

## Pengembangan Perangkat Lunak Analisis Respons Struktur terhadap Beban Ledakan Berbasis *Open Source*

Rusman dan Mochamad Safarudin

Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Mandala Bandung  
Jl. Soekarno Hatta No.597 Bandung 40284  
e-mail :rusman\_st\_mandala@yahoo.com  
e-mail : [mochsafarudin@gmail.com](mailto:mochsafarudin@gmail.com)

### Abstrak

Serangan bom akhir-akhir ini kerap terjadi di Indonesia. Beban akibat ledakan bom tersebut dapat menimbulkan kerugian baik jiwa manusia maupun struktur bangunan dan infrastruktur lainnya. Kerusakan struktur bangunan akibat beban ledakan dapat menyebabkan keruntuhan bangunan yang juga dapat membahayakan manusia yang berada di dalamnya atau di sekitarnya. Sebuah struktur bangunan baik bangunan militer maupun bangunan sipil memerlukan perancangan yang mempertimbangkan beban ledakan tersebut. Analisis respons struktur terhadap beban ledakan dapat menggunakan metode yang terkini misalnya dengan analisis dengan metode elemen hingga untuk beberapa derajat kebebasan. Analisis menggunakan metode ini harus menggunakan perangkat lunak komersial yang harganya cukup tinggi walaupun hasilnya cukup akurat dalam aplikasinya. Dengan kendala kerumitan pemodelan dan harga yang relatif tinggi tersebut, sebuah alternatif perangkat lunak dikembangkan yang menganalisis respons struktur terhadap beban dinamik terutama dari ledakan dengan metode sederhana yaitu hanya mempertimbangkan satu derajat kebebasan yang sebenarnya sudah cukup dalam perancangan struktur utama misalnya balok, pelat dan struktur rangka satu tingkat. Perangkat lunak tersebut telah diuji dan divalidasi dengan perangkat lunak komersial seperti Abaqus untuk beberapa kasus respons balok.

Kata kunci: struktur bangunan, beban ledakan, analisis respons, satu derajat kebebasan

### 1. Pendahuluan

Perancangan struktur bangunan militer dan sipil yang strategis memerlukan perhitungan respons komponen struktur dan rangka terhadap beberapa beban. Untuk bangunan militer dan bangunan sipil yang termasuk dalam kategori strategis diperlukan analisis respons struktur terhadap ledakan bom (*blast load*). Analisis respons struktur dapat dilakukan dengan metode analisis terkini seperti metode elemen hingga yang memerlukan waktu pemodelan dan analisis yang relatif lama serta biaya untuk perangkat lunak komersial yang cukup tinggi.

Analisis respons struktur dengan pendekatan satu derajat kebebasan telah dilakukan oleh Biggs [1], Brooks [2] maupun Olmati [12] dengan metode *constant velocity*, *constant acceleration*, metode Newmark ataupun metode numerik cara Runge-Kutta.

Beberapa organisasi internasional juga telah mengeluarkan standard dan petunjuk untuk perancangan serta analisis struktur terhadap beban ledakan [4,5,8,9,10]. Bahkan angkatan bersenjata Amerika Serikat telah mengembangkan *spreadsheet* untuk analisis respons struktur SDOF tersebut yang hanya boleh digunakan oleh kontraktor pertahanan di Amerika Serikat [13]. *Spreadsheet* tersebut dibuat berdasarkan analisis yang dilakukan oleh *Corps of Engineer* Angkatan Darat Amerika Serikat [4,5].

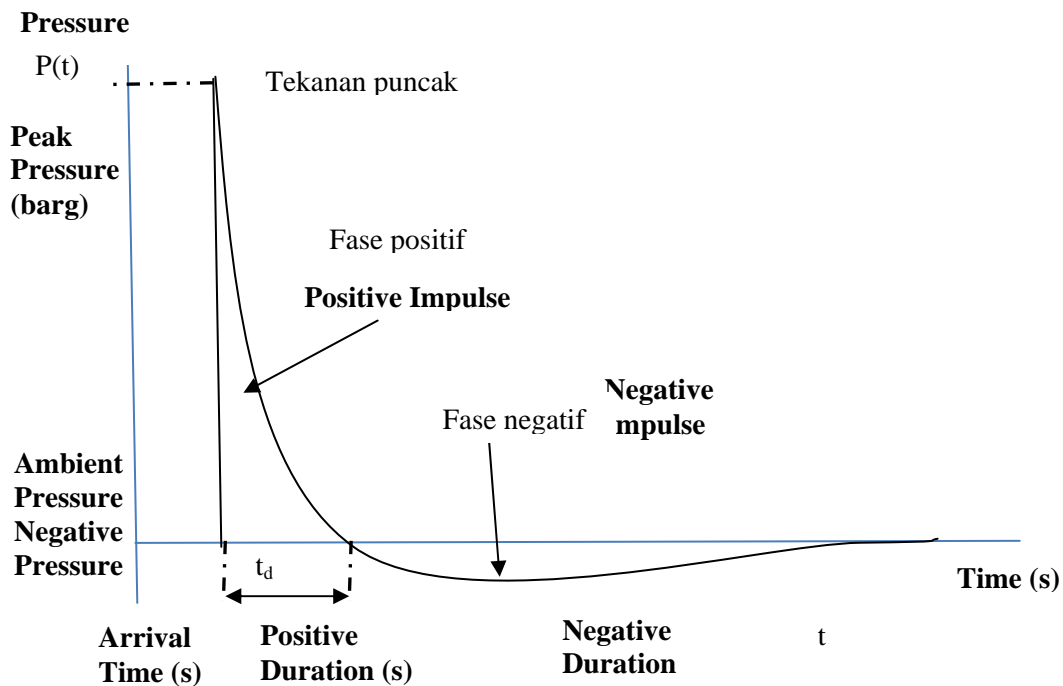
Alat bantu (tools) untuk perancangan dan analisis respons struktur SDOF tersebut semuanya dikembangkan menggunakan perangkat lunak komersial seperti Microsoft Excel, Fortran dan lain-lain dan juga hanya boleh dipergunakan di kalangan terbatas untuk menjaga kerahasiaannya.

Untuk itulah dikembangkan perangkat lunak berbasis *open source* yaitu Python [7] yang menganalisis respons struktur dan rangka sederhana dengan metode satu derajat kebebasan (*SDOF*). Pengembangan

perangkat lunak ini bertujuan untuk menyediakan tool yang bebas biaya bagi perancang bangunan maupun kalangan industri/akademisi yang berminat dalam bidang tersebut. Walaupun analisis hanya dilakukan untuk satu derajat kebebasan saja, untuk struktur balok, pelat dan rangka satu tingkat hasil respons struktur dari perangkat lunak tersebut sudah cukup memadai untuk pemilihan jenis material dan kondisi batas dari struktur terhadap beban dinamik khususnya beban ledakan.

### 1.1 Beban ledakan pada struktur

Gelombang ledakan secara umum digambarkan sebagai peningkatan tekanan hingga mencapai puncaknya, turun menuju tekanan atmosfer lalu melalui fasa tekanan negatif seperti ditunjukkan di Gambar 1 [6,11].



**Gambar 1** Kurva beban ledakan terhadap waktu pada umumnya

Kurva beban ledakan terhadap waktu tersebut dapat didekati dengan solusi tertutup dengan fungsi eksponensial sebagai berikut [3]:

$$P_s(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-b \frac{t}{t_0}} \quad (1)$$

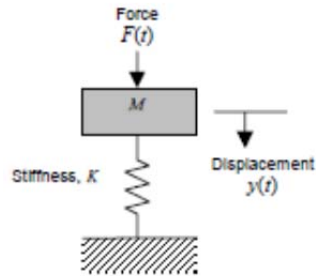
Di mana:

- $P_s$  is the peak overpressure
- $t_0$  is the positive phase duration,
- $b$  is a decay coefficient of the waveform and
- $t$  is the time elapsed, measured from the instant of blast arrival

### 1.2 Respons struktur terhadap beban ledakan

Pendekatan paling sederhana untuk mencari respons struktur yaitu dengan mengasumsikan struktur mengalami gerakan dalam satu derajat kebebasan (SDOF). Struktur atau sistem dapat diwakili oleh

sistem ekuivalen dengan satu massa tergumpal dan satu pegas tak bermassa yang menyimpan energi seperti diilustrasikan di Gambar 2.



**Gambar 2** Idealisasi struktur menjadi sistem satu derajat kebebasan

Beban ledakan dapat diidealisasikan sebagai pulsa segitiga dengan beban puncak  $F_m$  dan durasi fase positif  $t_d$  seperti disajikan di Gambar 3. Fungsi gaya tersebut secara matematika adalah:

$$F(t) = F_m \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \quad (2)$$

Impuls ledakan dapat didekati oleh luas di bawah kurva gaya-waktu:

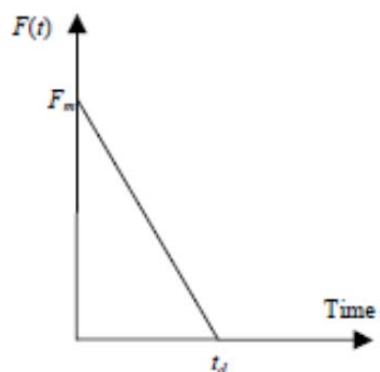
$$M\ddot{y} + Ky = F_m \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \quad (3)$$

Yang merupakan persamaan diferensial orde dua dengan solusi umum untuk perpindahan  $y$  adalah:

$$y(t) = \frac{F_m}{K} (1 - \cos \omega t) + \frac{F_m}{K t_d} \left(\frac{\sin \omega t}{\omega} - t\right) \quad (4)$$

serta kecepatan

$$\dot{y}(t) = \frac{F_m}{K} (\omega \sin \omega t) + \frac{1}{t_d} (\cos \omega t - 1) \quad (5)$$



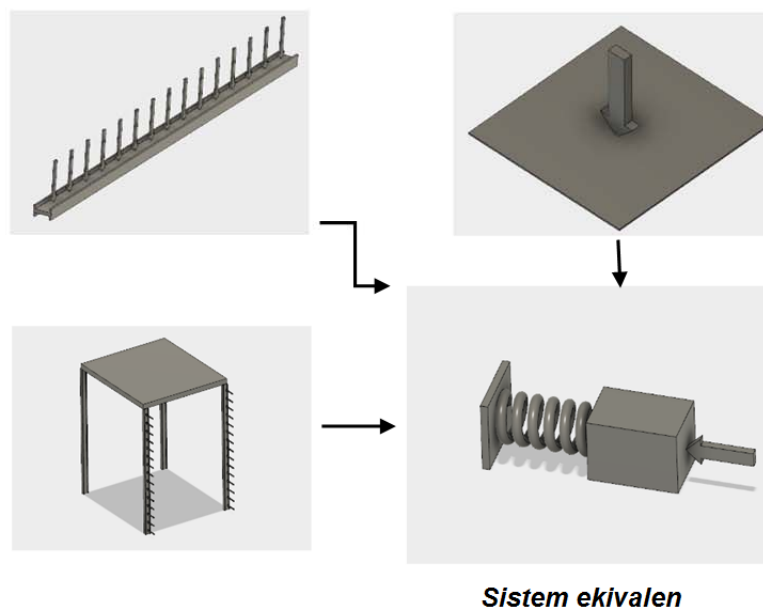
**Gambar 3** Kurva beban ledakan ideal

### 1.3 Solusi SDOF dengan analisis numerik

Solusi persamaan gerak satu derajat kebebasan dapat dicari dengan menggunakan integrasi numerik. Solusi dicari selangkah demi selangkah dari waktu nol dengan mengetahui perpindahan dan kecepatan saat waktu sebelumnya. Salah satu solusi yaitu dengan menggunakan metode kecepatan tetap (*constant velocity*) [1].

## 1.4 Metode pendekatan

Metode mencari solusi respons struktur satu derajat kebebasan dengan solusi tertutup dan solusi numerik hanya dapat diaplikasikan untuk struktur yang relatif sederhana. Untuk itu untuk sebuah struktur aktual harus dapat diwakilkan oleh sistem satu derajat kebebasan dengan parameter kekakuan dan massa ekuivalen yang diilustrasikan di Gambar 4. Parameter-parameter tersebut telah dikaji oleh Biggs [1].



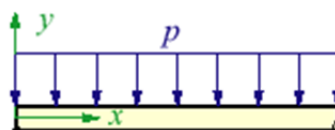
Gambar 4 Balok, pelat dan bangunan satu tingkat diwakili oleh sistem satu derajat kebebasan ekuivalen

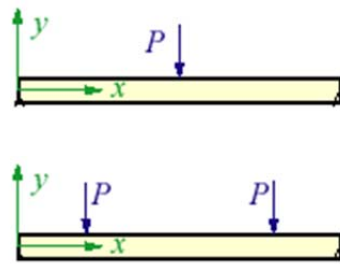
## 2. Metodologi

Perangkat lunak ini menggunakan skema *constant velocity* dalam analisis numeriknya. Beban input yang diberikan dapat berupa file text yang berisi waktu pembebanan dan besar pembebanan (time history) ataupun langsung dari perangkat lunak analisis ledakan misalnya yang berbasis *Computational Fluid Dynamics (CFD)* yaitu FLACS (dari [www.gexcon.com](http://www.gexcon.com)). Model material dan jenis struktur dapat dipilih dalam menu yang ada. Hasil analisis adalah berupa grafik respons (perpindahan/displacement) dari struktur jika struktur dianggap sebagai sistem satu derajat kebebasan.

### 2.1 Pembebanan struktur

Pembebanan struktur yang dapat diberikan adalah beban terpusat, beban terdistribusi dan beban di 2 titik seperti ditunjukkan di Gambar 5. Kondisi batas struktur dapat berupa tumpuan sederhana, tumpuan kaku maupun kombinasi (*propped*).





Gambar 5 Jenis pembebanan struktur di perangkat lunak analisis respons struktur SDOF

## 2.2 Sifat penampang struktur

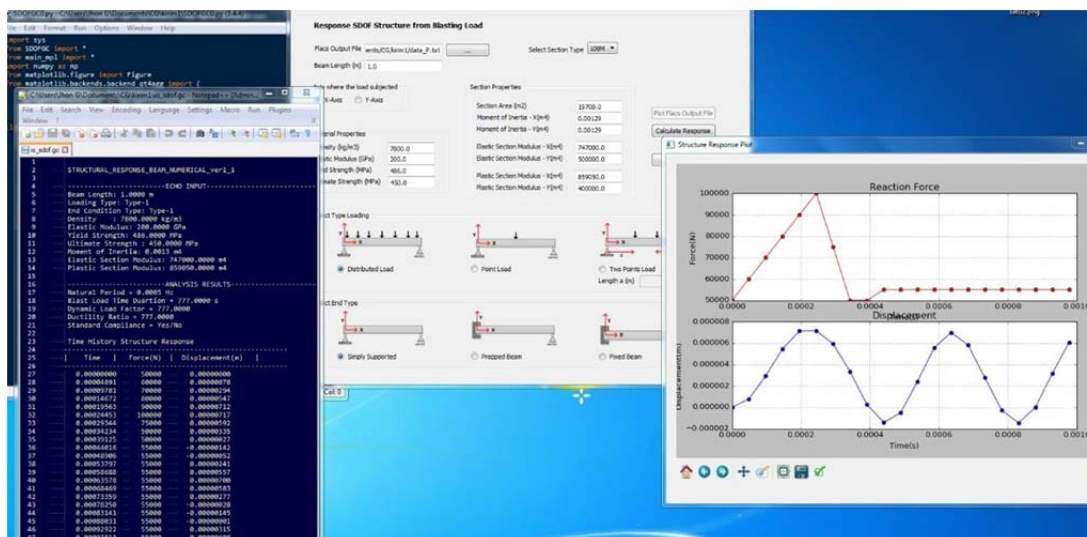
Respons struktur juga akan dipengaruhi oleh sifat penampang melintang yang akan menahan beban dengan mengalami tegangan. Sumbu koordinat yang mengakibatkan momen lentur akibat beban juga harus ditentukan.

## 2.3 Faktor transformasi

Massa dan kekakuan ekuivalen diwakilkan oleh faktor transformasi yang tergantung dari jenis pembebanan dan kondisi batas struktur [1].

## 2.4 Perhitungan respons struktur

Jika semua data masukan telah lengkap maka perpindahan (defleksi) struktur akan dicari dengan metode numerik kecepatan tetap. Respons material struktur dapat berada dalam batas elastik maupun plastis. Tampilan antar muka grafis program ini disajikan di Gambar 6.



Gambar 6 Tampilan antarmuka grafis (GUI) program analisis respons SDOF

## 3. Hasil dan Pembahasan

Beberapa kasus analisis struktur telah dicoba dan hasilnya telah dibandingkan dengan perangkat lunak berbasis Metode Elemen Hingga yaitu Abaqus versi 13.5 dan menunjukkan hasil yang cukup mendekati dengan perbedaan yang sangat kecil (<5%) seperti ditabulasikan di Tabel 1. Kasus-kasus

yang diverifikasi adalah merupakan kombinasi dari pembebanan serta kondisi batas (misalnya kasus 1 adalah pembebanan terdistribusi merata dengan kondisi batas tumpuan sederhana dan seterusnya) serta diterapkan pada balok struktur dengan standar Inggris [3].

**Tabel 1** Verifikasi hasil respons struktur dari program SDOF dibandingkan dengan perangkat lunak FEA Abaqus

Kasus	d (mm) maksimum		% perbedaan
	Program SDOF	FEM	
1	28.1	27.54	2.033405955
2	7.5	7.24	3.591160221
3	6.4	6.65	-3.759398496
4	11.6	11.85	-2.109704641
5	3.4	3.251	4.583205168
6	2.7	2.65	1.886792453
7	5.6	5.35	4.672897196
8	1.9	1.745	8.88252149

#### 4. Kesimpulan dan Saran

Perangkat lunak analisis respons struktur dengan satu derajat kebebasan telah dikembangkan dan divalidasi untuk beberapa kasus respons balok. Diharapkan perangkat lunak tersebut dapat digunakan oleh kalangan perancang bangunan, industri maupun akademisi yang tertarik untuk perancangan struktur terhadap beban dari ledakan.

#### Daftar Pustaka

- [1] Biggs, John M, Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill, 1964
- [2] Brooks, N.B. and Newmark, N.M., "The Response of Simple Structures to Dynamics Loads", Technical Report, Office of Naval Research, University of Illinois at Urbana, 1953
- [3] BS 5950: Part 1, Structural use of steelwork in building
- [4] CoE, "Design of Structures to Resist the Effects of Atomic Weapons", Manuals-Corps of Engineers, US-Army
- [5] DANAF, "Structure to Resist the Effects of Accidental Explosions", Departments of the Army, Navy and the Air Force, November 1990
- [6] Draganic, H, Vladimir, S, "Blast Loading on Structures", Technicky vjesnik 19, 3(2012), pp 643-652
- [7] Elkner, Jeffrey, et.al, How to Think Like a Computer Scientist: Learning with Python Documentation, Release 2<sup>nd</sup> Edition
- [8] FABIG Technical Note 4, Explosion Resistant Design of Offshore Structures
- [9] FABIG Technical Note 7, Simplified Methods for Analysis of Response to Dynamic Loading
- [10] Interim Guidance Notes for the Design and Protection of Topside Structures against Explosion and Fire, Joint Industry Project on Blast and Fire Engineering for Topside Structures, the Steel Construction Institute
- [11] Karlos, V, Solomos, G, "Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components", JRC Technical Reports, European Commission, 2013
- [12] Olmati, P., Petrini, F., Bontempi, F., "Numerical Analyses for the structural assessment of steel buildings under explosions", Structural Engineering and Mechanics, Vol.45, No.6 (2013), pp803-819
- [13] PDC, "Single Degree of Freedom Blast Effects Design Spreadsheets (SBEDS), Protective Design Center, US-Army Corps of Engineer