasa terhadap suatu pelayanan dengan cara mengukur tingkat kepentingan dan tingkat pelaksanaannya. Tingkat kepentingan dari kualitas pelayanan adalah seberapa penting suatu peubah pelayanan bagi pengguna jasa terhadap kinerja pelayanan. Skala likert 5 tingkat digunakan untuk mengukur tingkat kepentingan yaitu sangat penting, penting, cukup penting, kurang penting, dan tidak penting. Kelima tingkat tersebut diberikan skor sebagai berikut:

- Jawaban sangat penting diberi skor 5.
- Jawaban penting diberi skor 4.
- Jawaban cukup penting diberi skor 3.
- Jawaban kurang penting diberi skor 2.
- Jawaban tidak penting diberi skor 1

Tingkat pelaksanaan adalah kinerja aktual dari mutu pelayanan yang diberikan oleh PT Kereta Commuter Indonesia yang dirasakan oleh pengguna jasa. Skala likert 5 tingkat digunakan untuk mengukur tingkat pelaksanaan yaitu sangat puas, puas, cukup puas, kurang puas, dan tidak puas. Kelima tingkat tersebut diberi skor sebagai berikut:

- Jawaban sangat puas diberi skor 5.
- Jawaban puas diberi skor 4.
- Jawaban cukup puas diberi skor 3.
- Jawaban kurang puas diberi skor 2.
- Jawaban tidak puas diberi skor 1.

Dalam analisis data, terdapat dua buah variabel yang diwakili oleh huruf X dan Y, dimana X adalah tingkat kinerja suatu pengguna jasa sementara, Y adalah tingkat kepentingan pengguna jasa.

$$TK_i = \frac{X_i}{Y_i} \times 100\% \quad (3)$$

Dimana, TK<sub>i</sub> adalah tingkat kesesuaian responden, X<sub>i</sub> adalah Bobot penilaian pengguna jasa terhadap kinerja PT Kereta Commuter Indonesia, dan Y<sub>i</sub> adalah Bobot penilaian pengguna jasa terhadap tingkat kepentingan ke atribut PT Kereta Commuter Indonesia. Adanya indikator untuk menilai kinerja PT tersebut, yaitu:

TK<sub>i</sub> > 100% → Memenuhi kepuasan pengguna jasa

TK<sub>i</sub> < 100% → Belum memenuhi kepuasan pengguna jasa.

Selanjutnya, memetakan hasil perhitungan yang telah didapat ke dalam diagram kartesius Masing-masing atribut diposisikan dalam sebuah diagram, di mana skor rata-rata penilaian terhadap tingkat kinerja (X) menunjukkan posisi suatu atribut pada sumbu X, sementara posisi atribut pada sumbu Y, ditunjukkan oleh skor rata-rata tingkat kepentingan terhadap atribut (Y).

$$\bar{X}_i = \frac{\sum X_i}{n} \text{ dan } \bar{Y}_i = \frac{\sum Y_i}{n} \quad (3)$$

$\bar{X}_i$  = Skor rata-rata setiap peubah i pada tingkat kinerja

$\bar{Y}_i$  = Skor rata-rata setiap peubah i pada tingkat kepentingan

$\sum X_i$  = Total skor setiap peubah i pada tingkat pelaksanaan dari seluruh responden

$\sum Y_i$  = Total skor setiap peubah i pada tingkat kepentingan dari seluruh responden

n = Total responden

Diagram kartesius terdiri dari empat bagian yang dibatasi oleh dua buah garis yang berpotongan tegak lurus pada titik X dan Y, dengan X rata-rata dari bobot tingkat kinerja atribut produk, sedangkan Y merupakan rata-rata dari tingkat kepentingan seluruh faktor yang mempengaruhi kepuasan pengguna jasa dengan rumusnya sebagai berikut:

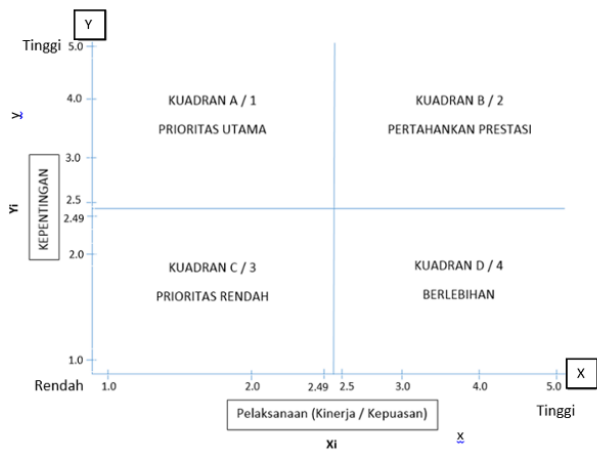
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i}{k} \text{ dan } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{Y}_i}{k} \quad (4)$$

$\bar{x}$  = Rataan dari total rata-rata bobot tingkat pelaksanaan

$\bar{y}$  = Rataan dari total rata-rata bobot tingkat kepentingan

k = Jumlah peubah yang ditetapkan

Nilai atribut X dan Y digunakan sebagai pasangan koordinasi titik titik untuk memosisikan suatu atribut yang terletak di diagram kartesius yang terlampir pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Diagram Kartesius *Importance Performance Analysis*

Adapun interpretasi dari kuadran tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Kuadran A/1 → Prioritas Utama  
 Pada kuadran ini, terdapat faktor-faktor yang dianggap penting dan atau diharapkan konsumen, tetapi kinerja perusahaan dinilai belum memuaskan sehingga pihak perusahaan perlu berkonsentrasi untuk mengalokasikan sumber dayanya guna meningkatkan performa yang masuk pada kuadran ini.
- b. Kuadran B/2 → Pertahankan Prestasi  
 Pada kuadran ini, terdapat faktor-faktor yang dianggap penting dan diharapkan sebagai faktor penunjang kepuasan konsumen sehingga perusahaan wajib untuk mempertahankan prestasi kinerja tersebut.
- c. Kuadran C/3 → Prioritas Rendah  
 Pada kuadran ini, terdapat faktor-faktor yang dianggap mempunyai tingkat persepsi atau kinerja actual yang rendah dan tidak terlalu penting dan atau tidak terlalu diharapkan oleh konsumen sehingga perusahaan tidak perlu memprioritaskan atau memberikan perhatian lebih pada faktor-faktor tersebut.
- d. Kuadran D/4 → Berlebihan  
 Pada kuadran ini, terdapat faktor-faktor yang dianggap tidak terlalu penting dan tidak terlalu diharapkan oleh pelanggan sehingga perusahaan lebih baik mengalokasikan sumber daya yang terkait pada faktor tersebut kepada faktor lain yang lebih memiliki tingkat prioritas lebih tinggi.

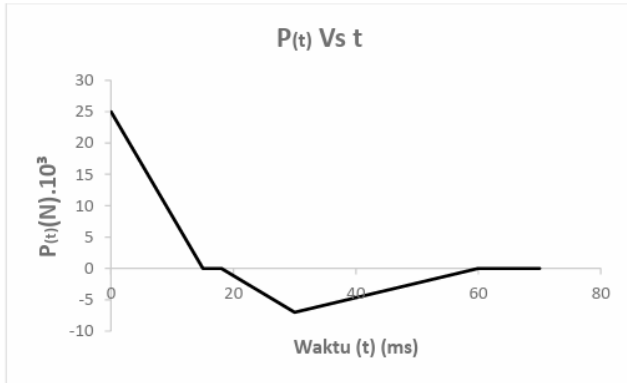
**Tabel 1.** Atribut Kualitas Pelayanan Pengguna Jasa KRL Commuter Line Bekasi – Jakarta berdasarkan SPM (Standar Pelayanan Minimum)

No	Pernyataan
<b>SARANA DAN PRASARANA</b>	
1.	Kemudahan Menjangkau Stasiun (misal: Terintegrasi Angkutan Umum, Shelter Ojek Daring dll)
2.	Kenyamanan di Dalam Kereta (Tempat Duduk yang memiliki Sandaran, Lampu Penerangan, Pengatur Sirkulasi Udara, Fasilitas Penumpang Berdiri, dan Rak Bagasi)
3.	Ketersediaan Fasilitas Utama Bagi Pengguna Jasa Ditable di Stasiun maupun di Kereta (Penyanggah Disabilitas, Wanita Hamil, Ibu membawa Balita, dan Lanjut Usia)
4.	Ketersediaan Fasilitas Penunjang di Stasiun (tempat parkir yang memadai, ATM Centre, Toilet, Tempat Menunggu, Vending Machine, Tempat Sampah, Convenience Store, Ruang Menyusui, Musholla dll)
5.	Ketersediaan Fasilitas Keamanan dan Keselamatan di Stasiun (Petugas Keamanan, Akses Jalan Penyanggah Peron yang Nyaman, Selisih Tinggi Peron dengan Lantai Kereta harus Sejajar, CCTV, Petunjuk Jalur Evakuasi dll)
6.	Ketersediaan Fasilitas Keamanan dan Keselamatan di Kereta (Alat Pemecah Jendela, Petunjuk Jalur Evakuasi, 1 APAR per Kereta, dan Rem Darurat)
7.	Ketersediaan Fasilitas Kesehatan di Stasiun (Perlengkapan P3K, Petugas Medis, Kursi Roda, Tandu, dan Ruang Kesehatan Sementara)
8.	Ketersediaan Sistem Tiket Modern yang Mudah dan Cepat (Pembelian Tiket yang Mudah, dan Sistem 1 Tap 1 Person untuk Masuk / Keluar Stasiun)
<b>MANAJEMEN DAN SUMBER DAYA MANUSIA</b>	
9.	Informasi Pelayanan yang Memadai di Stasiun (Denah / Layout Stasiun, Nomor Kedatangan KA, Nama Stasiun Keberangkatan, Jadwal Keberangkatan, Peta Jaringan KA dll)
10.	Ketersediaan Ruang Pelayanan Informasi dan Pelayanan Aduan untuk Pengguna Jasa
11.	Ketersediaan Informasi di Stasiun (Kedatangan KA, Keterlambatan KA, Penjadwalan, Stasiun Pemberhentian, Integrasi dengan Moda Transportasi lain atau Angkutan Lanjutan dll)
12.	Ketersediaan Informasi di Kereta (Nomor KA, Stasiun Pemberhentian Berikut, Waktu menuju Tempat Pemberhentian, Stasiun yang dilalui dll)
13.	Ketepatan Waktu Kedatangan dan Keberangkatan Kereta
14.	Ketepatan Waktu Perjalanan Kereta
15.	Ketepatan Headway atau Waktu Anatar Kedatangan Kereta (misa Anda baru saja Ditinggal Kereta, lalu Kereta Berikutnya akan Tiba dalam 5 Menit)

16.	Petugas yang Sigap dan Tanggap terhadap Pengguna
-----	--

**3 Hasil dan Pembahasan**

Pelat lantai atap bangunan yang terbuat dari beton pada penelitian kali ini dianalisis untuk memperoleh lendutan maksimum serta riwayat waktu yang timbul akibat beban 5 fase beban ledakan. Pada analisis ini lantai atap bangunan dimodelkan sebagai pelat orthotropik dengan perletakan semi rigid. Analisis dilakukan dengan menggunakan software Wolfram Mathematica. Beban yang dihasilkan dari 5 fase beban ledakan dapat digambarkan sebagai berikut:

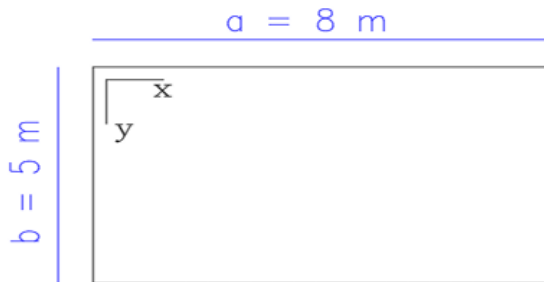


**Gambar 1.** Grafik Gaya Terhadap Waktu Beban Ledakan Fungsi Linear

Pada analisis ini, dilakukan untuk beberapa variasi ketebalan dan dimensi pelat yang bertujuan mengetahui response dinamik yang timbul akibat variasi dimensi pelat terhadap beban. Variasi dimensi tebal pelat seperti ketebalan 20 cm, 25 cm, 26cm, dan 27 cm serta nantinya akan diberi beberapa pengaku pada ketebalan pelat yang nilai defleksi absolut maksimumnya tidak memenuhi persyaratan sesuai dengan teori lendutan kecil. Defleksi dinamik maksimum pelat dihitung di tengah bentang akibat 5 fase beban ledakan dengan menggunakan 5 ragam getar di arah x dan 5 ragam getar di arah y dengan ketebalan dan dimensi masing-masing pelat.

**3.1 Ukuran dan Sifat Bahan Pelat**

Untuk geometris pelat beton diambil sesuai dengan pelat – pelat beton yang digunakan pada lantai bangunan. Ukuran pelat lantai dilihat pada **Gambar 2** dan data pelat lantai pada **Tabel 1**.



**Gambar 2.** Denah Pelat Lantai Atap Bangunan

**Tabel 1.** Data Pelat Lantai Atap Bangunan

Notasi	Keterangan	Nilai	Satuan
A	Panjang Pelat	8	M
B	Lebar Pelat	5	M
H	Tebal Pelat	20, 25, 26 dan 27	Cm
P	Massa Jenis Beton	2400	Kg/m <sup>3</sup>
E <sub>x</sub>	Modulus Elastisitas arah x	4700 x (5 x 10 <sup>6</sup> )	N/m <sup>2</sup>
E <sub>y</sub>	Modulus Elastisitas arah y	4700 x (√22 x 10 <sup>6</sup> )	N/m <sup>2</sup>
v <sub>x</sub>	Possion Ratio arah x	0.2	-
v <sub>y</sub>	Possion Ratio arah y	0.15	-
D <sub>x</sub>	Kekakuan Lentur arah x	$\frac{Ecx \cdot h^3}{12 \cdot (1 - vx \cdot vy)}$	Nm
D <sub>y</sub>	Kekakuan Lentur arah y	$\frac{Ecy \cdot h^3}{12 \cdot (1 - vx \cdot vy)}$	Nm
k <sub>1</sub>	Kekakuan Rotasi arah x	25 x 10 <sup>8</sup>	Nm/rad/m
k <sub>2</sub>	Kekakuan Rotasi arah y	25 x 10 <sup>8</sup>	Nm/rad/m
ξ	Damping ratio	0.05	-

**3.2 Beban Ledakan**

Berikut adalah parameter yang digunakan sebagai beban ledakan di luar bangunan yang dimodelkan sebagai 5 fase beban ledakan seperti pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Parameter Beban Ledakan

Notasi	Besaran	Satuan	Keterangan
Z	6.03	m/kg <sup>(1/3)</sup>	Scaling laws (Asumsi)
W	100	Kg	Massa dari bahan peledak (Asumsi)
P <sub>so</sub>	23500	Newton [N]	Amplitudo fase positif
P <sub>so</sub> <sup>-</sup>	7000	Newton [N]	Amplitudo fase negatif
t <sub>a</sub>	0	Detik [s]	Waktu awal beban
t <sub>of</sub>	0.0142	Detik [s]	Positive fictitious time
t <sub>o</sub>	0.0172	Detik [s]	Durasi fase linear positif + fase nol
t <sub>of</sub> <sup>-</sup>	0.0464	Detik [s]	Negatif fictitious time

Beban dinamik yang bekerja pada penelitian ini adalah beban ledakan 5 fase yang dapat dinyatakan sebagai p(x,y,t). Beban dinamik yang bekerja merupakan fungsi posisi dan waktu yang dapat dinyatakan dengan fungsi Dirac Delta (Dirac's Delta Function) yang dapat dinyatakan (Alisjahbana, S.W dan Wangsadinata, W, 2009):

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

Keterangan:

P(t) = Beban ledakan yang bekerja pada saat t

x(t) = Fungsi gerak beban di arah x sebagai fungsi t

y(t) = Fungsi gerak beban di arah y sebagai fungsi t

δ = Dirac's Delta Function

Beban ledakan P(t) pada penelitian kali ini dikondisikan terjadi di atas tanah dan terdiri dari 5 fase, berdasarkan parameter beban di atas dapat dinyatakan sebagai berikut:

a. Phase 1, pada interval  $t \leq t_{of}$

$$P(t) = P_{max} \left( 1 - \frac{t}{t_{of}} \right)$$

b. Phase 2, pada interval  $t_{of} < t \leq t_o$

$$P(t) = 0$$

c. Phase 3, pada interval  $t_{of} < t \leq t_o + 0.25 t_{of}^-$

$$P(t) = - P_{min} \left( \frac{t - t_o}{t_{ofn025}} \right)$$

d. Phase 4, pada interval  $t_o + 0.25 t_{of}^- < t \leq t_o + t_{of}^-$

$$P(t) = - P_{min} \left( 1 - \frac{t - (t_o + t_{ofn025})}{0.75 \cdot t_{ofn025}} \right)$$



penelitian ini diberikan beberapa variasi jumlah dan dimensi pengaku pada beberapa pelat yang tidak memenuhi teori lendutan kecil tersebut.

Berikut adalah nilai defleksi maksimum pada tiap variasi pelat akibat 5 fase beban ledakan yang dihitung di tengah bentang:

**Tabel 4.** Defleksi Absolut Maksimum pelat tanpa pengaku

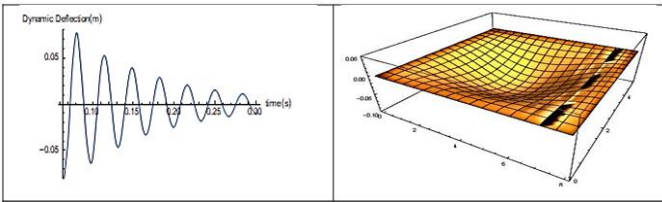
Tebal (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Defleksi Maksimum	Persentase	Kesimpulan
0.2	8	0.0869177	43.46%	Tidak Memenuhi
0.25	10	0.0394147	15.77%	Tidak Memenuhi
0.26	10.4	0.0324765	12.49%	Tidak Memenuhi
0.27	10.8	0.0263454	9.76%	Memenuhi

**Tabel 5.** Defleksi Absolut Maksimum pelat dengan pengaku ( b = 0.4m , h = 0.35m )

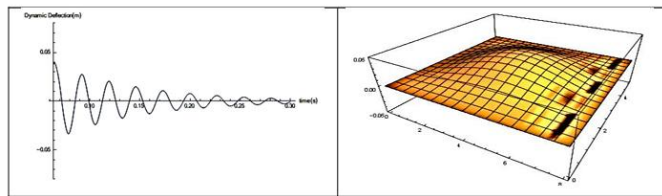
Jumlah Pengaku	Tebal (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	V Pengaku	V Total	Defleksi Maksimum	Persentase	Kesimpulan
3	0.25	10	2.1	12.1	0.022581	9.03%	Memenuhi
2	0.26	10.4	1.4	11.8	0.0221132	8.51%	Memenuhi
1	0.27	10.8	0.7	11.5	0.021095	7.81%	Memenuhi

**Tabel 6.** Defleksi Absolut Maksimum pelat dengan pengaku ( b = 0.5m , h = 0.5m )

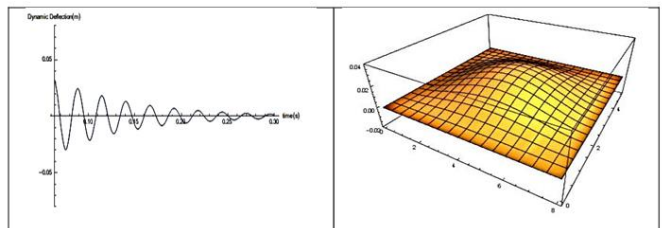
Jumlah Pengaku	Tebal (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	V Pengaku	V Total	Defleksi Maksimum	Persentase	Kesimpulan
3	0.2	8	3.75	11.75	0.0178884	8.94%	Memenuhi



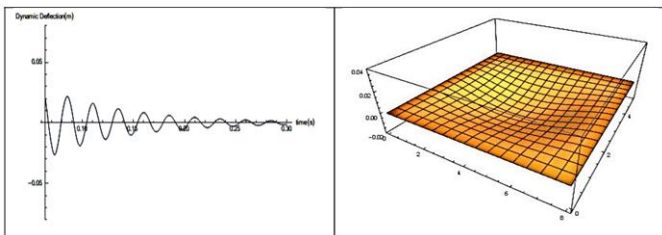
**Gambar 4.** Grafik dan Perilaku 3D Defleksi Maksimum Pelat ketebalan 20 cm



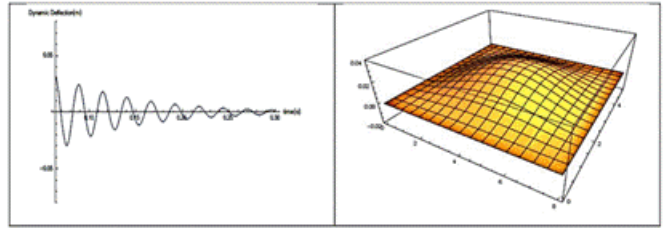
**Gambar 5.** Grafik dan Perilaku 3D Defleksi Maksimum Pelat ketebalan 25 cm



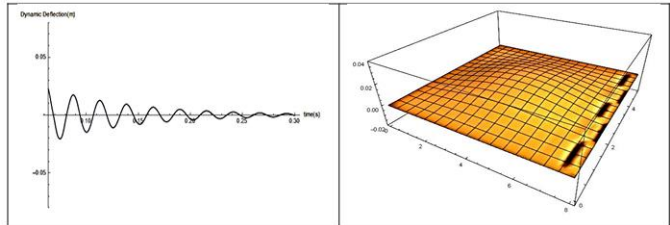
**Gambar 6.** Grafik dan Perilaku 3D Defleksi Maksimum Pelat ketebalan 26 cm



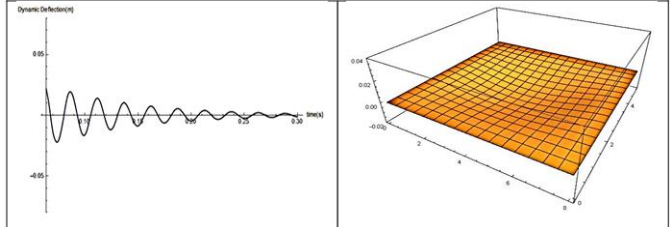
**Gambar 7.** Grafik dan Perilaku 3D Defleksi Maksimum Pelat ketebalan 27 cm



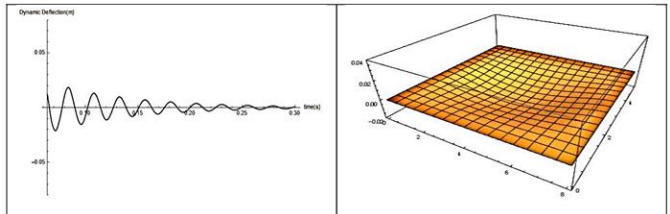
**Gambar 8.** Grafik dan Perilaku 3D Defleksi Maksimum Pelat ketebalan 20 cm + 3 pengaku (b=0.5m, h=0.5m)



**Gambar 9.** Grafik dan Perilaku 3D Defleksi Maksimum Pelat ketebalan 25 cm + 3 pengaku (b=0.4m, h=0.35m)



**Gambar 10.** Grafik dan Perilaku 3D Defleksi Maksimum Pelat ketebalan 26 cm + 2 pengaku (b=0.4m, h=0.35m)



**Gambar 11.** Grafik dan Perilaku 3D Defleksi Maksimum Pelat ketebalan 27 cm + 1 pengaku (b=0.4m, h=0.35m)

Pada **Tabel 4**, **Tabel 5**, dan **Tabel 6**, dapat dilihat pengaruh dari ketebalan pelat dengan berbagai variasinya dapat mempengaruhi besarnya defleksi maksimum pada pelat akibat 5 fase beban ledakan. Dapat dilihat sebagai contoh pada ketebalan 25 cm defleksi absolut maksimum tidak memenuhi syarat teori lendutan kecil dengan persentase 15.77%, dibandingkan dengan pelat dengan tebal 27 cm yang sudah memenuhi syarat teori lendutan kecil dengan persentase 8.08%. Dan juga dengan menggunakan alternatif lain seperti pada pelat dengan tebal 25 cm ditambah dengan 3 pengaku ( b = 0.4 m dan h = 0.35m) juga dapat memenuhi syarat teori lendutan kecil dengan persentase 9.03%. Dari grafik, tabel dan gambar 3D tersebut dapat disimpulkan bahwa selain ketebalan pelat, dimensi dan jumlah pengaku juga mempengaruhi besar atau kecilnya defleksi absolut maksimum.

3.5 Distribusi Tegangan

Pada penelitian kali ini, dengan variasi ketebalan pelat yang telah dimodelkan seperti di atas, penulis membandingkan

besaran tegangan untuk setiap variasi dimensi dan permodelan pelat tepatnya pada fase ke 5 dari beban ledakan dimana tegangan maksimum terjadi. Berikut tegangan yang terjadi pada pada pelat lantai atap bangunan akibat 5 fase beban ledakan:

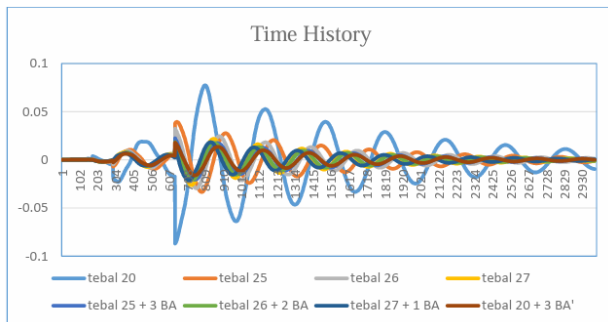
**Tabel 7.** Tegangan maksimum pada pelat lantai atap bangunan

Tebal	Jumlah Pengaku	Volume Pengaku	Tegangan
20	0	0	0.326566
25	0	0	0.372326
26	0	0	0.33369
27	0	0	0.251358
27	1	0.7	0.301714
26	2	1.4	0.337577
25	3	2.1	0.352292
20	3	3.75	0.392863

Dari data di atas, dapat dilihat tegangan yang terjadi tidak berbanding lurus dengan ketebalan pelat atau kekakuan pelat itu sendiri, yang dapat disimpulkan ketebalan pelat tidak mempengaruhi tegangan maksimum pada pelat, serta tegangan maksimum pada pelat tidak terjadi pada waktu yang sama.

3.6 Riwayat Waktu (*Time History*)

Dari hasil analisis dinamik pelat lantai bangunan akibat 5 fase beban ledakan dapat diketahui riwayat waktu (*Time History*) yang terbagi dalam beberapa variasi dimensi pelat, baik yang menggunakan pengaku maupun yang tidak. Berikut riwayat waktu pelat lantai atap bangunan akibat 5 fase beban ledakan:



**Gambar 11.** Riwayat Waktu Defleksi Dinamik Pelat Lantai Atap

**Tabel 8.** Waktu Terjadi Defleksi Maksimum

Tebal	Jumlah Pengaku	V Total	Waktu Terjadi Defleksi Max
0.2	0	8	0.0639 s
0.25	0	10	0.1488 s
0.26	0	10.4	0.0639 s
0.27	0	10.8	0.0731 s
0.2	3	11.75	0.0639 s
0.25	3	12.1	0.0738 s
0.26	2	11.8	0.0717 s
0.27	1	11.5	0.0639 s

Berdasarkan grafik riwayat waktu (*time history*) di atas dapat dikatakan bahwa waktu saat terjadinya defleksi maksimum tidak sama namun dapat disimpulkan bahwa semakin besar dimensi pelat serta dengan penambahan pengaku pada suatu pelat dapat memperkecil nilai defleksi dinamik pelat tersebut.

4 Kesimpulan

Pada hasil penelitian ini, terdapat kesimpulan pada tebal pelat yang berbanding lurus dengan frekuensi alami pelat itu sendiri, atau semakin tebal pelat lantai atap bangunan maka semakin besar pula nilai frekuensi alami pelat tersebut. Tebal pelat berpengaruh terhadap respons dinamik pelat lantai atap bangunan akibat 5 fase beban ledakan, yang dapat dilihat pada hasil analisis diatas semakin tebal suatu pelat maka semakin kecil nilai defleksi absolut maksimum yang terjadi pada pelat tersebut.

Selain ketebalan pelat, penambahan pengaku dengan jumlah dan dimensi yang tepat juga dapat menjadi solusi agar defleksi absolut maksimum tidak lebih besar dari  $h/10$  yang merupakan syarat untuk memenuhi teori lendutan kecil.

Batas ketebalan minimum pelat lantai atap bangunan tanpa penambahan pengaku yang terkena 5 fase beban ledakan adalah 27 cm dengan nilai defleksi absolut maksimum adalah 0.0263454 yang berarti lebih kecil dari  $h/10 = 0.027$  m.

Tegangan yang terjadi tidak berbanding lurus dengan ketebalan pelat atau kekakuan pelat itu sendiri, yang dapat disimpulkan ketebalan pelat tidak mempengaruhi tegangan maksimum pada pelat, serta tegangan maksimum pada pelat tidak terjadi pada waktu yang sama

Berdasarkan grafik riwayat waktu (*time history*) di atas dapat diketahui bahwa waktu saat terjadinya defleksi absolut maksimum tidak sama dalam berbagai variasi ketebalan dan permodelan pelat.

Daftar Pustaka

- [1] Alisjahbana, S. W. (2011). *Dinamika Struktur Pelat II*. Jakarta: UB Press.
- [2] Alisjahbana, S. W. (2014). *Numerical Dynamic Analysis of Orthotropic Plates Under Localized Blast Loading*. Bangkok.
- [3] Alisjahbana, S. W. dkk (2019). *Dynamic Behaviour of Stiffened Orthotropic Plates Subjected to Friedlander Blast Load*.
- [4] Karlos, Vasilis., & Solomos, George. (2013). *Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [5] Pevzner, P., Weller, T., & Berkovits, A. (2000). *Futher Modification of Bolotin Method in Vibration Analysis of Rectangular Plates*. ALAA Journal, Vol. 38. No. 9.
- [6] Rigby, S. E., Bennet, T., & Fay, S. D. (2014). *The Negative Phase of the Blast Load*. International Journal of Protective Structures, 1-20