

ANALISA MENARA AIR AKIBAT GEMPA MENGGUNAKAN SOLUSI NUMERIK INTEGRAL DUHAMEL

Crisando Daniels Matani

H. Manalip, R. S. Windah, S. O. Dapas

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi

email: danielsmatani@gmail.com

ABSTRAK

Dalam penulisan ini struktur yang digunakan berupa menara air yang diidealisasikan berupa struktur berderajat kebebasan tunggal (Single Degree of Freedom). Beban yang bekerja pada struktur adalah beban dinamis berupa beban gempa. Dalam sistem SDOF respons struktur yang terjadi disebabkan oleh beban dinamik diasumsikan searah horizontal. Untuk mendapatkan respons struktur berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan dihitung secara numerik menggunakan solusi persamaan Integral Duhamel.

Perhitungan dimulai dengan memberikan gaya luar pada sistem struktur dan dihitung nilai respons yang dihasilkan. Setelah dimasukkan data beban gempa kemudian dimulai proses perhitungan yang memakai prosedur numerik yang dalam hal ini dipakai Metode Simpson $1/3$ dan Metode Simpson $3/8$ dan didapat nilai respons yang dihasilkan oleh struktur. Penyelesaian solusi numerik Integral Duhamel ini menggunakan bantuan program komputer untuk mempermudah dalam menyelesaikan persamaan numerik. Perhitungan digunakan untuk beberapa nilai koefisien redaman yang kemudian dibandingkan hasilnya. Dalam hal ini juga digunakan program lain sebagai pembanding hasil respons struktur yang didapat yaitu program SAP 2000 versi 14.

Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa penggunaan ketiga metode baik Simpson $1/3$, Simpson $3/8$ dan SAP 2000 versi 14 memberikan suatu trend grafik yang sama walaupun memiliki nilai respons yang berbeda dikarenakan pendekatan yang dipakai berbeda untuk masing-masing metode. Selain itu juga didapat bahwa untuk fungsi percepatan gempa maksimum dan beban maksimum tidak menghasilkan respons struktur yang maksimum.

Kata Kunci: Respons struktur, Integral Duhamel, Solusi numerik, Beban dinamis, Metode Simpson

PENDAHULUAN

Letak geografis wilayah Indonesia yang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama; lempeng India-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik, menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara yang memiliki potensi aktivitas seismik cukup tinggi dan rawan terhadap bahaya gempa. Disebabkan oleh tingginya aktivitas seismik tersebut, maka dalam perencanaan bangunan di Indonesia harus diperhatikan aspek-aspek kegempaan, disamping tinjauan aspek-aspek pembebanan lainnya. Besarnya simpangan, kecepatan dan percepatan yang terjadi pada bangunan adalah respons struktur akibat beban atau percepatan gempa yang

merupakan hal yang sangat penting. Hal tersebut sangat berpengaruh pada keamanan dan efisiensi suatu desain bangunan.

Respons struktur merupakan riwayat waktu dari perpindahan, kecepatan dan percepatan dari fungsi beban tertentu, untuk struktur dengan derajat kebebasan tunggal dan banyak. Pada permasalahan beban dinamis seperti beban ledakan, beban angin, beban getaran mesin dan beban gempa, beban dan respons strukturnya merupakan fungsi dari waktu, sehingga analisis yang dilakukan harus berdasarkan waktu.

Pembebanan pada struktur akibat beban dinamis dapat terjadi sewaktu-waktu, maka untuk perencanaan bangunan perlu diperhitungkan pengaruh beban ini. Adakalanya struktur yang direncanakan

harus menerima beban secara berulang-ulang (periodik) yang tidak diperhitungkan sebelumnya. Untuk dapat memperhitungkan kemungkinan yang timbul akibat beban dinamis yang terjadi, maka perlu ditinjau bagaimana respons yang terjadi pada struktur bangunan tersebut (Suryanita Reni dan Sarfika Hendra. 2007).

Struktur yang ditinjau dalam penelitian ini adalah struktur dengan sistem berderajat kebebasan tunggal (*Single Degree of Freedom*), yaitu berupa struktur menara air. Menara air merupakan struktur yang ditinggikan berfungsi menampung persediaan air sehingga memiliki massa terpusat. Oleh sebab itu menara air dapat dianggap mewakili karakteristik dari struktur berderajat kebebasan tunggal dalam analisis dinamis dan dimodelisasi sebagai sistem dengan kordinat perpindahan tunggal. Beban dinamis yang bekerja pada struktur menara air menimbulkan respons struktur dari menara air. Untuk menghitung respons struktur dari menara air inilah digunakan analisis dinamis.

Pada umumnya beban dinamis yang berupa beban gempa sulit dinyatakan dalam suatu bentuk matematis yang sederhana secara eksak. Hal ini dikarenakan karena beban gempa memiliki suatu bentuk fungsi yang terjadi secara acak. Oleh sebab itu, beban gempa yang memiliki bentuk acak tidak dapat diselesaikan dalam bentuk matematis secara eksak. Analisis dinamis struktur menara air akibat beban gempa ini dapat diselesaikan dengan penyelesaian yang berupa solusi numerik

Ada beberapa konsep yang dipakai dalam penyelesaian persoalan dinamika struktur dan perencanaan bangunan tahan gempa. Salah satu konsep yang dipakai adalah solusi persamaan dinamis menggunakan persamaan Integral Duhamel. Dikarenakan beban yang terjadi merupakan beban gempa yang memiliki bentuk acak maka penyelesaian persamaan dinamis Integral Duhamel untuk struktur menara air tersebut menggunakan solusi numerik.

Berkaitan dengan hal-hal yang disebutkan diatas, maka penulis mencoba meneliti tentang "*Analisa Menara Air Akibat Gempa Menggunakan Solusi Numerik Integral Duhamel*".

STUDI PUSTAKA

Beban Gempa

Gempa adalah getaran atau guncangan yang terjadi di permukaan bumi. Gempa bumi biasa disebabkan oleh pergerakan kerak bumi (lempeng bumi). Bumi kita walaupun padat, selalu bergerak, dan gempa bumi terjadi apabila tekanan yang terjadi karena pergerakan itu sudah terlalu besar untuk dapat ditahan. Gempa merupakan peristiwa alam yang stokastik, sangat acak dalam waktu.

Beban gempa tidak sama dengan beban angin. Kerusakan gedung oleh getaran permukaan tanah saat terlanda gempa bukan oleh gaya luar (seperti pada beban angin) melainkan oleh gaya dalam, karena titik tangkap beban gempa berimpit dengan titik berat massa gedung. Gaya gempa itu timbul karena adanya gerakan massa itu sendiri. Dalam dunia teknik sipil gempa bumi dijadikan beban rencana dalam perhitungan kekuatan suatu bangunan. Beban gempa atau percepatan gempa biasa disimbolkan dengan \ddot{x}_g . (Clough W.R and Penzien J. 2003).

Menara Air

Menara air adalah sebuah bak penyimpanan air yang ditinggikan dan dibangun untuk menampung persediaan air pada tinggi yang cukup untuk memberi tekanan pada sistem distribusi air. Selain itu menara air juga digunakan untuk menyediakan penyimpanan darurat untuk proteksi terhadap kebakaran.

Menara air dapat memasok air bahkan selama listrik padam, karena menara air bergantung pada tekanan hidrostatis yang dihasilkan oleh elevasi air (karena gravitasi) untuk mendorong air kedalam sistem air domestik dan industri, namun menara air tidak dapat memasok air untuk waktu yang lama tanpa listrik karena biasanya diperlukan pompa untuk mengisi air di menara. Sistem kerja menara air terdiri dari 3 bagian yaitu stasiun pompa, reservoir, dan pengguna air.

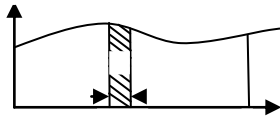
1. Stasiun pompa
2. Reservoir
3. Pengguna air

Persamaan Dinamis Integral Duhamel

Pembebanan impuls adalah pembebanan yang berlangsung dalam selang waktu yang singkat. Impuls pada pembebanan ini

didefinisikan sebagai perkalian dari gaya dan selang waktu bekerjanya gaya tersebut. Contoh impuls dari suatu gaya $F(\tau)$ digambarkan, pada Gambar (1), pada waktu τ selang interval $d\tau$, yang digambarkan oleh daerah berarsir, sama dengan $F(\tau)d\tau$. Impuls ini bekerja pada massa m yang dapat ditentukan dari Hukum Gerak Newton, seperti :

$$m \frac{dv}{d\tau} = F(\tau) \quad (1)$$



Gambar1. Fungsi gaya impuls umum

diatur kembali sehingga:

$$dv = \frac{F(\tau)d\tau}{m} \quad (2)$$

dimana $F(\tau)d\tau$ adalah impuls dan dv adalah pertambahan kecepatan. Pertambahan kecepatan ini dapat diambil sebagai kecepatan awal dari suatu massa pada waktu τ . Sekarang kita tinjau impuls $F(\tau)d\tau$ bekerja pada struktur yang bekerja pada osilator tak teredam. Pada waktu τ osilator mengalami perubahan kecepatan, perubahan kecepatan ini sebagai kecepatan awal \dot{y}_0 bersama dengan perpindahan awal $y_0 = 0$ pada waktu τ , yang mengakibatkan perpindahan pada waktu berikutnya τ , diberikan oleh

$$dy(t) = \frac{F(\tau)d\tau}{m\omega} \sin \omega(t-\tau) \quad (3)$$

Proses pembebanan dapat dilihat sebagai dari suatu seri dari impuls pendek pada setiap pertambahan waktu $d\tau$, dimana setiap impuls tersebut membentuk respons differensial pada waktu t . Sebab itu dapat disimpulkan bahwa perpindahan total pada waktu t akibat suatu aksi berkesinambungan dari gaya $F(\tau)$ diberikan oleh penjumlahan atau integral dari perpindahan differensial $dy(t)$ dari waktu $t = 0$ sampai waktu, yaitu

$$y(t) = \frac{1}{m\omega} \int_0^t F(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

dimana:

- m = massa
- $F(\tau)$ = fungsi beban gempa
- \dot{y}_0 = kecepatan awal
- y_0 = simpangan awal

- τ = interval waktu
- ω = frekuensi sudut
- t = waktu
- $y(t)$ = simpangan

Integral pada persamaan ini dikenal sebagai *Integral Duhamel*.(Paz, Mario.1990).

Integrasi Numerik

Integrasi numerik adalah salah satu cara untuk menyelesaikan persamaan dinamis Integral Duhamel yang memiliki beban gempa yang terjadi secara acak. Metode numerik yang dipakai dalam penelitian ini adalah Metode *Simpson*^{1/3} dan Metode *Simpson*^{3/8}.

Respons dari sistem teredam yang dinyatakan oleh Integral Duhamel, didapat dengan cara mensubstitusikan impuls $F(\tau)d\tau$ dan kecepatan awalnya $dv = F(\tau)d\tau/m$, seperti pada analisa sistem tak teredam, ke dalam persamaan getaran bebas teredam. Tentukan $y_0 = 0$, $\dot{y}_0 = F(\tau)d\tau/m$, dan substitusikan $t - \tau$ untuk t , didapatkan persamaan differensial perpindahan pada i adalah

$$dy(t) = e^{-\xi\omega(t-\tau)} \frac{F(\tau)d\tau}{m\omega} \sin \omega(t-\tau) \quad (5)$$

Jumlah bagian respons differensial dari semua selang pembebanan, menghasilkan

$$y(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t F(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t-\tau) d\tau \quad (6)$$

yang merupakan respons dari sistem teredam dalam bentuk Integral Duhamel. Untuk evaluasi numerik, diproses seperti pada kondisi tak teredam dan dari Persamaan (6) didapat,

$$y(t) = \{A_D(t) \sin \omega_D t - B_D(t) \cos \omega_D t\} \frac{e^{-\xi\omega t}}{m\omega_D} \quad (7)$$

dimana

$$A_D(t_i) = A_D(t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^{t_i} F(\tau) e^{\xi\omega\tau} \cos \omega_D \tau d\tau \quad (8)$$

$$B_D(t_i) = B_D(t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^{t_i} F(\tau) e^{\xi\omega\tau} \sin \omega_D \tau d\tau \quad (9)$$

Untuk semua bagian fungsi pembebanan linier, $F(\tau)$ disubstitusikan ke Persamaan (8) dan (9) memerlukan evaluasi integral berikut:

$$I_1 = \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{\xi\omega\tau} \cos \omega_D \tau d\tau = \frac{e^{\xi\omega\tau}}{(\xi\omega)^2 + \omega_D^2} (\xi\omega \cos \omega_D \tau + \omega_D \sin \omega_D \tau) \Big|_{t_{i-1}}^{t_i} \quad (10)$$

$$I_2 = \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{\xi\omega\tau} \sin \omega_D \tau d\tau = \frac{e^{\xi\omega\tau}}{(\xi\omega)^2 + \omega_D^2} (\xi\omega \sin \omega_D \tau - \omega_D \cos \omega_D \tau) \Big|_{t_{i-1}}^{t_i} \quad (11)$$

$$I_3 = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \tau e^{\xi\omega\tau} \sin \omega_D \tau d\tau = \left(\tau - \frac{\xi\omega}{(\xi\omega)^2 + \omega_D^2} \right) I_2 + \omega_D \xi \omega^2 + \omega_D^2 I_1 - 1t_i \quad (12)$$

$$I_4 = \int_{t_{i-1}}^{t_i} \tau e^{\xi\omega\tau} \cos \omega_D \tau d\tau = \left(\tau - \frac{\xi\omega}{(\xi\omega)^2 + \omega_D^2} \right) I_1 - \omega_D \xi \omega^2 + \omega_D^2 I_2 - 1t_i \quad (13)$$

(Purcell J. Edwin, dkk.2003)

Dimana I_1 dan I_2 adalah integral yang dinyatakan pada Persamaan (10) dan (11). $A_D(t_i)$ dan $B_D(t_i)$ dalam besaran integral dapat dievaluasi dari bentuk

$$A_D(t_i) = A_D(t_{i-1}) + \left(F(t_{i-1}) - t_{i-1} \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} \right) I_1 + \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} I_4 \quad (14)$$

$$B_D(t_i) = B_D(t_{i-1}) + \left(F(t_{i-1}) - t_{i-1} \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} \right) I_2 + \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} I_3 \quad (15)$$

Akhirnya, substitusikan Persamaan (14) dan (15) ke dalam Persamaan (7) akan memberikan perpindahan pada saat t_i yaitu:

$$y(t_i) = \frac{e^{-\xi\omega t_i}}{m \omega_D} \{ A_D(t_i) \sin \omega_D t_i - B_D(t_i) \cos \omega_D t_i \} \quad (16)$$

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan melalui kajian literatur dengan mengumpulkan materi mengenai persoalan dinamis, dan yang berkaitan dengan menara air.

Langkah selanjutnya membuat alur pikir penyelesaian perhitungan respons struktur menara air akibat beban gempa.

Setelah itu dibuat solusi numerik untuk kasus menara air yang akan ditinjau dalam hal ini solusi numerik yang dipakai adalah Metode Simpson $1/3$ dan Metode Simpson $3/8$. Kemudian digunakan Microsoft Excel untuk membantu perhitungan numerik yang berulang. Dalam menyelesaikan persoalan numeric akibat beban gempa digunakan data percepatan gempa El-Centro selama periode 20 detik. Setelah dimasukkan data beban gempa dan parameter lainnya maka respons struktur yang terjadi dapat diketahui.

Dalam hal ini menara air yang ditinjau terdiri dari Menara Air 4 Kolom, Menara Air 3 Kolom, dan Menara Air 1 Kolom. Respons Struktur yang didapat berupa perpindahan, kecepatan dan percepatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

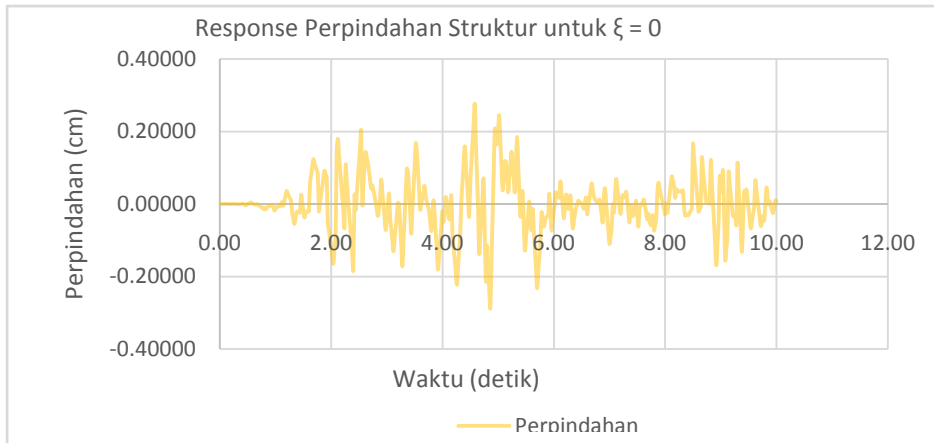
Hasil Respons Struktur dengan Metode Simpson $1/3$ dan Metode Simpson $3/8$

Dari hasil perhitungan numerik untuk Metode Simpson $1/3$ dan Metode Simpson $3/8$ disajikan pada Tabel 1 dan 2 berikut.

Tabel 1: Hasil Respons Maksimum Struktur Metode Simpson $1/3$

| Koefisien Redaman | Respons Max. Struktur | Menara Air 4 Kolom | Menara Air 3 Kolom | Menara Air 1 Kolom |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\xi = 0$ | Perpindahan (cm) | 0.331020 | 0.043573 | 0.029834 |
| | Kecepatan (cm/det) | 186.681033 | 53.398212 | 45.087981 |
| | Percepatan (cm/det ²) | 17.027413 | 30.552547 | 39.487475 |
| $\xi = 0.1$ | Perpindahan (cm) | 0.010286 | 0.000037 | 0.000010 |
| | Kecepatan (cm/det) | 0.088866 | 0.000630 | 0.000204 |
| | Percepatan (cm/det ²) | 0.654726 | 0.318792 | 0.318801 |
| $\xi = 0.15$ | Perpindahan (cm) | 0.002981 | 0.000011 | 0.000002 |
| | Kecepatan (cm/det) | 0.015547 | 0.000084 | 0.000029 |
| | Percepatan (cm/det ²) | 0.388183 | 0.318817 | 0.318820 |
| $\xi = 0.2$ | Perpindahan (cm) | 0.001057 | 0.000003 | 0.000001 |
| | Kecepatan (cm/det) | 0.002866 | 0.000013 | 0.000005 |
| | Percepatan (cm/det ²) | 0.334585 | 0.318820 | 0.318820 |

Sumber: Hasil Perhitungan

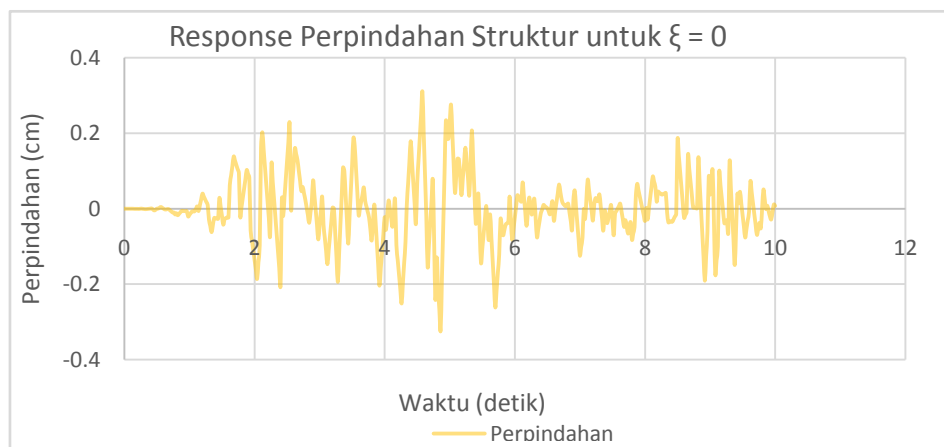


Gambar 1 Grafik Respons Perindahan Struktur Menara Air 4 Kolom untuk $\xi = 0$, Sumber: Hasil Olahan Data

Tabel 2: Hasil Respons Maksimum Struktur Metode Simpson $^{3/8}$

| Koefisien Redaman | Respons Max. Struktur | Menara Air 4 Kolom | Menara Air 3 Kolom | Menara Air 1 Kolom |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\xi = 0$ | Perindahan (cm) | 0.372397 | 0.049019 | 0.033563 |
| | Kecepatan (cm/det) | 186.681033 | 53.398212 | 45.087981 |
| | Percepatan (cm/det ²) | 19.121869 | 34.352576 | 44.397778 |
| $\xi = 0.1$ | Perindahan (cm) | 0.003231 | 0.000012 | 0.000002 |
| | Kecepatan (cm/det) | 0.011082 | 0.000063 | 0.000018 |
| | Percepatan (cm/det ²) | 0.415098 | 0.318821 | 0.318820 |
| $\xi = 0.15$ | Perindahan (cm) | 0.000831 | 0.0000029 | 0.000001 |
| | Kecepatan (cm/det) | 0.000787 | 0.000002 | 0.0000003 |
| | Percepatan (cm/det ²) | 0.329344 | 0.318820 | 0.318820 |
| $\xi = 0.2$ | Perindahan (cm) | 0.000436 | 0.000003 | 0.0000009 |
| | Kecepatan (cm/det) | 0.000575 | 0.0000004 | 0.000000005 |
| | Percepatan (cm/det ²) | 0.320083 | 0.318820 | 0.318820 |

Sumber: Hasil Perhitungan



Gambar 2 Grafik Respons Perindahan Struktur Menara Air 4 Kolom untuk $\xi = 0$, Sumber: Hasil Olahan Data

Hasil Respons Maksimum Struktur dengan Program SAP 2000 versi 14

SAP 2000 versi 14. Hasil respons disajikan dalam Tabel 3 sebagai berikut.

Perhitungan Respons struktur juga dilakukan dengan menggunakan Program

Tabel 3: Hasil Respons Maksimum Struktur dengan Program SAP 2000 versi 14

| Koefisien Redaman | Respons Max Struktur | Menara Air 4 Kolom | Menara Air 3 Kolom | Menara Air 1 Kolom |
|-------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\xi = 0$ | Perpindahan (cm) | 0.2885 | 0.0333 | 0.4056 |
| $\xi = 0.1$ | Perpindahan (cm) | 0.2642 | 0.0467 | 0.348 |
| $\xi = 0.15$ | Perpindahan (cm) | 0.2549 | 0.0445 | 0.3225 |
| $\xi = 0.2$ | Perpindahan (cm) | 0.0025 | 0.0429 | 0.2996 |

Sumber: Hasil Penelitian

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh maka dapat disimpulkan:

1. Respons struktur yang didapatkan dengan menggunakan Metode Simpson $1/3$, Metode Simpson $3/8$, Program SAP 2000 versi 14 memberikan suatu trendgrafik yang sama walaupun mempunyai nilai yang berbeda untuk ketiga contoh menara air. Hal ini menunjukkan bahwa untuk ketiga contoh menara yang berbeda tidak bisa dijadikan perbandingan karena memiliki karakteristik masing-masing yang berbeda baik dari massa, kekakuan, serta redaman natural struktur.
2. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan Metode Simpson $1/3$ dan $3/8$ didapat bahwa untuk nilai percepatan gempa maksimum ($\ddot{x}_g \max$) tidak menghasilkan respons struktur yang maksimum. Hal yang sama juga berlaku untuk beban maksimum ($F(\tau) \max$) tidak menghasilkan respons struktur yang maksimum.

3. Respons struktur yang dihasilkan oleh penggunaan solusi numerik Integral Duhamel tanpa Koefisien Redaman memberikan grafik perpindahan, kecepatan dan percepatan yang acak. Hal ini menunjukkan bahwa struktur memiliki redaman tetapi tidak cukup untuk meredam gaya gempa yang bekerja pada struktur

Saran

1. Disarankan kepada peneliti yang lain untuk menggunakan analisa numerik dalam menyelesaikan persoalan dinamis akibat beban gempa karena sifat beban gempa yang acak.
2. Lebih banyak lagi peneliti yang membuat solusi untuk persamaan dinamis Integral Duhamel dengan metode numerik yang berbeda sehingga bisa dilihat perbedaan yang dihasilkan dari penggunaan kaidah numerik tersebut.
3. Diharapkan ada peneliti yang menggunakan solusi persamaan dinamis Integral Duhamel untuk contoh kasus yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Clough W.R and Penzien J.2003. *Dynamics of Structures*. Computers and Structures Inc. Berkeley
- Paz, Mario.1990. *Dinamika Struktur : Teori dan Perhitungan*. Erlangga. Jakarta
- Purcell J. Edwin, Varberg Dale, and Rigdon E. Steven.2003. *Kalkulus*. Erlangga. Jakarta
- Suryanita Reni dan Sarfika Hendra., 2007. *Respons Struktur SDOF Akibat Beban Sinusoidal dengan Metode Integral Duhamel.*, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Riau.