

# Pengaruh Jumlah Bentangan dan Jumlah Lantai terhadap Kebutuhan Waktu Jeda Antara Gempa Utama dan Gempa Susulan untuk Analisis Dinamis Riwayat Waktu

Hendry David Zacharias <sup>[1]</sup>

<sup>[1]</sup> Prodi Teknik Sipil, Universitas Citra Bangsa, Kupang, 85111, Indonesia

Email: [hendryzachariass2@gmail.com](mailto:hendryzachariass2@gmail.com)\*

\*) Correspondent Author

Received: 05 July 2024; Revised: 02 Juni 2025; Accepted: 14 August 2025

How to cited this article:

Zacharias, H.D., (2025). Pengaruh Jumlah Bentangan dan Jumlah Lantai terhadap Kebutuhan Waktu Jeda Antara Gempa Utama dan Gempa Susulan untuk Analisis Dinamis Riwayat Waktu. Jurnal Teknik Sipil, 21(2), 347–362.  
<https://doi.org/10.28932/jts.v21i2.9344>

## ABSTRAK

Rangkaian gempa dapat mengakibatkan kerusakan kumulatif pada struktur, sehingga dalam disain struktur perlu dipertimbangkan pengaruh gempa susulan terhadap respon struktur. Fitur utama dalam analisis dinamis riwayat waktu menggunakan rangkaian gempa adalah penentuan waktu jeda ( $T_R$ ) dengan panjang tertentu yang disisipkan antara gempa utama dan gempa susulan dengan nilai percepatan nol. Penentuan nilai  $T_R$  menjadi sangat penting karena waktu dan biaya analisis bisa menjadi sangat mahal akibat durasi rangkaian gempa sering kali menjadi sangat panjang. Penelitian ini melakukan analisis dinamis riwayat waktu terhadap 16 model dengan variasi jumlah bentangan dan jumlah lantai namun memiliki luas denah yang sama menggunakan 7 rekaman gempa Northridge 1994. Pada percepatan nol ditambahkan nilai  $T_R$  sebesar 60 detik dan akan ditingkatkan menjadi 120 detik, jika nilai percepatan dan kecepatan atap struktur tidak mencapai nilai yang sangat mendekati nol ( $AR_0$  dan  $VR_0$ ). Hasil penelitian menunjukkan  $T_R$  meningkat mendekati linier dengan peningkatan periode getar struktur ( $T_S$ ), sehingga menambah bentangan akan mengurangi nilai  $T_R$  selama penambahan tersebut memperkecil  $T_S$ , demikian juga menambah jumlah lantai akan menambah nilai  $T_R$  selama penambahan tersebut meningkatkan nilai  $T_S$ . Gempa dengan periode pra-dominan yang besar akan menghasilkan nilai  $T_R$  yang kecil.

**Kata kunci:** Gempa Susulan, *OpenSeesPy*, Respons Struktur, Waktu Jeda.

**ABSTRACT.** *The Effect of Number of Bays and Story on the Required Time Gap Between Mainshock and Aftershock Earthquake for Time History Dynamic Analysis. Seismic sequences cause cumulative structural damage; therefore, aftershocks must be considered in design. A key factor in time history analysis with seismic sequences is the time gap ( $T_R$ ) between the mainshock and aftershocks, during which acceleration is zero.  $T_R$  is critical, as long earthquake durations can lead to high analysis time and cost. This study analyzed 16 structural models with varying numbers of bays and stories but identical plan areas, using seven records from the 1994 Northridge earthquake. At zero acceleration, a  $T_R$  value of 60 seconds is added and will be increased to 120 seconds, if the acceleration and speed values of the roof structure do not reach values very close to zero ( $AR_0$  and  $VR_0$ ). Results show that  $T_R$  increases almost linearly with the structural period ( $T_S$ ). Thus, increasing the number of bays reduces  $T_R$  if  $T_S$  decreases, while increasing the number of stories raises  $T_R$  if  $T_S$  increases. However, earthquakes with longer predominant periods result in smaller  $T_R$  values.*

**Keywords:** *Aftershock, OpenSeesPy, Structure response, Time gap.*

## 1. PENDAHULUAN

Penelitian yang dilakukan terhadap kejadian gempa di masa lalu menunjukkan bahwa rangkaian kejadian gempa meningkatkan kerusakan kumulatif pada struktur (Erdik dkk., 2012; Potter dkk., 2015). Pentingnya mempertimbangkan efek gempa susulan terhadap respons struktur telah dikaji dalam beberapa penelitian. Massumi dkk. (2021) menemukan bahwa gempa yang berurutan dengan mempertimbangkan komponen vertikal memiliki pengaruh yang signifikan terhadap simpangan antar lantai rangka pemikul momen beton bertulang (RC). Demikian juga beberapa penelitian terkait (Bao dkk., 2022; Fikri dkk., 2022; Zhou dkk., 2021) menunjukkan bahwa bahaya gempa susulan mempunyai dampak paling besar terhadap risiko seismik di tingkat sistem dan pada daerah dengan potensi gempa kuat atau bangunan-bangunan penting (Pang dkk., 2023). Mempertimbangkan pengaruh gempa susulan tidak hanya untuk evaluasi terhadap struktur rangka dan jembatan (Xie dkk., 2012), namun juga untuk pemeliharaan struktur bangunan monumental dan bersejarah (Papaloizou dkk., 2016).

Fitur utama dalam penerapan gempa berurutan pada analisis dinamis riwayat waktu adalah penentuan waktu jeda ( $T_R$ ) dengan panjang tertentu yang disisipkan di antara gempa utama (*mainshock*) dan gempa susulan (*aftershock*), dengan nilai percepatan nol untuk memastikan bahwa struktur berhenti bergetar bebas yang diikuti dengan penghilangan eksitasi seismik pada akhir riwayat waktu gerakan tanah (Goda, 2012). Pada kenyataannya gempa susulan biasanya terjadi beberapa menit sampai beberapa hari setelah gempa utama selesai dan terjadi gempa susulan berikutnya. Jeda waktu yang disebutkan di atas merupakan kesempatan bagi struktur untuk menghentikan getaran akibat redaman (Zhai dkk., 2014).

Bomben dkk. (2023) menggunakan waktu jeda 30 detik diantara rangkaian gempa yang disusun untuk menganalisis efek dari gempa beruntun terhadap bangunan industri yang menggunakan rangka bresing konsentris berbentuk X. Hatzigeorgiou dkk. (2010) menggunakan tiga kali durasi kejadian tunggal sebagai jeda waktu antara kejadian gempa MSeq dan gempa ASeq, Moustafa dkk. (2011) menggunakan interval waktu 40 detik untuk memisahkan antar kejadian gempa, dan masih banyak lagi penelitian tentang pengaruh rangkaian gempa terhadap respon struktur dengan menggunakan jeda waktu antara kejadian gempa yang beragam (Hosseini dkk., 2019; Hoveidae dkk., 2021; Pu dkk., 2018; Zhang dkk., 2020).

Estimasi waktu jeda ( $T_R$ ) minimum yang diperlukan untuk analisis terkait pengaruh rangkaian gempa terhadap respons struktur menjadi sangat penting karena waktu dan biaya analisis bisa menjadi sangat mahal karena durasi rangkaian gempa sering kali menjadi sangat panjang. Pirooz dkk. (2021) melakukan penelitian terhadap 244 rekaman gempa dekat sesar dari 122 gempa bumi yang dikerjakan pada sistem berderajat kebebasan tunggal (SDOF) dengan periode getar 0,05 sampai 7 detik (perilaku linier dan non linier) dengan tujuan memperkirakan

waktu yang dibutuhkan struktur untuk menghentikan getaran bebas pada akhir guncangan gempa utama dan menghasilkan suatu persamaan untuk memperkirakan waktu jeda yang optimal berdasarkan periode getar struktur ( $T_s$ ) dan durasi gerakan tanah kuat ( $T_D$ ). Selanjutnya 2 struktur penahan momen baja dengan 4 bentangan, yang memiliki 3 dan 12 lantai, dikenai 30 komponen gerakan tanah untuk menguji akurasi dari persamaan tersebut. Dalam penelitiannya ditemukan bahwa waktu jeda sangat dipengaruhi oleh periode getar struktur ( $T_s$ ).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Pirooz dkk. (2021) model yang diteliti hanya berupa sistem dengan derajat kebebasan tunggal (SDOF) dan analisis pada portal bidang 2D menggunakan material baja untuk sistem dengan derajat kebebasan banyak (MDOF) yang oleh Pirooz dkk. (2021) disebut sebagai keterbatasan penelitiannya yaitu variasi model dan material yang digunakan. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk mengembangkannya dengan menggunakan model sistem MDOF yang lebih beragam yaitu 16 rangka pemikul momen beton bertulang dengan variasi jumlah bentangan dan jumlah lantai namun memiliki luas denah yang sama (Ameri Mohammad dkk., 2019). Struktur dianalisis dengan metode analisis non linier riwayat waktu 3D menggunakan 7 rekaman gempa Northridge 1994 untuk melihat pengaruh variasi jumlah bentangan dan jumlah lantai terhadap  $T_R$  yang diperlukan dengan mengukur respons percepatan dan kecepatan atap. Selanjutnya dibandingkan terhadap persamaan yang dihasilkan oleh Pirooz dkk. (2021).

## 2. METODOLOGI

### 2.1. Data Gempa

Pada penelitian ini digunakan 7 rekaman gempa utama dari gempa Northridge tahun 1994 dengan parameter gerakan tanah sebagaimana ditampilkan pada **Error! Reference source not found..**

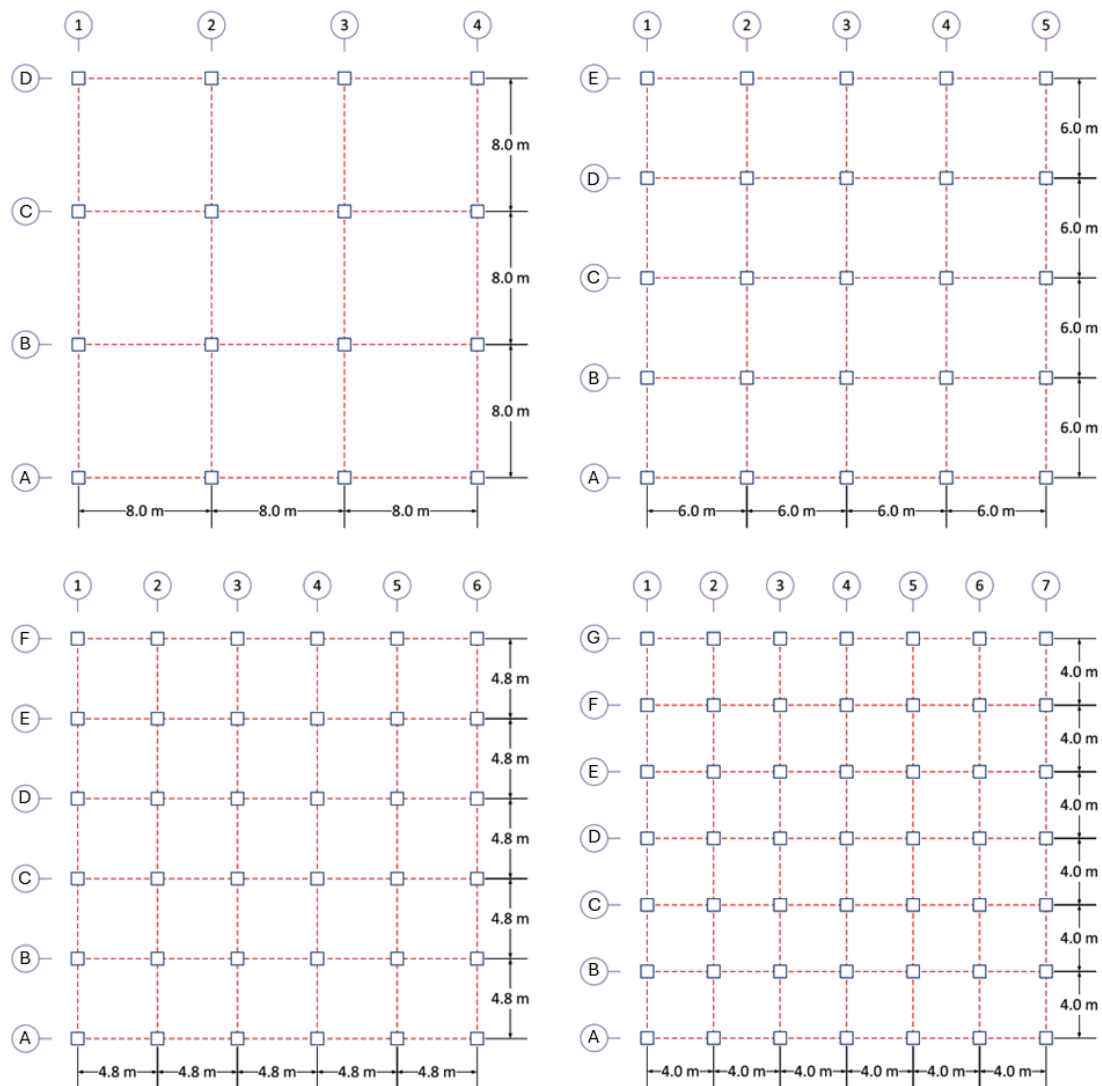
**Tabel 1.** Data Gempa Northridge Tahun 1994

| No | Stasiun Pencatat                  | Komponen | Mag. | Durasi (detik) | PGA (g) | $T_D$ (detik) | Periode Pradominan (detik) |
|----|-----------------------------------|----------|------|----------------|---------|---------------|----------------------------|
| 1  | Jensen Filter Plant Adm. Building | JEN292   | 6.69 | 28.595         | 0.62    | 12.50         | 1.059                      |
| 2  | Newhall – Fire Sta                | NWH090   | 6.69 | 39.980         | 0.58    | 5.90          | 0.57                       |
| 3  | Rinaldi Receiving Sta             | RSS228   | 6.69 | 19.900         | 0.87    | 9.10          | 1.02                       |
| 4  | Sylmar – Converter Sta East       | SCE011   | 6.69 | 54.685         | 0.85    | 7.40          | 1.16                       |
| 5  | Tarzana – Cedar Hill A            | TAR090   | 6.69 | 39.980         | 1.78    | 12.60         | 0.35                       |
| 6  | Pacoima Kagel Canyon              | PKC90    | 6.69 | 39.980         | 0.30    | 10.10         | 0.66                       |
| 7  | Sun Valley – Roscoe Blvd          | RO3000   | 6.69 | 30.270         | 0.28    | 16/70         | 0.45                       |

## 2.2. Model Struktur

Model struktur pada penelitian ini diambil dari model struktur dalam penelitian Ameri Mohammad dkk. (2019). Denah dan tampilan skematis 16 model struktur dengan variasi 6, 9, 12 dan 15 lantai serta 3, 4, 5 dan 6 bentangan dengan luas denah yang sama sebagaimana ditunjukkan pada **Error! Reference source not found.** Dimensi balok, kolom dan jumlah tulangan 1 longitudinal yang digunakan ditunjukkan pada **Error! Reference source not found.** dengan huruf B dan C masing-masing menunjukkan balok dan kolom serta indeks mewakili rangkaian skenario tertentu, dengan konfigurasi:

1. Untuk struktur 6 lantai, balok dan kolom identik pada setiap 2 lantai yang berdekatan;
2. Untuk struktur lainnya 9, 12 dan 15 lantai, balok dan kolom identik pada setiap 3 lantai yang berdekatan.



**Gambar 1.** Denah model struktur (Ameri Mohammad dkk., 2019)

### 2.3. Permodelan Struktur

Permodelan struktur menggunakan pendekatan *simplified finite-element* dengan OpenSeesPy, elemen balok-kolom dimodelkan menggunakan elemen berbasis gaya (*distributed-plasticity*) dengan 5 titik integrasi di sepanjang elemen. Perilaku non linier dimodelkan pada tingkat material melalui diskritisasi serat (*fiber discretization*) penampang elemen pada setiap titik integrasi. Baja tulangan dimodelkan dengan menggunakan *Steel02 Material* dan *Concrete02 Material* untuk beton terkekang (*confined concrete*) dan beton tidak terkekang (*unconfined concrete*) (Mazzoni dkk., 2006). Sifat-sifat material yang digunakan dalam pemodelan struktur: kuat tekan beton  $f'_c = 27$  MPa; kuat leleh tulangan  $f_y = 420$  MPa; modulus Young untuk beton  $E_c = 25$  GPa, dan untuk baja  $E_s = 200$  GPa. Beban gravitasi yang dikerjakan adalah berat sendiri struktur (balok, kolom dan plat).

**Tabel 2.** Dimensi Balok dan Kolom

| Model Struktur | Tipe | Dimensi (cm) |       |       |       | Tulangan Memajang |       |       |       |
|----------------|------|--------------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|
|                |      | Bentangan    |       |       |       | Bentangan         |       |       |       |
|                |      | 3            | 4     | 5     | 6     | 3                 | 4     | 5     | 6     |
| 6 Lantai       | C1   | 60x60        | 50x50 | 40x40 | 40x40 | 24D25             | 20D25 | 20D22 | 18D22 |
|                | C2   | 55x55        | 45x45 | 35x35 | 35x35 | 20D25             | 20D22 | 16D22 | 16D22 |
|                | C3   | 50x50        | 40x40 | 30x30 | 30x30 | 20D22             | 18D22 | 16D19 | 16D19 |
|                | B1   | 40x50        | 35x40 | 30x35 | 30x35 | 10D22             | 10D19 | 8D19  | 8D19  |
|                | B2   | 35x40        | 30x35 | 25x30 | 25x35 | 10D19             | 8D19  | 8D16  | 8D16  |
|                | B3   | 30x35        | 30x30 | 25x25 | 25x30 | 8D19              | 8D16  | 6D16  | 6D16  |
| 9 Lantai       | C1   | 65x65        | 55x55 | 40x40 | 40x40 | 28D25             | 22D25 | 20D22 | 20D22 |
|                | C2   | 55x55        | 45x45 | 35x35 | 35x35 | 22D25             | 20D25 | 18D22 | 18D22 |
|                | C3   | 50x50        | 40x40 | 30x30 | 30x30 | 20D25             | 20D22 | 18D19 | 18D19 |
|                | B1   | 40x45        | 40x45 | 35x40 | 30x35 | 10D22             | 10D22 | 10D19 | 8D19  |
|                | B2   | 35x45        | 35x45 | 30x35 | 25x30 | 10D22             | 8D22  | 8D19  | 6D19  |
|                | B3   | 35x40        | 35x40 | 25x30 | 20x25 | 10D19             | 8D22  | 8D16  | 6D16  |
| 12 Lantai      | C1   | 80x80        | 60x60 | 45x45 | 45x45 | 30D29             | 22D29 | 20D25 | 20D22 |
|                | C2   | 70x70        | 55x55 | 40x40 | 40x40 | 28D25             | 22D25 | 20D22 | 20D22 |
|                | C3   | 55x55        | 45x45 | 35x35 | 35x35 | 22D25             | 20D25 | 18D22 | 18D22 |
|                | C4   | 50x50        | 40x40 | 30x30 | 30x30 | 20D25             | 20D22 | 18D19 | 18D19 |
|                | B1   | 40x50        | 40x50 | 40x45 | 35x40 | 12D22             | 12D22 | 12D19 | 10D19 |
|                | B2   | 40x45        | 40x45 | 35x40 | 30x35 | 12D19             | 10D19 | 8D19  | 8D19  |
|                | B3   | 35x45        | 35x45 | 30x35 | 25x30 | 10D22             | 10D22 | 8D19  | 8D16  |
|                | B4   | 35x40        | 35x40 | 25x30 | 20x25 | 10D19             | 8D22  | 8D16  | 6D16  |
| 15 Lantai      | C1   | 90x90        | 70x70 | 50x50 | 50x50 | 32D29             | 30D25 | 24D25 | 24D25 |
|                | C2   | 80x80        | 60x60 | 45x45 | 45x45 | 30D29             | 22D29 | 20D25 | 20D22 |
|                | C3   | 65x65        | 55x55 | 40x40 | 40x40 | 26D25             | 22D25 | 20D22 | 20D22 |
|                | C4   | 55x55        | 50x50 | 35x35 | 35x35 | 22D25             | 20D25 | 18D22 | 18D22 |
|                | C5   | 50x50        | 45x45 | 30x30 | 30x30 | 20D25             | 20D22 | 18D19 | 18D19 |
|                | B1   | 45x50        | 45x50 | 45x50 | 45x50 | 12D22             | 12D22 | 12D22 | 12D19 |
|                | B2   | 40x50        | 40x50 | 40x50 | 40x50 | 12D22             | 12D22 | 12D19 | 12D19 |
|                | B3   | 40x45        | 40x45 | 40x45 | 35x40 | 12D19             | 12D19 | 10D19 | 8D19  |
|                | B4   | 35x45        | 35x45 | 35x40 | 30x35 | 10D22             | 10D22 | 10D19 | 8D16  |
|                | B5   | 35x40        | 35x40 | 30x35 | 20x25 | 10D19             | 8D22  | 10D16 | 6D16  |

## 2.4. Prosedur Analisis

Model struktur dalam penelitian ini dianalisis menggunakan analisis dinamis non linier riwayat waktu, dengan menerapkan 7 rekaman gempa. Selanjutnya interval waktu dengan percepatan nol disisipkan pada akhir setiap rekaman gempa. Perlu dicatat bahwa interval waktu yang dimasukkan di akhir gempa utama untuk memantau respons percepatan dan kecepatan pada atap dari struktur. Jeda waktu yang diberikan pada akhir rekaman gempa untuk memastikan bahwa percepatan atap ( $AR_0$ ) dan kecepatan atap ( $VR_0$ ) struktur mencapai nilai kurang dari atau sama dengan 0.1% dari percepatan dan kecepatan atap maksimum ( $AR_{max}$  dan  $VR_{max}$ ) dan tidak meningkat lagi. Jika kondisi ini tercapai maka struktur dianggap telah berhenti bergetar (Pirooz dkk., 2021).

Untuk tujuan ini, waktu jeda untuk struktur diperoleh dengan menggunakan prosedur coba-coba, pada awalnya diberikan interval waktu dengan percepatan nol sebesar 60 detik, jika interval yang diasumsikan tersebut tidak cukup untuk mencapai  $AR_0$  dan  $VR_0$  maka interval akan ditingkatkan menjadi 120 detik. Hal ini akan diterapkan secara iteratif hingga waktu jeda yang dibutuhkan diperoleh dengan akurasi yang dapat diterima. Setelah melakukan analisis dinamis riwayat waktu pada struktur, respons percepatan dan kecepatan atap serta waktu jeda yang diperlukan setiap model struktur dianalisis untuk mendapatkan hubungan antara variasi jumlah bentangan dan jumlah lantai terhadap kebutuhan waktu jeda dan diuji terhadap Persamaan (1) yang dihasilkan oleh Pirooz dkk. (2021):

$$T_R = T_d[(21.8559T + 0.0258)(T_d)^{-0.9982} + 0.0214] \quad (1)$$

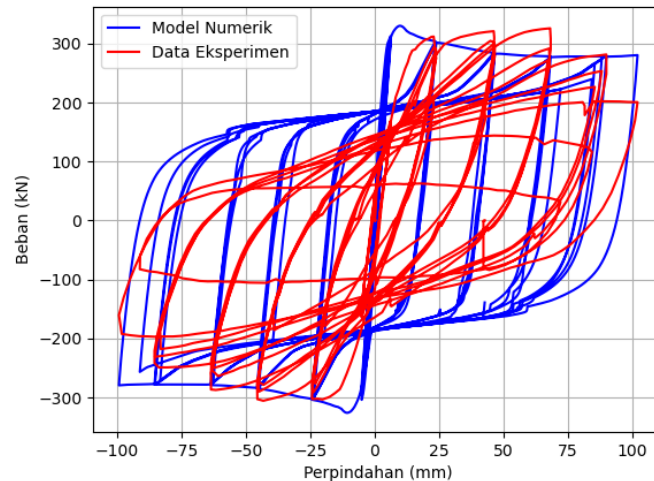
dengan  $T_R$  adalah waktu jeda,  $T$  adalah periode getar struktur dan  $T_d$  adalah durasi gerakan tanah kuat dengan interval 5-95%.

## 3. HASIL ANALISIS DAN DISKUSI

### 3.1. Verifikasi Model

Untuk validasi model numerik yang dibuat dalam penelitian ini, data eksperimental dari penelitian Saatcioglu dkk. (1989) yang menguji kolom kantilever persegi dengan dimensi 350 x 350 mm untuk melihat perilaku lentur, dimodelkan di *OpenSeesPy* dan dianalisis menggunakan *pushover* dengan menerapkan data perpindahan dari pengujian laboratorium sebagai beban.

Selanjutnya kurva beban vs perpindahan hasil eksperimen dan hasil numerik diplot bersama untuk melihat kesesuaiannya seperti pada **Error! Reference source not found.**, secara umum menunjukkan kesesuaian yang cukup baik, sedikit perbedaan lebih oleh asumsi penggunaan *Concrete02* dan *Steel02* untuk memodelkan material beton dan baja, serta pemilihan elemen *nonlinearBeamColumn* untuk memodelkan kolom kantilever (Mazzoni dkk., 2006) dan, penggunaan pendekatan model beton terkekang Mander (Mander dkk., 1988).



**Gambar 2.** Verifikasi Model Analisis

### 3.2. Analisis tiap Model

Untuk mempermudah penyajian hasil analisis digunakan simbol  $\alpha$ S- $\beta$ B untuk mendefinisikan model analisis dengan  $\alpha$  menunjukkan jumlah lantai dan  $\beta$  menunjukkan jumlah bentangan dan  $E_{q7}$  menunjukkan rekaman gempa yang dikenakan. Sebagai contoh, 12S-3B menunjukkan struktur 12 lantai dengan 3 bentangan. Selanjutnya waktu jeda diukur dari 2 respons struktur yaitu percepatan atap ( $T_{RACC}$ ) dan kecepatan atap ( $T_{RVEL}$ ). Nilai periode getar struktur ( $T_s$ ) mode 1 dari model struktur disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Periode Getar Struktur ( $T_s$ ) Mode 1

| Model     | Bentangan |        |        |        |
|-----------|-----------|--------|--------|--------|
|           | 3         | 4      | 5      | 6      |
| 6 lantai  | 1.2329    | 1.1916 | 1.2346 | 0.9783 |
| 9 lantai  | 1.8205    | 1.4513 | 1.4158 | 1.5364 |
| 12 lantai | 2.2441    | 1.7871 | 1.8609 | 1.7821 |
| 15 lantai | 2.6645    | 2.0956 | 1.9819 | 1.7076 |

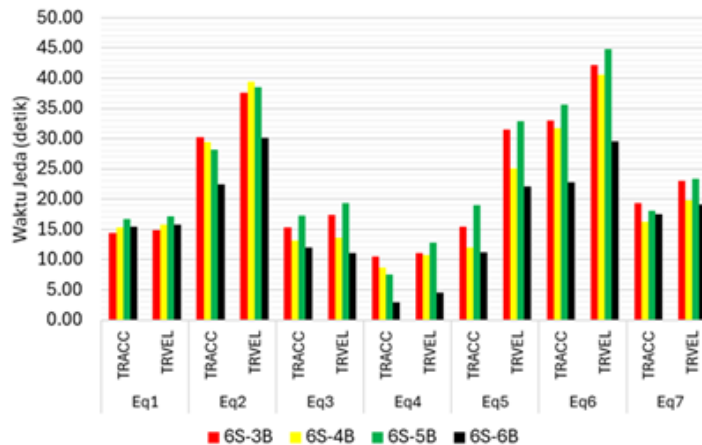
#### 3.2.1. Model Struktur 6 Lantai

Pada **Error! Reference source not found.** terlihat bahwa  $T_{RVEL}$  memiliki nilai lebih tinggi dari  $T_{RACC}$  mencapai tertinggi 2,09 kali pada struktur dengan 6 bentangan (6S-6B) yang dikenai gempa Eq5. Secara keseluruhan nilai  $T_R$  berkisar antara 4,58 s/d 44,86 detik, tertinggi pada struktur 6S-5B yang dikenai gempa Eq6 dan terendah pada struktur 6S-6B yang dikenai gempa Eq4.

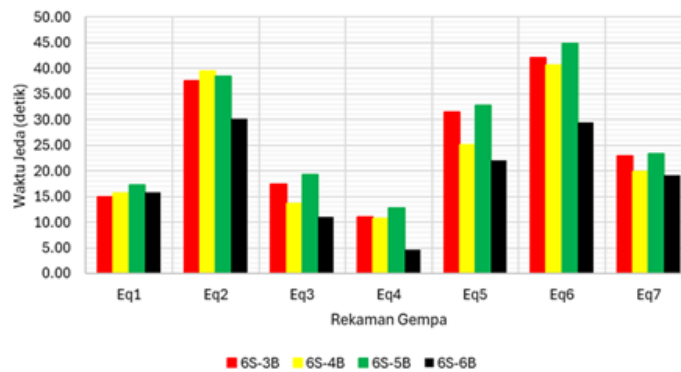
Untuk melihat pengaruh variasi bentangan terhadap  $T_R$ , digunakan nilai  $T_{RVEL}$  seperti pada **Error! Reference source not found.** Struktur dengan 3 dan 5 bentangan, nilai  $T_R$  cenderung meningkat mengikuti penambahan jumlah bentangan walaupun dengan peningkatan yang tidak signifikan, sedangkan untuk struktur dengan 4 dan 6 bentangan genap nilai  $T_R$  mengalami penurunan yang cukup signifikan mengikuti penambahan jumlah bentangan terutama



pada struktur yang dikenai gempa yang menghasilkan nilai  $T_R$  yang besar (Eq2, Eq5, dan Eq6). Ini sejalan dengan nilai periode getar struktur ( $T_S$ ) pada Tabel 3 dengan struktur 6S-6B memiliki nilai  $T_S$  terkecil sebesar 0,9783 detik. **Error! Reference source not found.** menampilkan komparasi antara  $T_R$  maksimum untuk 7 rekaman gempa terhadap nilai  $T_R$  yang dihitung menggunakan Persamaan (1). Nilai  $T_R$  pada penelitian ini lebih tinggi 1,54, 1,53, 1,63, dan 1,38 kali untuk masing-masing struktur 6S-3B, 6S-4B, 6S-5B, dan 6S-6B, dengan nilai  $T_R$  yang cenderung meningkat mengikuti peningkatan periode getar struktur.

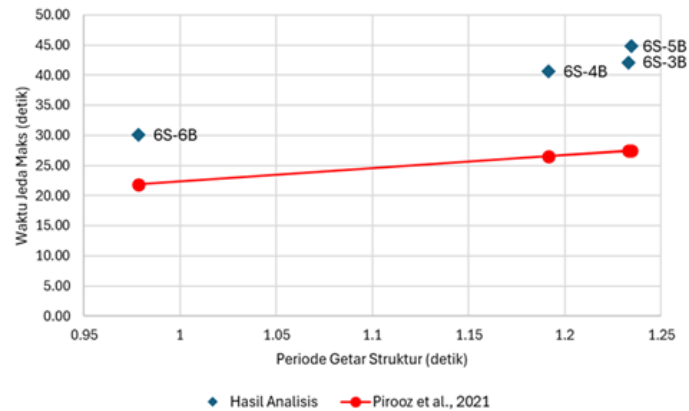


**Gambar 3.** Waktu Jeda Struktur 6 Lantai



**Gambar 4.** Waktu Jeda Struktur 6 Lantai ( $T_{RVEL}$ )

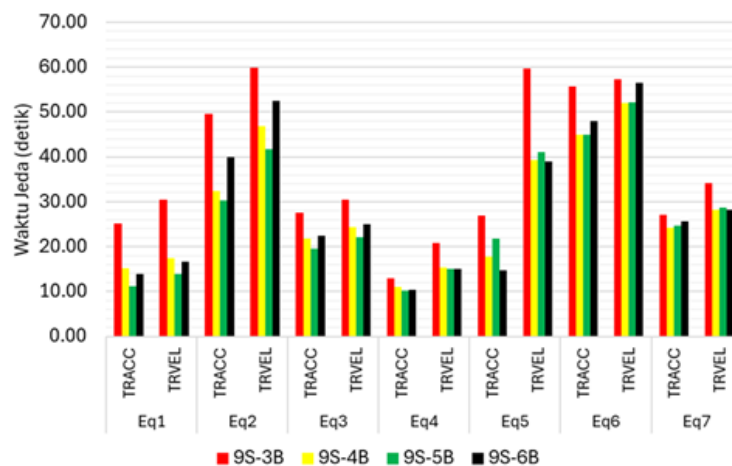




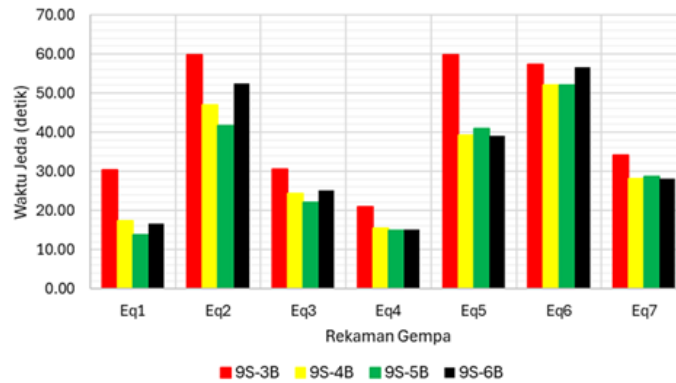
**Gambar 5.** Komparasi  $T_R$  (maksimum) terhadap Persamaan (1) Struktur 6 Lantai

### 3.2.2. Model Struktur 9 Lantai

Sama seperti pada struktur 6 lantai, nilai  $T_{RVEL}$  lebih tinggi dibandingkan nilai  $T_{RACC}$  mencapai tertinggi 2,22 kali pada struktur 9S-3B dan 9S-4B yang dikenai gempa Eq5. Secara keseluruhan nilai  $T_R$  berkisar antara 13,89 s/d 59,82 detik, dengan nilai tertinggi pada struktur 9S-3B yang dikenai gempa Eq2 dan terendah pada struktur 9S-6B yang dikenai gempa Eq1 seperti pada Gambar 1. Pada **Error! Reference source not found.** dapat dilihat struktur 9 lantai, nilai  $T_R$  (digunakan  $T_{RVEL}$ ) cenderung mengalami penurunan mengikuti penambahan jumlah bentangan kecuali untuk struktur 9S-6B yang dikenai gempa Eq1, Eq2, Eq3 dan Eq6, mempunyai nilai  $T_R$  lebih tinggi dari struktur 9S-5B hal ini sejalan dengan nilai  $T_S$  pada Tabel 3.

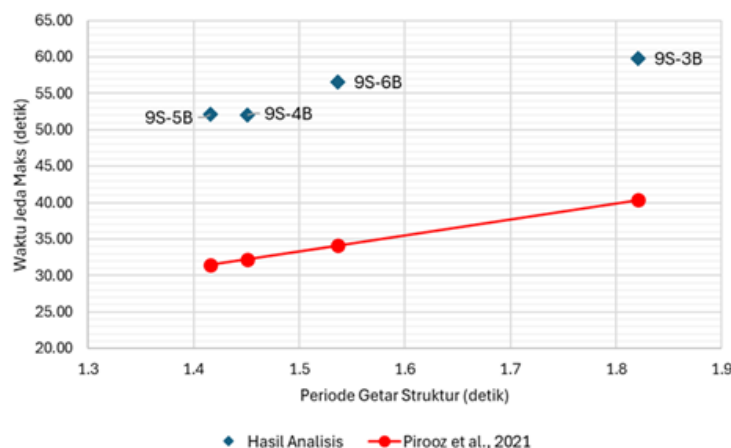


**Gambar 1.** Waktu Jeda Struktur 9 Lantai



**Gambar 7.** Waktu Jeda Struktur 9 Lantai ( $T_{RVEL}$ )

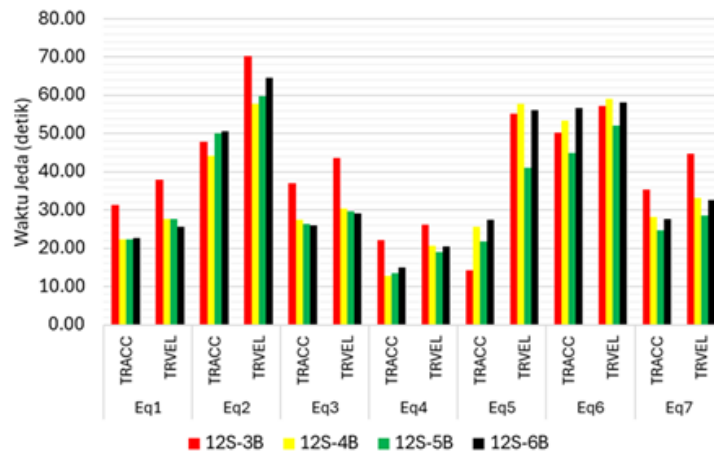
Jika dikomparasikan dengan Persamaan (1) seperti pada **Error! Reference source not found.**, terdapat perbedaan nilai  $T_R$  yang cukup signifikan dengan untuk struktur 9S-3B, 9S-4B, 9S-5B, dan 9S-6B masing-masing mengalami peningkatan sebesar 1,48, 1,61, 1,66, dan 1,66 kali, dengan nilai  $T_R$  yang cenderung meningkat mengikuti penambahan periode getar struktur.



**Gambar 8.** Komparasi  $T_R$  (maksimum) terhadap Persamaan (1) Struktur 9 Lantai

### 3.2.3. Model Struktur 12 Lantai

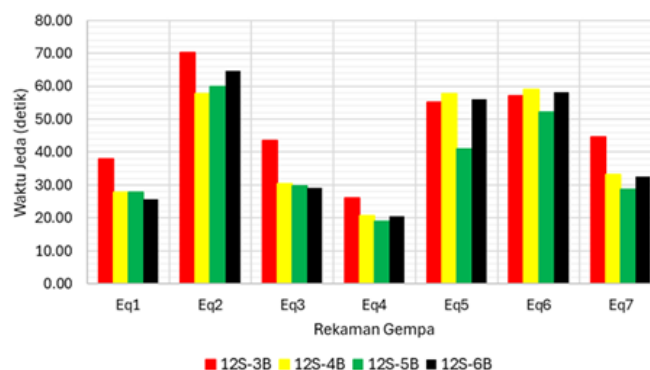
Hasil struktur 12 lantai pada **Error! Reference source not found.** nilai  $T_{RVEL}$  lebih tinggi mencapai 3,85 kali pada struktur 12S-3B yang dikenai gempa Eq5 jika dibandingkan terhadap nilai  $T_{RACC}$ . Secara keseluruhan nilai  $T_R$  berkisar antara 19,03 s/d 70,30 detik, dengan nilai tertinggi pada struktur 12S-3B yang dikenai gempa Eq2 dan terendah pada struktur 12S-5B yang dikenai gempa Eq4.



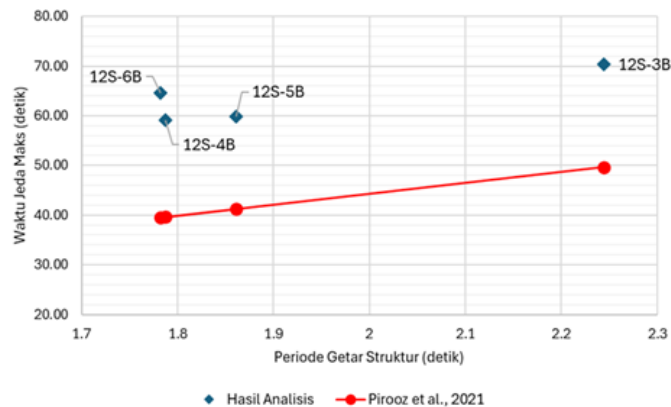
Gambar 9. Waktu Jeda  $T_R$  Struktur 12 Lantai

Terhadap variasi jumlah bentangan dengan hasil terdapat pada **Error! Reference source not found.**, nilai  $T_R$  hanya mengalami penurunan mengikuti pola penambahan jumlah bentangan pada untuk struktur 12S-6B yang dikenai gempa Eq1, dan Eq3, sedangkan pada gempa yang lain tidak mempunyai pola yang sama. Demikian juga terhadap nilai  $T_s$ , pada gempa Eq2, Eq4, Eq5, Eq6, dan Eq7 nilai  $T_R$  justru meningkat pada periode getar struktur yang lebih rendah menurut Tabel 3.

Jika dikomparasikan dengan Persamaan (1) seperti pada **Error! Reference source not found.**, terdapat perbedaan nilai  $T_R$  yang cukup signifikan untuk struktur 12S-3B, 12S-4B, 12S-5B, dan 12S-6B dengan nilai  $T_R$  pada penelitian ini mengalami peningkatan masing-masing sebesar 1,42, 1,49, 1,45, dan 1,63 dengan nilai yang cenderung meningkat mengikuti penambahan periode getar struktur. Kondisi yang berbeda ditunjukkan oleh struktur 12S-4B dan 12S-6B, dengan walaupun mempunyai nilai  $T_s$  yang hampir sama namun menghasilkan nilai  $T_R$  yang berbeda (selisih 5,48 detik).



Gambar 10. Waktu Jeda Struktur 12 lantai ( $T_{RVEL}$ )



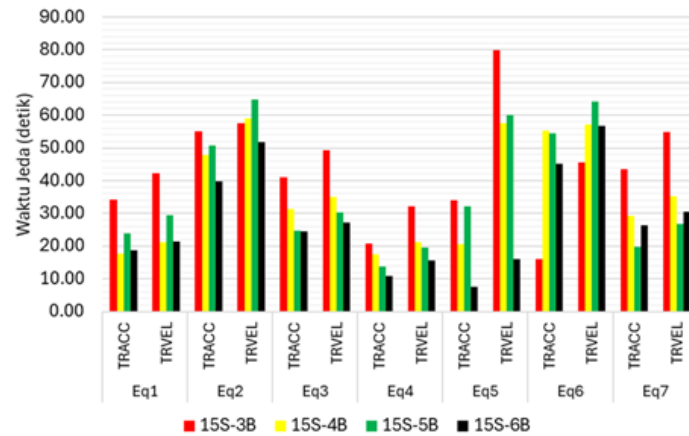
Gambar 11. Komparasi  $T_R$  (maksimum) terhadap Persamaan (1) Struktur 12 Lantai

### 3.2.4. Model Struktur 15 Lantai

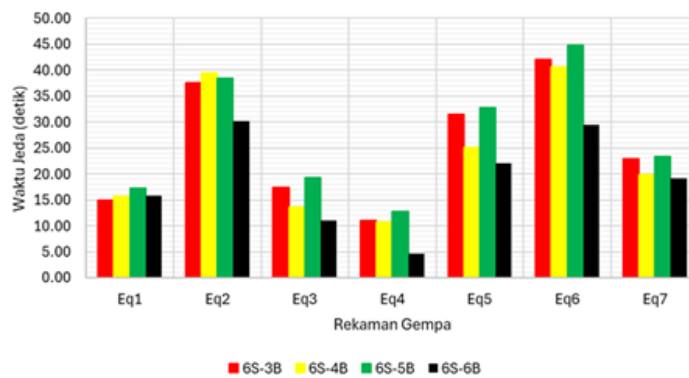
Waktu jeda ( $T_R$ ) yang diperlukan untuk struktur 15 lantai berhenti bergetar ditampilkan pada **Error! Reference source not found.**,  $T_R$  yang diukur dengan respons kecepatan ( $T_{RVEL}$ ) lebih tinggi dari  $T_{RACC}$  mencapai tertinggi 2,86 kali pada struktur dengan 3 bentangan (15S-3B) yang dikenai gempa Eq6. Waktu jeda ( $T_R$ ) berkisar antara 15,62 s/d 79,92 detik, dengan nilai tertinggi pada struktur 15S-3B yang dikenai gempa Eq5 dan terendah pada struktur 15S-6B yang dikenai gempa Eq4.

Karena nilai  $T_{RVEL}$  lebih tinggi dari  $T_{RACC}$  maka digunakan nilai  $T_{RVEL}$  untuk melihat pengaruh variasi jumlah bentangan terhadap nilai  $T_R$  seperti terdapat pada **Error! Reference source not found.**, dengan nilai  $T_R$  tidak mengalami perubahan mengikuti pola penambahan jumlah bentangan walaupun nilai  $T_S$  untuk struktur 15 lantai mengecil mengikuti penambahan jumlah bentangan.

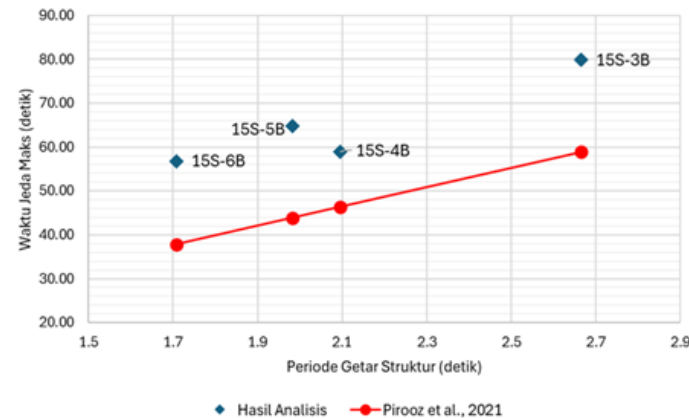
**Error! Reference source not found.** menampilkan komparasi antara  $T_R$  maksimum untuk 7 rekaman gempa terhadap nilai  $T_R$  yang dihitung menggunakan Persamaan (1), dengan terdapat perbedaan nilai  $T_R$  yang cukup signifikan untuk struktur 6S-3B, 6S-4B, 6S-5B, dan 6S-6B masing-masing mengalami peningkatan sebesar 1,36, 1,27, 1,47, dan 1,50 kali dengan nilai  $T_R$  yang cenderung meningkat mengikuti penambahan periode getar struktur. Sama seperti pada struktur 12 lantai kondisi yang berbeda ditunjukkan oleh struktur 15S-5B, dengan walaupun memiliki nilai  $T_S$  lebih kecil dari struktur 15S-4B namun membutuhkan nilai  $T_R$  yang lebih besar (selisih 5,84 detik).



Gambar 12. Waktu Jeda  $T_R$  Struktur 15 Lantai



Gambar 13. Waktu Jeda Struktur 15 Lantai ( $T_{RVEL}$ )

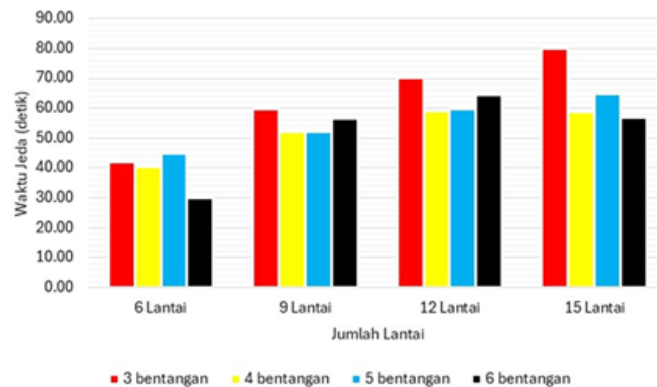


Gambar 14. Komparasi  $T_R$  (maksimum) terhadap Persamaan (1) Struktur 15 Lantai

### 3.3. Pengaruh Variasi Jumlah Lantai

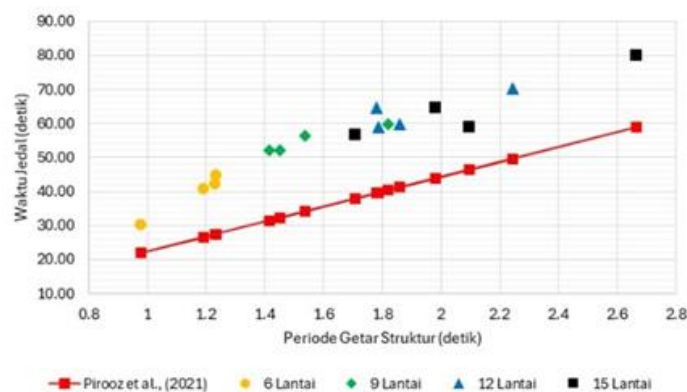
Untuk melihat pengaruh variasi jumlah lantai terhadap waktu jeda ( $T_R$ ) digunakan nilai  $T_R$  maksimum yang dihasilkan dari 7 rekaman gempa untuk tiap variasi bentangan sebagaimana yang ditampilkan pada **Error! Reference source not found.** Terlihat bahwa nilai  $T_R$  mengalami peningkatan mengikuti penambahan jumlah lantai, kecuali untuk model struktur 15S-6B

mengalami penurunan. Hal ini sejalan dengan nilai periode getar struktur yang secara umum mengalami peningkatan mengikuti penambahan jumlah lantai kecuali pada struktur 15S-6B.



**Gambar 15.** Waktu Jeda  $T_R$  terhadap Variasi Jumlah Lantai

Jika dikomparasi dengan Persamaan (1) terlihat seperti pada **Error! Reference source not found.** bahwa besaran waktu jeda ( $T_R$ ) terhadap variasi jumlah lantai mengalami peningkatan mengikuti penambahan nilai periode getar struktur ( $T_s$ ), dengan peningkatan yang hampir linier sama dengan pola nilai  $T_R$  yang dihasilkan oleh Persamaan (1). Hal ini terlihat dari *range* peningkatan  $T_R$  sebesar 1,27 s/d 1,66 kali nilai  $T_R$  dari Persamaan (1), dengan nilai rata-rata 1,51 dan standar deviasi 0,11.

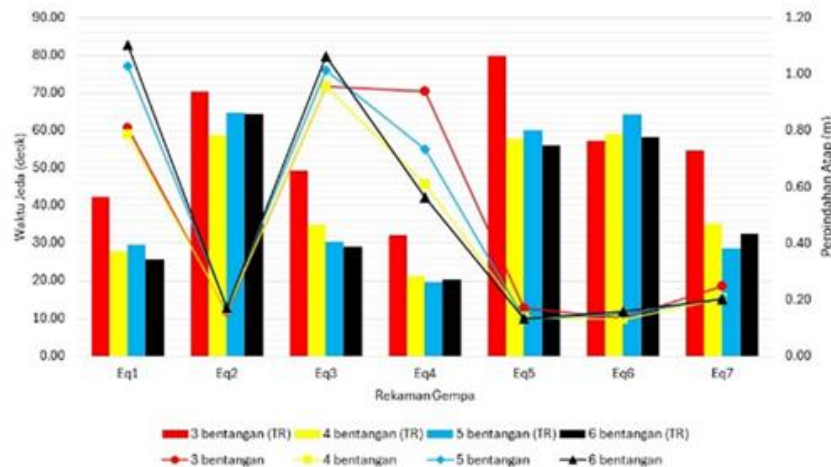


**Gambar 16.** Komparasi  $T_R$  (maksimum) terhadap Persamaan (1) pada Semua Struktur

### 3.4. Pengaruh Parameter Gempa

Untuk melihat pengaruh parameter gempa terhadap waktu jeda ( $T_R$ ) digunakan nilai  $T_R$  dan perpindahan atap maksimum dari variasi jumlah lantai untuk tiap rekaman gempa sebagaimana ditampilkan pada **Error! Reference source not found.** Nilai  $T_R$  yang tinggi dihasilkan oleh gempa dengan perpindahan atap yang kecil (Eq2, Eq5, Eq6 dan Eq7) sedangkan untuk gempa yang menghasilkan perpindahan atap besar seperti gempa Eq1, Eq3, dan Eq4 mempunyai nilai  $T_R$  yang relatif kecil. Gempa Eq1, Eq3, dan Eq4 adalah gempa periode pra-

dominan yang besar (1,06 s/d 1,16 detik) kondisi ini dapat menyebabkan terjadinya amplifikasi respons struktur pada saat periode pra-dominan mendekati atau sama dengan periode resonansi struktur (Hardiyatmo, 2022). Besarnya respons perpindahan pada atap mengakibatkan elemen struktur cepat mencapai kondisi plastis dengan energi yang diserap menjadi berkurang sehingga waktu yang dibutuhkan oleh struktur untuk berhenti bergetar menjadi lebih cepat. Sedangkan untuk gempa lainnya berlaku kondisi sebaliknya.



Gambar 17. Pengaruh Parameter Gempa terhadap Waktu Jeda ( $T_R$ )

#### 4. SIMPULAN

Penelitian terhadap 16 model struktur dengan variasi jumlah bentangan dan jumlah lantai namun memiliki luas denah yang sama dan dikenai 7 rekaman gempa untuk melihat pengaruhnya terhadap waktu jeda ( $T_R$ ) telah dilakukan dengan simpulan:

1. Waktu jeda ( $T_R$ ) sangat dipengaruhi oleh periode getar struktur ( $T_S$ ), dengan makin besar periode getar struktur ( $T_S$ ) makin besar waktu jeda ( $T_R$ ) yang dibutuhkan.
2. Menambah jumlah bentangan akan mengurangi waktu jeda ( $T_R$ ) yang dibutuhkan, selama penambahan bentangan tersebut mengurangi nilai periode getar struktur.
3. Menambah jumlah lantai akan memperbesar waktu jeda ( $T_R$ ) yang diperlukan, selama penambahan jumlah lantai tersebut meningkatkan periode getar struktur.
4. Terdapat perbedaan nilai  $T_R$  yang diperlukan dengan nilai  $T_R$  pada penelitian ini lebih tinggi 1,27 s/d 1,66 kali dari nilai  $T_R$  yang dihitung menggunakan Persamaan (1).
5. Waktu jeda ( $T_R$ ) akan besar pada struktur yang dikenai gempa dengan periode pra-dominan yang tinggi, terutama jika periode pra-dominan tersebut mendekati atau sama dengan periode getar struktur karena akan berpotensi menimbulkan amplifikasi respons struktur yang mengakibatkan material elemen struktur cepat mencapai kondisi plastis dengan jumlah energi yang diserap semakin kecil dan struktur akan cepat berhenti bergetar.



Akhirnya, perlu dicatat bahwa tujuan utama dari penelitian ini adalah pengembangan metode untuk memperkirakan waktu jeda ( $T_R$ ) yang dibutuhkan telah terpenuhi berdasarkan hasil yang diperoleh dengan model yang lebih bervariasi serta metode analisis 3D. Diharapkan adanya penelitian lanjutan untuk mendapatkan persamaan baru dengan memasukkan hasil penelitian ini.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- Ameri Mohammad, R., Massumi, A., dan Masoomi, H. (2019). Effect of Structural Redundancy on Progressive Collapse Resistance Enhancement in RC Frame Structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(1), 04018092. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001244](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001244)
- Bao, X., Zhai, C., dan Xu, L. (2022). Time-Dependent Risk Assessment of a Containment Building Subjected to Mainshock-Aftershock Seismic Sequences. *Journal of Structural Engineering*, 148(4), 04022010. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003300](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003300)
- Bomben, L., Fasan, M., dan Amadio, C. (2023). Assessment of the effect of seismic sequences on steel X-CBF for industrial buildings. *Procedia Structural Integrity*, 44, 99-106. doi:<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.014>
- Erdik, M., Kamber, Y., Demircioğlu, M., dan Şeşetyan, K. (2012). 23 October 2011 Van (Turkey) earthquake. *Natural Hazards*, 64(1), 651-665. doi:<https://doi.org/10.1007/s11069-012-0263-9>
- Fikri, R., dan Ingham, J. (2022). Seismic response and aftershock fragility curves for Non-ductile Mid-rise buildings comprised of reinforced concrete frame with masonry infill. *Structures*, 45, 1688-1700. doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.108>
- Goda, K. (2012). Nonlinear Response Potential of Mainshock-Aftershock Sequences from Japanese Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(5), 2139-2156. doi:10.1785/0120110329
- Hardiyatmo, H. C. (2022). *Rekayasa gempa untuk analisis struktur dan geoteknik*: UGM Press.
- Hatzigeorgiou, G. D., dan Liolios, A. A. (2010). Nonlinear behaviour of RC frames under repeated strong ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), 1010-1025. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.04.013>
- Hosseini, S. A., Ruiz-Garcia, J., dan Massumi, A. (2019). Seismic response of RC frames under far-field mainshock and near-fault aftershock sequences. *Structural Engineering and Mechanics*, 72(3), 395-408. doi:<https://doi.org/10.12989/sem.2019.72.3.395>
- Hoveidae, N., dan Radpour, S. (2021). Performance evaluation of buckling-restrained braced frames under repeated earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(1), 241-262. doi:10.1007/s10518-020-00983-0
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., dan Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804-1826. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)
- Massumi, A., Sadeghi, K., dan Ghaedi, H. (2021). The effects of mainshock-aftershock in successive earthquakes on the response of RC moment-resisting frames considering the influence of the vertical seismic component. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 393-405. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.04.005>
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., dan Fenves, G. L. (2006). OpenSees command language manual. In (pp. 137-158). Berkeley, California: Pacific earthquake engineering research center.

- Moustafa, A., dan Takewaki, I. (2011). Response of nonlinear single-degree-of-freedom structures to random acceleration sequences. *Engineering Structures*, 33(4), 1251-1258. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.01.002>
- Pang, R., Zhou, Y., Chen, G., Jing, M., dan Yang, D. (2023). Stochastic Mainshock–Aftershock Simulation and Its Applications in Dynamic Reliability of Structural Systems via DPIM. *Journal of Engineering Mechanics*, 149(1), 04022096. doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0002176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002176)
- Papaloizou, L., Polycarpou, P., Komodromos, P., Hatzigeorgiou George, D., dan Beskos Dimitri, E. (2016). Two-dimensional numerical investigation of the effects of multiple sequential earthquake excitations on ancient multi-drum columns. *Earthquakes and Structures*, 10(3), 495-521. doi:10.12989/EAS.2016.10.3.495
- Pirooz, R. M., Habashi, S., dan Massumi, A. (2021). Required time gap between mainshock and aftershock for dynamic analysis of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(6), 2643-2670. doi:10.1007/s10518-021-01087-z
- Potter, S. H., Becker, J. S., Johnston, D. M., dan Rossiter, K. P. (2015). An overview of the impacts of the 2010-2011 Canterbury earthquakes. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 6-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.01.014>
- Pu, W., dan Wu, M. (2018). Ductility demands and residual displacements of pinching hysteretic timber structures subjected to seismic sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 392-403. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.037>
- Saatcioglu, M., dan Ozcebe, G. J. S. J. (1989). Response of reinforced concrete columns to simulated seismic loading. 86(1), 3-12.
- Xie, X., Lin, G., Duan, Y. F., Zhao, J. L., dan Wang, R. Z. (2012). Seismic damage of long span steel tower suspension bridge considering strong aftershocks. *Earthquakes and Structures*, 3(5), 767-781. doi:10.12989/EAS.2012.3.5.767
- Zhai, C.-H., Wen, W.-P., Li, S., Chen, Z., Chang, Z., dan Xie, L.-L. (2014). The damage investigation of inelastic SDOF structure under the mainshock–aftershock sequence-type ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 59, 30-41. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.01.003>
- Zhang, Y., Shen, J., dan Chen, J. (2020). Damage-based yield point spectra for sequence-type ground motions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(10), 4705-4724. doi:10.1007/s10518-020-00874-4
- Zhou, Z., Yu, X. H., dan Lü, D. G. (2021). Study on incremental damage ratios of structures due to mainshock-aftershock earthquake sequences. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, 38(11), 147-159. doi:<https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.11.0791>