

# Perilaku Struktur Terhadap Beban Impak

Oleh : Ilham Nurhuda

## Abstract

*This paper is concerned with the prediction of impact load from a hard body object and response of the target structure. Two approaches in predicting the magnitude and duration of impact loading, namely half-space approach and interaction approach, were studied in this paper. This study showed that load and structure response from both approaches were very different. Since the interaction approach considered the effect of structure flexibility on the load and response history, this approach showed more realistic results than the half-space approach.*

**Keyword:** *impact, dynamic, plate, time history*

## 1. Pendahuluan

Beban impact sering didefinisikan sebagai beban yang bekerja pada struktur dalam waktu yang sangat singkat, umumnya kurang dari 1 detik, bahkan hanya selama beberapa milidetik. Beberapa contoh beban impact adalah beban tekanan udara akibat bom, tembakan peluru, atau benturan benda pada struktur.

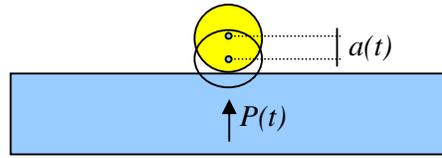
Pada beberapa struktur, umumnya dengan alasan keamanan, struktur tersebut harus direncanakan terhadap beban impact yang mungkin terjadi selama umur rencana bangunan. Analisis struktur terhadap beban impact umumnya meliputi: prediksi besar dan lama pembebanan beban impact, analisis perilaku elemen struktur dan struktur secara keseluruhan terhadap beban impact, analisis kekuatan struktur terhadap beban impact.

Tulisan ini membahas mengenai prediksi beban impact yang berasal dari benturan benda keras pada panel dinding atau pelat lantai dan respon dari struktur panel/lantai yang terkena impact. Bagian 2, 3, dan 4 dari tulisan ini membahas mengenai prediksi beban impact dan pemodelan struktur. Bagian 2 membahas pemodelan beban impact dengan pendekatan setengah ruang (*half-space*), yaitu dengan asumsi struktur sangat kaku. Bagian 3 membahas mengenai pemodelan struktur dalam analisis dinamik. Bagian 4 membahas mengenai beban dan respon struktur dengan memperhitungkan interaksi antara struktur dan peng-impact. Bagian 5 adalah studi kasus dengan meninjau struktur pelat dengan beban impact yang berbeda-beda. Hasil dan pembahasan hasil dari studi kasus dibahas pada bagian 6 dan 7.

## 2. Beban impact dengan pendekatan setengah ruang(*half-space*)

Pendekatan setengah ruang dalam menentukan beban impact dilakukan dengan tidak memperhitungkan kelenturan struktur atau menganggap struktur sebagai lantai kaku. Dalam hal ini,

deformasi yang terjadi hanya pada permukaan pelat dan deformasi elastis dari pengimpak (gambar 1).



Gambar 1. Model pembebanan setengah ruang

Hubungan antara beban  $P(t)$  dan perpindahan  $a(t)$  diketahui tidak linier, dan dapat dihitung dengan teori Hertz sebagai berikut:

$$P = k.a^{3/2} . \quad (1)$$

$$k = \frac{4}{3} E.R^{1/2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (3)$$

dimana  $P$  adalah beban,  $k$  adalah kekakuan kontak (*contact stiffness*),  $a$  adalah perpindahan, dan  $R$  adalah jari-jari obyek yang mengimpak.  $E_1, \nu_1$  dan  $E_2, \nu_2$  secara berurutan adalah modulus elastisitas dan poisson's ratio dari pengimpak dan struktur (Pashah *et al*, 2008; Abrate, 2001).

Bentuk riwayat waktu dari beban impact dimodelkan sebagai setengah sinus yaitu:

$$P(t) = P_o . \sin\left(\frac{\pi.t}{tc}\right) ; t \leq tc \quad (4)$$

dimana  $tc$  adalah lama pembebanan. Beban maksimum  $P_o$  diperkirakan dengan menggunakan prinsip kekekalan energi yaitu:

$$\frac{1}{2} MV^2 = \int P.da = \frac{2}{5} k.a^{5/2} \quad (5)$$

Substitusi nilai  $a$  dari persamaan (1) pada persamaan (5) memberikan

$$P_o = \left(\frac{5}{4}\right)^{3/5} \left[M^3 V^6 k^2\right]^{1/5} \quad (6)$$

Dengan asumsi riwayat pembebanan mengikuti setengah kurva sinus lama pembebanan dapat dihitung dengan menggunakan prinsip hukum impuls-momentum (Abrate, 2001).

$$tc = 3.125 \left[M^2 V^{-1} k^{-2}\right]^{1/5} \quad (7)$$

### 3. Pemodelan struktur dalam analisis dinamik.

Pada tulisan ini, analisis dinamik struktur dilakukan dengan memodelkan struktur sebagai

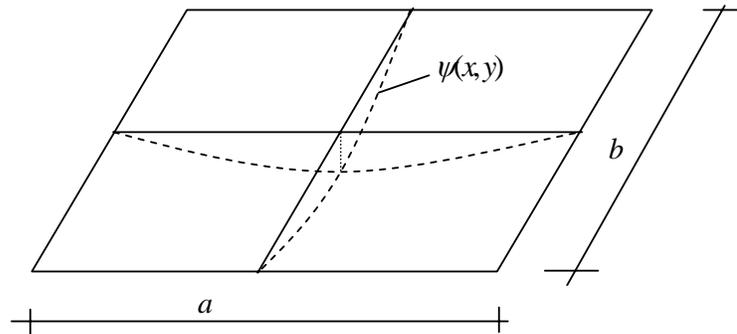
struktur dengan derajat kebebasan tunggal (SDOF). Penyederhanaan ini tentunya dapat dilakukan dengan terlebih dahulu harus memperhitungkan dan mengkonversi sifat-sifat struktur yang memiliki banyak derajat kebebasan menjadi struktur dengan hanya satu derajat kebebasan.

Untuk itu maka bentuk deformasi struktur harus diasumsikan terlebih dahulu, dan dengan bentuk tersebut maka massa dan kekakuan efektif struktur dapat diperkirakan dengan:

$$m_{eff} = \int_0^a \int_0^b m \psi(x, y)^2 dx.dy \quad (8)$$

$$k_{eff} = D \int_0^a \int_0^b \left[ \left( \frac{\partial^2 \psi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi(x, y)}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \psi(x, y)}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi(x, y)}{\partial y^2} - \left( \frac{\partial^2 \psi(x, y)}{\partial x \partial y} \right)^2 \right) \right] dx.dy \quad (9)$$

dimana  $\psi(x, y)$  adalah fungsi yang mendefinisikan bentuk deformasi struktur (Clough dan Penzien, 1993). Untuk kasus pelat y yang tertumpu sederhana pada keempat sisinya, maka bentuk deformasi struktur dapat dimodelkan seperti pada gambar 2 dan diperkirakan dengan persamaan (10) berikut.



Gambar 2. Bentuk deformasi pada pelat yang tertumpu sederhana

$$\psi(x, y) = \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot y}{b}\right) \quad (10)$$

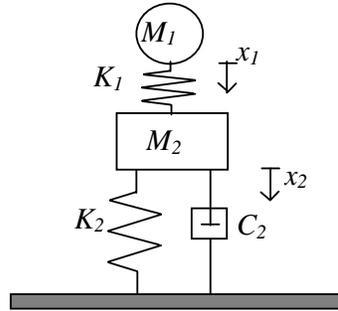
Berkaitan dengan massa yang diperhitungkan dalam analisis dinamik, pada saat terjadi impact maka massa yang diperhitungkan adalah massa pengimpak dan massa efektif struktur. Sedangkan pada kondisi setelah pengimpak tidak menempel pada struktur maka hanya massa efektif struktur yang diperhitungkan dalam analisis.

#### 4. Beban dan respon struktur dengan memperhitungkan interaksi struktur dan pengimpak

Pada model sebelumnya, beban dan respon struktur terhadap impact dimodelkan secara terpisah yaitu beban impact telah ditentukan terlebih dahulu, baru setelah diketahui bebannya struktur dianalisis dengan model SDOF. Pada kasus yang sebenarnya, beban impact yang terjadi

merupakan interaksi antara struktur dan pengimpak, dalam hal ini kelenturan dari struktur sangat mempengaruhi besar beban impact yang diterima. Dengan kata lain, struktur yang kurang kaku akan menerima beban impact yang lebih kecil dibandingkan dengan struktur yang kaku meskipun kedua struktur dikenai energi impact dan momentum yang sama.

Model sederhana dari interaksi pengimpak dan struktur dapat dimodelkan dengan dua derajat kebebasan seperti pada gambar 3.  $M_1$  adalah massa pengimpak,  $M_2$  adalah massa efektif struktur,  $K_1$  adalah kekakuan kontak,  $K_2$  adalah kekakuan efektif struktur, dan  $C_2$  adalah redaman pada struktur.



Gambar 3. Model interaksi pengimpak dan struktur

Persamaan kesetimbangan model ini dinyatakan dalam matrix sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 + K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = P(t) \quad (11)$$

Bila  $K_1$  sangat besar dibandingkan  $K_2$ , maka deformasi  $x_1 = x_2$ , dan persamaan (11) dapat disederhanakan menjadi:

$$M_1 \ddot{x}_1 + P(t) = 0 \quad (12)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 + K_2 x_2 - P(t) = 0 \quad (13)$$

Kondisi awal untuk kasus ini adalah  $x_1(0) = x_2(0) = 0$   $\dot{x}_1(0) = V$   $\dot{x}_2(0) = 0$

Integrasi persamaan (12) dan dengan kondisi awal di atas akan memberikan perpindahan  $x_1$  dan beban impact sebagai fungsi dari kecepatan awal dan massa pengimpak.

$$x_1 = V \cdot t - \frac{1}{M_1} \iint P(t) \cdot dt \cdot dt \quad (15)$$

Perpindahan struktur  $x_2$  dapat dihitung dengan integral duhamel

$$x_2 = \sum_n A_n \int P(\tau) \sin \omega_n (t - \tau) d\tau \quad (16)$$

Saat terjadi penetrasi, perpindahan pengimpak  $x_1$  sama dengan perpindahan struktur  $x_2$  ditambah deformasi permukaan  $a$ . Bila deformasi permukaan  $a$  sangat kecil dibandingkan dengan deformasi struktur maka  $a$  dapat diabaikan, dan kondisi kesetimbangannya adalah:

$$V.t - \frac{1}{M_1} \int \int P(t).dt.dt - \sum_n A_n \int P(\tau) \sin \omega_n(t - \tau) d\tau = 0 \quad (17)$$

Penyelesaian persamaan (17) ini akan sekaligus memberikan beban impact dan sekaligus respon struktur dan pengimpak (Rossikhin dan Shitikova, 2007).

## 5. Studi kasus

Studi kasus dilakukan dengan meninjau pelat kaca berukuran 350x350mm dengan ketebalan 5mm yang tertumpu sederhana pada keempat sisinya. Pengimpak adalah bola baja yang dijatuhkan dari ketinggian 150mm dan 400mm. Data struktur dan pengimpak adalah seperti pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Data struktur dan pengimpak

Item	Pengimpak	Struktur
Bahan	Baja	Kaca
Modulus Elastisitas	207,000 MPa	68,500 MPa
Poisson ratio	0.3	0.23
Berat jenis	7850 kg/m <sup>3</sup>	2500 kg/m <sup>3</sup>
Massa	662 gr	

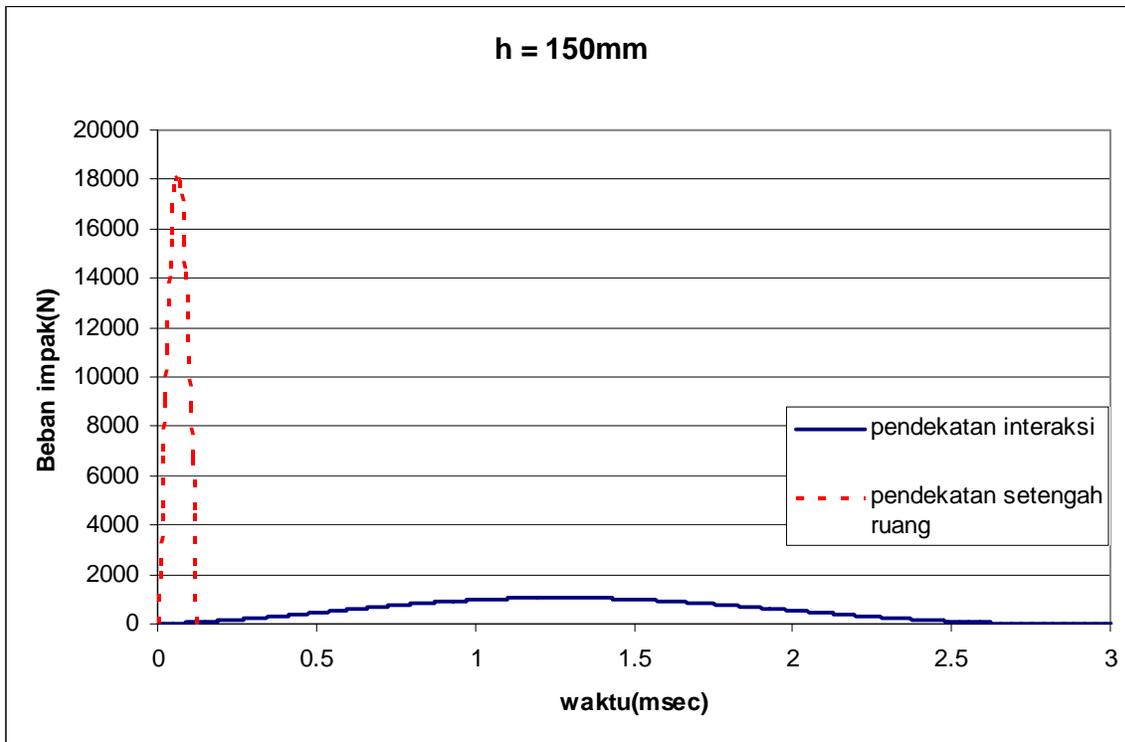
Massa dan kekakuan efektif struktur pada kasus ini dihitung dengan persamaan (8) dan (9) dan didapatkan:  $m_{eff} = 0.383 \text{ kg}$ , dan  $k_{eff} = 5.991.10^5 \text{ Nm}^{-1}$ . Kondisi redaman struktur diasumsikan memiliki rasio redaman 14%. Analisis dilakukan dengan 2 metode yang telah disebutkan di depan yaitu dengan pendekatan setengah ruang dan pendekatan interaksi pengimpak-struktur.

## 6. Hasil analisis dan pembahasan

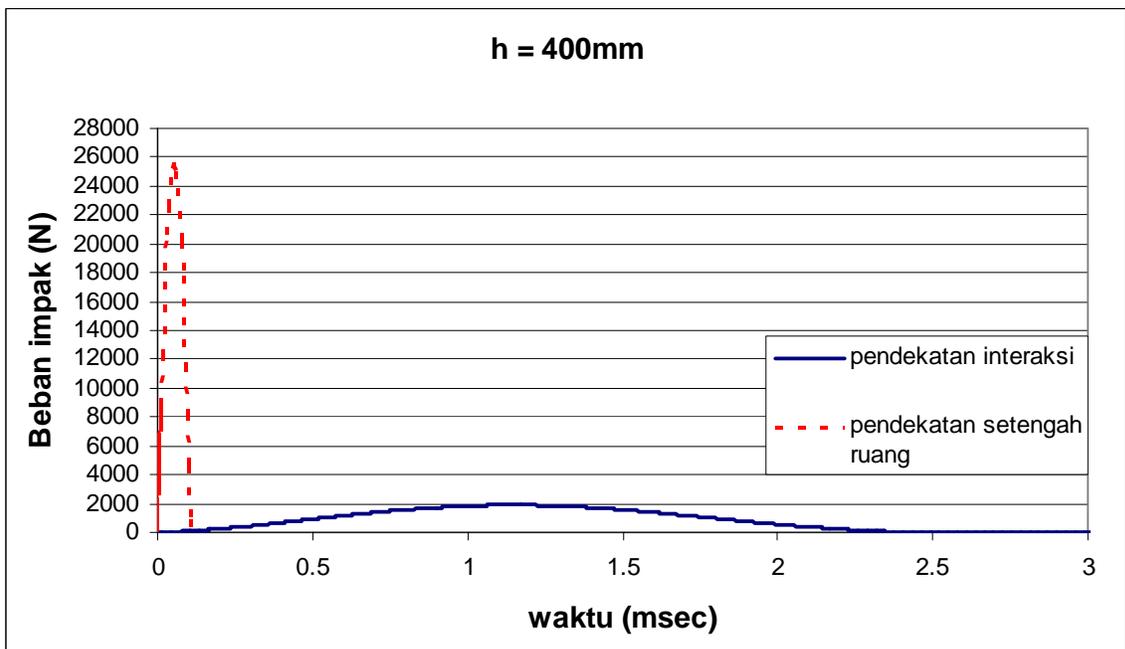
Hasil analisis ditampilkan dengan membandingkan beban impact dan respon struktur dari kedua cara analisis tersebut.

### 6.1. Beban impact

Beban impact dari kedua cara analisis tersebut adalah seperti pada gambar 4 dan 5 berikut:



Gambar 4. Beban impak dengan tinggi jatuh pengimpak h = 150mm



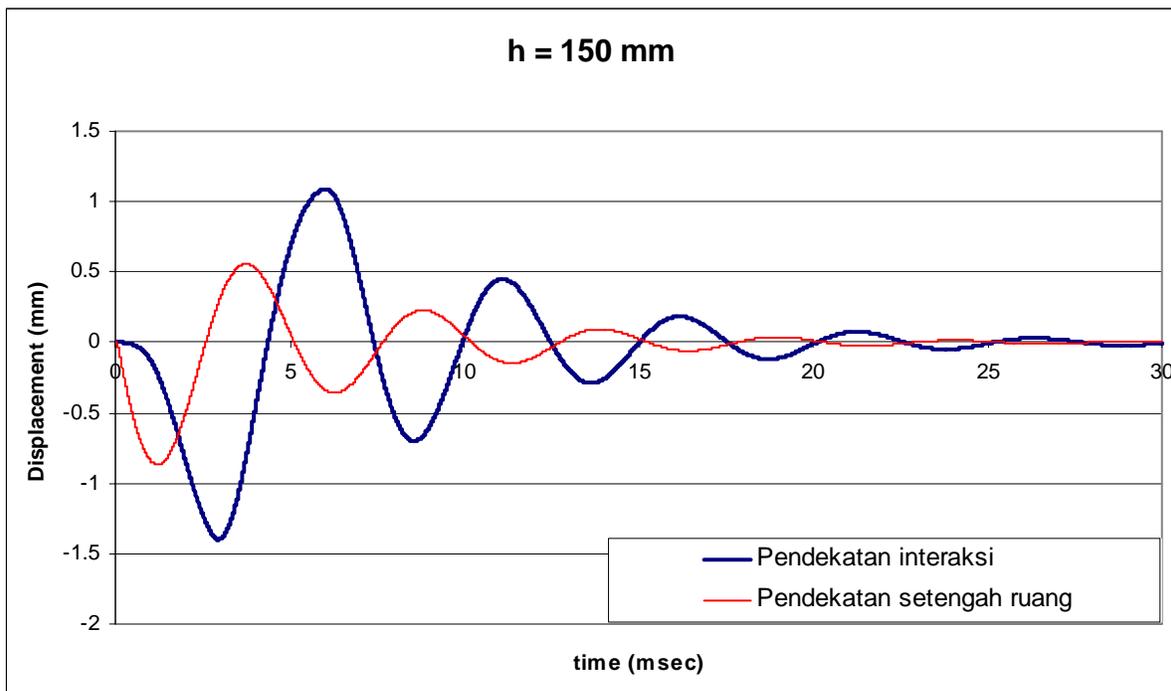
Gambar 5. Beban impak dengan tinggi jatuh pengimpak h = 400mm

Terlihat bahwa perhitungan beban impak dengan metode setengah ruang memberikan hasil yang jauh lebih besar dari pendekatan yang menggunakan interaksi struktur dan pengimpak. Perbedaan lainnya adalah pada lama pembebanan, dimana pendekatan setengah ruang memberikan perkiraan

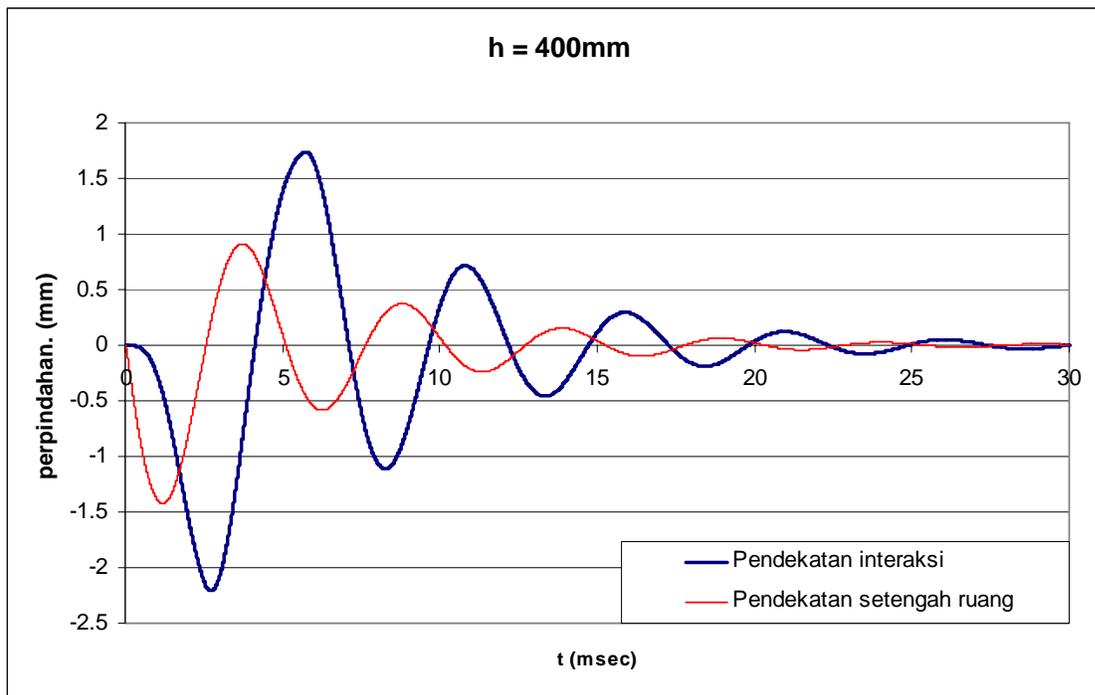
lama pembebanan yang sangat singkat dibandingkan dengan pendekatan interaksi struktur dan pengimpak.

### 6.2. Respon struktur

Perpindahan struktur dari hasil analisis struktur menunjukkan bahwa riwayat waktu struktur yang didapatkan dari kedua cara analisis ini juga berbeda, seperti terlihat pada gambar 6 dan 7. Perbedaan ini karena pada model setengah ruang waktu pembebanan sangat singkat sehingga massa pengimpak hanya sedikit memberikan kontribusi pada kelenturan struktur. Lebih jauh lagi, analisis riwayat waktu perpindahan struktur ini menunjukkan bahwa pendekatan setengah ruang memberikan nilai perpindahan yang lebih kecil dibandingkan dengan pendekatan interaksi struktur dan pengimpak.



Gambar 6. Perpindahan struktur di tengah bentang dengan tinggi jatuh pengimpak  $h = 150\text{mm}$



Gambar 7. Perpindahan struktur di tengah bentang dengan tinggi jatuh pengimpak  $h = 400\text{mm}$

## 7. Penutup

Dari pemaparan di atas dapat dilihat bahwa perbedaan dalam pengambilan model beban impak berakibat pada perbedaan beban maksimum yang diperoleh, dan juga lama pembebanan. Perbedaan riwayat pembebanan dapat memberikan perkiraan yang salah pada respon struktur dan perhitungan kekuatan struktur.

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa riwayat perpindahan struktur sebagai SDOF pada kedua cara analisis tersebut berbeda. Meskipun momentum yang ditransfer ke struktur sama, namun kondisi kelenturan struktur yang juga dipengaruhi penambahan massa dari beban, berpengaruh besar pada riwayat perpindahan struktur.

## 8. Daftar pustaka

Abrate, S., 2001, Modelling of impacts on composite structures, *Composite Structures*, Vol 51(2001), 129-138

Clough, R.W., and Penzien, J., 1993, *Dynamics of Structures*, 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill, Singapore

Pashah, S., Massenzio, M., Jacquelin, E., 2008, Prediction of structural response for low velocity impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol 35(2008), 119-132.

Rossikhin, Y.A, Shitikova, M.V., 2007, Transient response of thin bodies subjected to impact: wave approach, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 39, No.4, 273-309