STUDI PERUBAHAN AMPLITUDO DAN PERIODE FUNDAMENTAL STRUKTUR PADA STRUKTUR BANGUNAN TINGKAT TINGGI YANG MENGGUNAKAN *INTERMEDIATE FLOOR ISOLATION*

Handry P. Henuk[1], Jusuf J.S. Pah[2], dan Margareth E. Bolla[3]
[1]Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Indonesia
[2,3]Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Indonesia

[1] henukhandry@undana.ac.id, [2] yuser_pah@staf.undana.ac.id, [3] margiebolla@staf.undana.ac.id

ABSTRAK: Aktivitas seismik tinggi di Indonesia menjadikan teknologi isolasi gempa penting bagi bangunan bertingkat. Penelitian ini menganalisis pengaruh konfigurasi *intermediate floor isolation*, redaman efektif, dan dimensi elemen struktur terhadap amplitudo (perpindahan absolut lantai terhadap dasar tetap struktur) dan periode fundamental pada 196 model bangunan tujuh lantai, menggunakan analisis *time history* nonlinier ETABS dengan rekaman gempa Altadena, *fast Fourier transform*, dan model prediksi ensemble *artificial neural network* dan *random forest regressor* ((ANN-RF). Hasil menunjukkan semakin banyak lantai dalam zona isolasi, semakin besar reduksi amplitudo (81%–95%) dibandingkan isolator satu lantai. Isolator pada lantai dasar menghasilkan periode fundamental terpanjang, sedangkan isolasi seluruh lantai menghasilkan periode seragam-pendek akibat *modal coupling*. Dimensi elemen struktur yang lebih besar menurunkan amplitudo dan memperpendek periode, sedangkan redaman efektif (2%–30%) hanya berpengaruh kecil dan non-monoton. Model ANN-RF menghasilkan *error* yang didominasi di bawah 20% (96,6% data verifikasi), dengan periode fundamental lebih akurat dibandingkan amplitudo.

Kata kunci: *intermediate floor isolation*, periode fundamental, amplitudo, *fast Fourier transform*, *artificial neural network*, *time history*.

ABSTRACT: *Indonesia's high seismic activity makes seismic isolation important for multi-story buildings. This study examines the effects of intermediate floor isolation configuration, effective damping, and structural member dimensions on amplitude (absolute floor displacement relative to the base) and fundamental period, using 196 seven-story building models analyzed via nonlinear time history analysis in ETABS with the Altadena record, fast Fourier transform, and an artificial neural network-random forest (ANN-RF) ensemble model. Results show that more floors within the isolation zone increase amplitude reduction (81%-95%) versus isolating a single floor. Isolating only the ground floor produces the longest fundamental period, whereas isolating all floors yields a uniformly short period due to modal coupling. Larger structural members reduce amplitude and shorten the period, while effective damping (2%-30%) has only a minor, non-monotonic effect. The ANN-RF model achieves errors predominantly below 20% (96.6% of verification data), with period predictions more accurate than amplitude.*

Keywords: *intermediate floor isolation, fundamental period, amplitude, fast Fourier transform, artificial neural network, time history.*

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu beban lateral paling kritis dalam perencanaan struktur bangunan bertingkat, mengingat potensinya menimbulkan kerusakan struktural maupun korban jiwa, yaitu risiko yang relevan bagi Indonesia sebagai salah satu wilayah dengan aktivitas kegempaan tertinggi di dunia akibat posisinya pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama (Pusat Studi Gempa Nasional [Pusgen], 2017; Pawirodikromo, 2012). Salah satu strategi mitigasi yang terbukti efektif adalah *base isolation*, yang memisahkan struktur atas dari pergerakan tanah melalui elemen isolator fleksibel, secara konsisten mereduksi simpangan lateral dan memperpanjang periode fundamental struktur akibat berkurangnya kekakuan lateral global (Naeim & Kelly, 1999). Suan *et al.* (2025) mengevaluasi penempatan isolator pada setiap lantai bangunan dengan variasi redaman efektif 2–30% menggunakan analisis *pushover* dan SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional [BSN], 2019), dan menemukan reduksi perpindahan lantai lebih dari 90% dengan seluruh konfigurasi mencapai level kinerja *Immediate Occupancy* (IO).

Penempatan isolator pada level antar-lantai, yang dikenal sebagai *intermediate floor isolation* (IFI), memiliki karakteristik dinamis yang secara fundamental berbeda dari *base isolation* konvensional. Berbeda dengan sistem konvensional yang mengasumsikan struktur di atas isolator bergerak sebagai satu kesatuan kaku, kinerja IFI sangat dipengaruhi oleh fleksibilitas substruktur di bawah lantai isolasi, dengan massa dan kekakuan substruktur berperan lebih besar dibandingkan superstruktur dalam menentukan karakteristik dinamis sistem (Wang *et al.* 2011). Kondisi ini memunculkan *modal coupling effect*, yaitu kontribusi mode getar tinggi yang tidak dapat diabaikan dan dapat memperbesar respons percepatan pada lantai di atas lapisan isolasi (Wang *et al.*, 2013), sehingga struktur ber-IFI pada dasarnya terbagi menjadi beberapa segmen dinamis dengan karakteristik getar berbeda, bukan lagi satu kesatuan bermassa dan berkekakuan seragam. Studi terkini menunjukkan bahwa variasi posisi vertikal isolator memengaruhi periode struktur secara tidak seragam (Gao *et al.*, 2023), namun studi tersebut baru mengonfirmasi bahwa fenomena segmentasi dinamis ini terjadi, tanpa mengungkap secara sistematis pola dan karakteristik perubahan periode fundamental dan amplitudo di setiap lantai terhadap variasi konfigurasi penempatan isolator, redaman efektif, dan dimensi elemen struktur, padahal pola dan karakteristik tersebut penting sebagai dasar pertimbangan (*guidance*) bagi perancang struktur dalam menentukan konfigurasi IFI yang paling efektif.

Berangkat dari kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh konfigurasi penempatan IFI, redaman efektif, dan dimensi elemen struktur terhadap amplitudo dan periode fundamental setiap lantai; serta (2) mengembangkan model prediksi berbasis gabungan (*ensemble*) antara ANN TensorFlow dan *Random Forest Regressor* yang, setelah dilatih menggunakan data 196 model simulasi, mampu memprediksi kedua parameter tersebut pada konfigurasi baru secara cepat tanpa memerlukan simulasi numerik berulang. Model prediksi ini diperlukan karena analisis *time history* nonlinier memakan waktu dan menuntut keahlian khusus dalam analisis nonlinier, sehingga tidak praktis diulang setiap kali perancang struktur ingin mengevaluasi konfigurasi IFI yang berbeda, sehingga memberikan kontribusi praktis bagi perancang struktur dalam memilih konfigurasi IFI yang optimal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem *Intermediate Floor Isolation* (IFI)

Sistem *intermediate floor isolation* (IFI) berbeda dari isolasi dasar yang mengasumsikan substruktur bersifat kaku sempurna, kinerja IFI sangat bergantung pada fleksibilitas substruktur di bawah lapisan isolasi serta posisi vertikalnya. Wang *et al.* (2011) membuktikan bahwa frekuensi dan kekakuan substruktur berperan lebih dominan dibandingkan superstruktur dalam menentukan frekuensi isolasi efektif, sehingga karakteristik dinamis IFI tidak dapat disamakan dengan bangunan berisolasi dasar. Fleksibilitas substruktur ini memunculkan modal coupling effect, yaitu kontribusi mode getar tinggi yang dapat memperbesar respons percepatan pada lantai di atas lapisan isolasi, dengan karakteristik getar tiap segmen struktur mengikuti posisi lapisan isolasi (Wang *et al.*, 2013; Faiella & Mele, 2019). Implikasinya, perilaku dinamis struktur ber-IFI tidak dapat diwakili oleh satu nilai periode fundamental tunggal untuk keseluruhan bangunan seperti pada analisis konvensional; setiap lantai berpotensi memiliki periode osilasi dominannya sendiri, dasar dari konsep periode fundamental per lantai yang digunakan pada penelitian ini (Subbab 3.2).

Sejalan dengan itu, berbagai studi terapan mengonfirmasi bahwa variasi posisi vertikal isolator menghasilkan efektivitas yang tidak seragam. Tang & Liu (2024) menemukan perpanjangan periode alami paling signifikan pada isolasi fondasi dan lantai pertama (2,2 kali dan 2 kali dibandingkan struktur tanpa isolasi), menurun seiring elevasi isolator meningkat. Temuan serupa dilaporkan oleh Ghosh *et al.* (2026) pada bangunan 10 lantai ber-LRB, di mana level bawah, tengah, dan atas masing-masing paling efektif untuk pengurangan simpangan, percepatan, dan gaya geser dasar secara berbeda; serta Gao *et al.* (2023) dan Zhao *et al.* (2025), yang menunjukkan isolasi berlapis-ganda memperpanjang periode dan mereduksi percepatan superstruktur lebih dari 50% dibandingkan isolasi tunggal. Suan *et al.* (2025) mengevaluasi sistem IFI pada setiap lantai dengan variasi redaman, dan menemukan reduksi gaya dalam signifikan serta status kinerja *Immediate Occupancy* pada seluruh konfigurasi. Namun, studi-studi tersebut secara konsisten mengevaluasi kinerja melalui parameter global per-bangunan; evaluasi eksplisit terhadap periode fundamental dan amplitudo pada setiap lantai sebagai konsekuensi segmentasi dinamis akibat IFI belum menjadi fokus tersendiri, dan menjadi celah yang dijawab penelitian ini.

2.2 Analisis *Time History* dan Transformasi FFT

Metode *time history* merupakan pendekatan paling akurat untuk mengevaluasi respons dinamik struktur akibat eksitasi seismik, karena mampu menangkap perilaku nonlinear dan efek mode getar tinggi yang tidak terakomodasi oleh analisis spektrum respons (Chopra, 2017), dengan mensimulasikan respons struktur langsung terhadap rekaman percepatan tanah aktual (Clough & Penzien, 2003).

Penelitian ini menggunakan rekaman percepatan tanah Altadena (gempa Northridge, 17 Januari 1994) dari pustaka bawaan ETABS v.22.5.1, dipilih karena kandungan frekuensinya yang luas sehingga mampu berinteraksi efektif dengan rentang periode struktur bertingkat menengah, baik pada kondisi *fixed-base* maupun pasca-modifikasi kekakuan akibat IFI.

Data riwayat waktu hasil analisis (hubungan *joint displacement*–waktu) ditransformasikan dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan algoritma *fast Fourier transform* (FFT) yang dirumuskan oleh Cooley & Tukey (1965), sehingga diperoleh spektrum frekuensi yang menunjukkan distribusi amplitudo terhadap frekuensi pada setiap lantai. Puncak spektrum

(*peak frequency*) diinterpretasikan sebagai frekuensi dominan struktur, sedangkan amplitudo, yang dalam penelitian ini didefinisikan secara eksplisit sebagai nilai puncak (maksimum) magnitudo respons getaran perpindahan absolut lantai terhadap dasar tetap struktur (bukan relatif terhadap lantai isolator) pada domain frekuensi hasil transformasi FFT. Pendekatan berbasis FFT ini dipilih karena pada struktur ber-IFI, distribusi frekuensi dominan antar lantai tidak seragam akibat ketidakberaturan kekakuan yang ditimbulkan oleh lapisan isolator, yaitu sebuah kondisi yang tidak dapat direpresentasikan secara akurat oleh pendekatan periode empiris tunggal berbasis kode desain maupun analisis modal konvensional.

Nilai periode fundamental yang dilaporkan pada penelitian ini diperoleh melalui pendekatan pencacahan siklus gelombang (*cycle-counting*) pada domain waktu (lihat subbab 3.2), bukan dari kebalikan puncak frekuensi FFT; kedua pendekatan bersifat saling melengkapi, yaitu FFT untuk karakterisasi amplitudo dan frekuensi dominan, *cycle-counting* untuk penentuan periode fundamental secara langsung. Dengan kata lain, analisis periode fundamental per lantai merupakan nilai periode fundamental yang diperoleh dari hasil analisis periode osilasi yang paling dominan terlihat langsung pada gerakan lantai tersebut selama gempa berlangsung. Sebagai contoh, pada konfigurasi P-7, periode fundamental lantai ke-3 merupakan nilai periode fundamental di lantai 3 bangunan tersebut; begitu juga periode fundamental di lantai 1, lantai 2, dan seterusnya, bukan satu nilai periode fundamental untuk satu bangunan utuh. Nilai ini bisa berbeda-beda antar lantai karena kekakuan struktur pada sistem IFI tidak seragam, sehingga tiap lantai bisa memiliki perilaku getaran dominan yang berbeda pula. Analisis bentuk ragam getar (*mode shape*) secara formal tidak dilakukan pada penelitian ini.

2.3 *Artificial Neural Network* dan *Random Forest* dalam Prediksi Respons Struktur

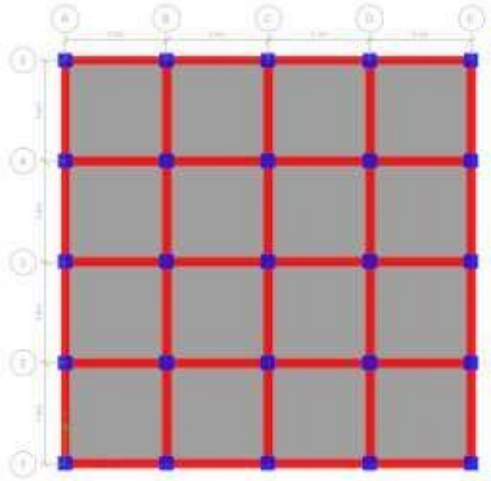
Artificial neural network (ANN) merupakan model komputasi terinspirasi dari sistem saraf biologis yang mempelajari hubungan nonlinear kompleks antara variabel input dan output melalui pembaruan bobot secara iteratif menggunakan algoritma *back-propagation* (Goodfellow, Bengio, & Courville, 2016; Haykin, 2009). Penerapannya dalam rekayasa gempa telah menunjukkan hasil menjanjikan sebagai alternatif metode regresi konvensional, mulai dari prediksi parameter gerak tanah utama (Alavi & Gandomi, 2011) hingga prediksi respons struktur bangunan bertingkat secara langsung dengan akurasi hingga 96% menggunakan dataset berskala nasional (Suryanita, Maizir, Firzal, Jingga, & Yuniarto, 2019). Penerapan tersebut kemudian diperluas untuk optimasi konfigurasi bangunan bertingkat (Athya & Singh, 2025) dan prediksi parameter lead rubber bearing pada bangunan ber-*inter-story isolation* (Ghosh et al., 2026), yang menegaskan relevansi langsung pendekatan ANN dalam konteks IFI.

Meskipun demikian, studi pembanding menunjukkan bahwa ANN tidak selalu unggul terhadap model ensemble berbasis pohon keputusan: Imam et al. (2024), menggunakan 29.200 data hasil analisis ETABS dari 292 model portal baja, melaporkan bahwa *Random Forest* (RF) mencapai akurasi prediksi *drift* antar-lantai yang lebih tinggi dibandingkan ANN maupun XGBoost. Temuan ini menjadi dasar pemilihan pendekatan *weighted ensemble* yang menggabungkan ANN dan RF pada penelitian ini (lihat Langkah 7, subbab 3.2), guna memadukan kapasitas ANN dalam menangkap hubungan nonlinear kompleks dengan stabilitas RF terhadap risiko *overfitting* pada dataset berukuran moderat.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah bangunan portal beton bertulang 7 lantai dengan denah persegi berukuran 20 m × 20 m, tinggi per lantai 4 m, total tinggi 28 m, sebagaimana disajikan pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 1. Denah struktur bangun



Gambar 2. Model 3D bangunan dengan penempatan *intermediate floor isolation* pada tujuh lantai

Material yang digunakan adalah beton mutu $f_c' = 25$ MPa dan baja tulangan f_y = 400 MPa. Empat variasi dimensi elemen struktur (Model 1–4) digunakan untuk merepresentasikan bangunan dengan kekakuan yang berbeda, sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Untuk setiap model, ditetapkan tujuh konfigurasi penempatan isolator (P-1 hingga P-7), masing-masing menempatkan isolator pada lantai 1 saja (P-1), lantai 1 s/d 2 (P-2), lantai 1 s/d 3 (P-3) hingga seluruh lantai 1 s/d 7 (P-7) seperti yang disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 3.

Lantai-lantai yang dilengkapi isolator pada suatu konfigurasi selanjutnya disebut sebagai zona isolasi; sebagai contoh, pada P-1 zona isolasi hanya mencakup lantai 1, sedangkan pada P-7 zona isolasi mencakup seluruh lantai 1 sampai 7. Konfigurasi P-7 disertakan bukan sebagai rekomendasi praktis, mengingat biaya penambahan isolator di seluruh lantai jauh lebih besar dibandingkan P-1, melainkan sebagai titik batas (*limiting case*) untuk mengamati pola perubahan amplitudo dan periode fundamental secara utuh seiring bertambahnya zona isolasi. Dengan demikian, perancang struktur dapat menilai titik keseimbangan optimal antara jumlah lantai yang diisolasi dan manfaat reduksi respons yang diperoleh.

Untuk memberikan gambaran kuantitatif variasi kekakuan lateral antar-model, dilakukan estimasi rasio momen inersia lentur kolom ($I = s^4/12$ untuk penampang persegi) sebagai indikator kekakuan relatif, dengan asumsi tinggi kolom dan mutu beton sama pada seluruh model (Tabel 1). Estimasi ini menunjukkan kekakuan lentur kolom Model 4 sekitar 9,38 kali lebih besar dibandingkan Model 1, mencerminkan peningkatan kekakuan struktur yang signifikan seiring pembesaran dimensi elemen. Tujuh variasi nilai redaman efektif isolator

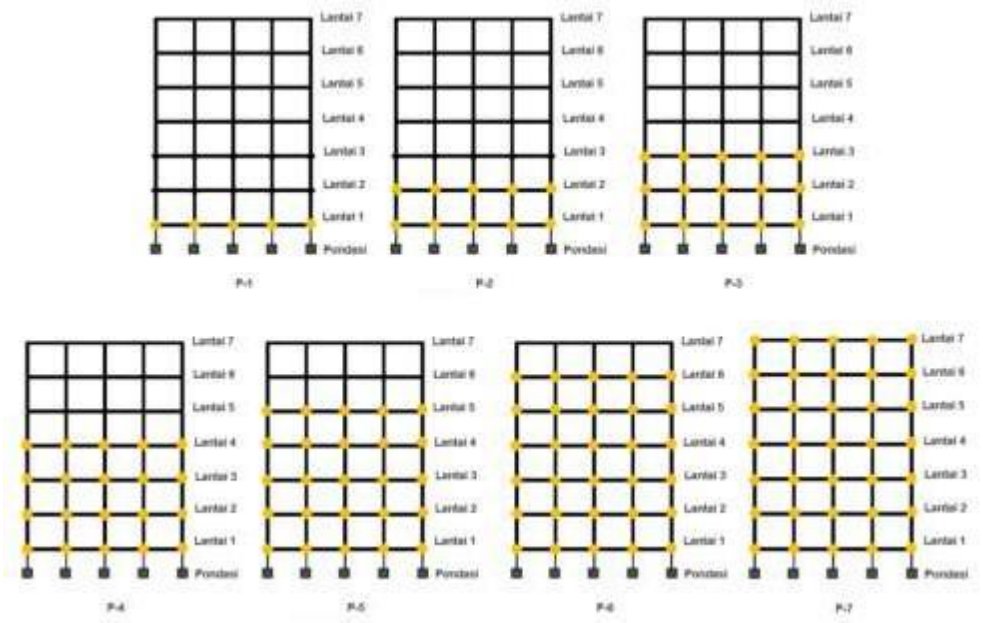
diterapkan, yaitu ξ = 2%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30%. Kombinasi ketiganya menghasilkan 196 model bangunan yang dianalisis sesuai yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 1. Variasi dimensi elemen struktur

Model	Balok (mm)	Kolom (mm)	Momen Inersia I (mm^4)	Rasio thd Model 1
1	300 × 400	400 × 400	$2{,}13 \times 10^9$	1,00×
2	300 × 450	500 × 500	$5{,}21 \times 10^9$	2,44×
3	300 × 500	600 × 600	$1{,}08 \times 10^{10}$	5,06×
4	300 × 600	700 × 700	$2{,}00 \times 10^{10}$	9,38×

Tabel 2. Skema konfigurasi penempatan *intermediate floor isolation* (P-1 s.d. P-7)

Kode	Lantai terisolasi	Jumlah lantai terisolasi
P-1	Lantai 1	1
P-2	Lantai 1 s/d 2	2
P-3	Lantai 1 s/d 3	3
P-4	Lantai 1 s/d 4	4
P-5	Lantai 1 s/d 5	5
P-6	Lantai 1 s/d 6	6
P-7	Lantai 1 s/d 7 (seluruh lantai)	7



Gambar 3. Skema konfigurasi penempatan *intermediate floor isolation* (P-1 s.d. P-7)

Tabel 3. Matriks kombinasi 196 model bangunan

Dimensi	Variasi	Jumlah pilihan
Model struktur (dimensi balok/kolom)	Model 1, 2, 3, 4	4
Konfigurasi penempatan isolator	P-1, P-2, P-3, P-4, P-5, P-6, P-7	7
Redaman efektif isolator (ξ)	2%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%	7
Total kombinasi model	4 × 7 × 7	196

3.2 Langkah-langkah Analisis

Penelitian ini bersifat komputasional dan dilaksanakan sepenuhnya dalam lingkungan simulasi digital, tanpa keterikatan pada lokasi seismik fisik tertentu, mengingat model bangunan yang dianalisis bersifat fiktif. Analisis dinamik *time history* dilakukan menggunakan ETABS v22.5.1 (Computers and Structures, Inc., 2023), sedangkan pemrosesan data berbasis kecerdasan buatan dilakukan melalui Google Colaboratory dengan pustaka TensorFlow (TensorFlow, 2024) yang penerapannya pada berbagai tugas komputasional bidang teknik sipil, termasuk deteksi retak otomatis pada elemen beton (Ayebare, Chavula, & Mugisha, 2025), telah banyak terbukti efektif. Tahapan teknis disusun sebagai berikut:

1. **Studi literatur dan penetapan data awal**: mencakup kajian sistem *base isolation*, konsep IFI, dan metode prediksi ANN, yang menghasilkan kerangka konseptual penelitian serta data awal material (beton $f_c' = 25$ MPa, tulangan longitudinal f_y = 400 MPa, tulangan geser f^y = 280 MPa) dan data properti isolator berdasarkan katalog Bridgestone (sertifikasi MVBR-0520(X0.6R)) (Bridgestone Corporation, 2017) yang diterapkan seragam pada seluruh konfigurasi, bukan properti yang dioptimasi khusus untuk setiap penempatan.

2. **Perancangan model struktur:** Model struktur dirancang sesuai dengan variasi dimensi balok dan kolom sesuai Tabel 1 (Model 1– 4), untuk merepresentasikan variasi tingkat kekakuan struktur. Setiap model dikombinasikan dengan tujuh nilai redaman efektif isolator dan tujuh konfigurasi penempatan IFI (Tabel 2), menghasilkan 196 kombinasi model bangunan (Tabel 3).

3. **Pemodelan pada ETABS v22.5.1**: Seluruh 196 model dibangun dengan elemen IFI direpresentasikan sebagai *nonlinear link element* pada lantai sesuai konfigurasi penempatannya.

4. **Analisis dinamik *time history***: Analisis dinamik *time history* pada software ETABS v22.5.1 dilakukan menggunakan rekaman percepatan tanah Altadena (gempa Northridge, 17 Januari 1994) untuk memperoleh data hubungan *joint displacement*– waktu pada setiap lantai di masing-masing model.

5. **Ekstraksi amplitudo dan frekuensi**: Data riwayat waktu mentah diproses menggunakan transformasi FFT untuk menentukan amplitudo maksimum dan frekuensi getaran dominan setiap lantai. Periode fundamental setiap lantai diperoleh secara terpisah melalui pendekatan pencacahan siklus gelombang (*cycle-counting*) pada domain waktu, yaitu jumlah gelombang penuh dibagi durasi rekaman, yang kemudian dikonversi menjadi periode melalui hubungan $T = 1/f$. Melalui kedua pendekatan ini diperoleh dataset amplitudo maksimum dan periode fundamental per lantai untuk seluruh 196 konfigurasi.

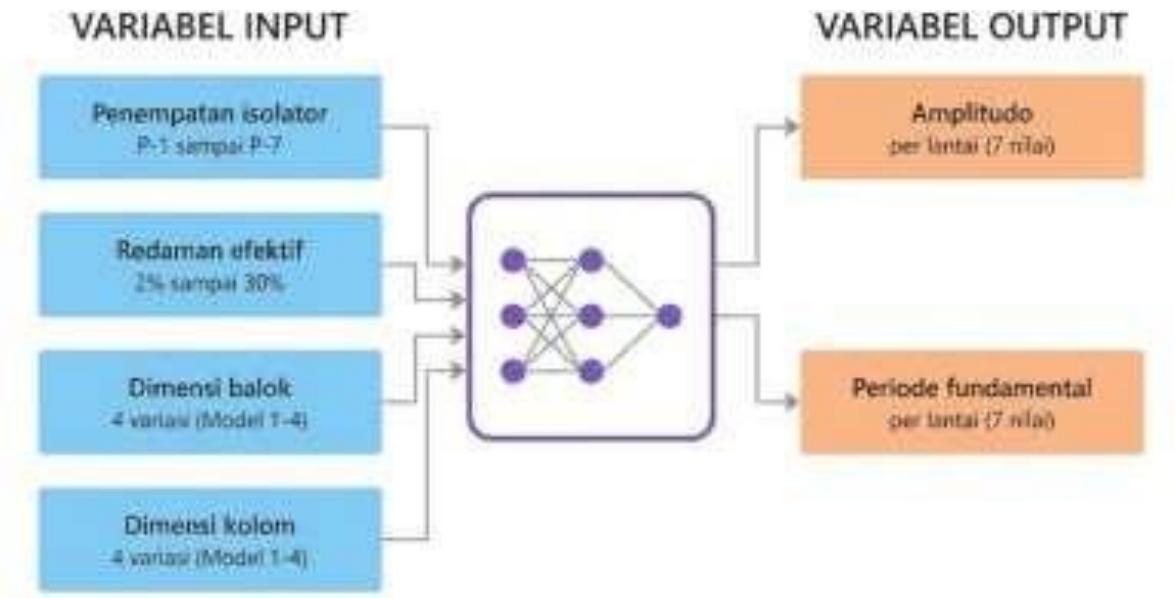
6. **Pembagian dataset:** Data amplitudo dan periode fundamental per lantai untuk seluruh 196 model dibagi menjadi data pelatihan dan data verifikasi menggunakan metode *stratified data splitting* dari pustaka *Scikit-Learn*, untuk keperluan pengembangan model prediksi.

7. **Pelatihan model ANN**: sebagaimana diilustrasikan pada diagram yang disajikan pada Gambar 4, model dilatih untuk mempelajari hubungan antara empat variabel input (penempatan isolator, redaman efektif, dimensi balok, dimensi kolom) terhadap dua variabel output (amplitudo dan periode fundamental setiap lantai).

   Model prediksi menggunakan pendekatan weighted ensemble yang menggabungkan ANN dan Random Forest (RF). ANN terdiri atas tiga lapisan tersembunyi (64, 32, 16 neuron, aktivasi ReLU) dan lapisan output linear (14 neuron), dengan Dropout (0,15 dan 0,1), optimasi Adam (learning rate 0,001, adaptif via ReduceLROnPlateau), loss MSE, dan EarlyStopping (patience 50) hingga maksimum 800 epoch. RF menggunakan 150 pohon (bagging standar) dengan input nilai fisik asli tanpa normalisasi. Kedua model dilatih pada pembagian data identik (85% latih, 15% validasi; random_state = 42). Prediksi akhir tiap variabel target diperoleh dari rerata tertimbang berbanding terbalik terhadap MAE validasi masing-masing model, sehingga model dengan akurasi lebih tinggi mendapat bobot lebih besar.

8. **Prediksi dan validasi**: model ANN terlatih digunakan untuk memprediksi 50 kombinasi desain yang tidak digunakan dalam melatih model ANN, kemudian diverifikasi akurasinya menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) terhadap data aktual.

9. **Sintesis data**: Tahap akhir dilakukan dengan mensintesis seluruh data periode fundamental dan amplitudo antar-konfigurasi untuk mengevaluasi pengaruh variasi penempatan IFI, redaman efektif, dan kekakuan struktur terhadap perilaku dinamis bangunan, yang menjadi dasar bagi pembahasan dan penarikan kesimpulan penelitian.



Gambar 4. Struktur model prediksi

4. HASIL DAN DISKUSI

4.1 Pengaruh Konfigurasi Penempatan terhadap Amplitudo

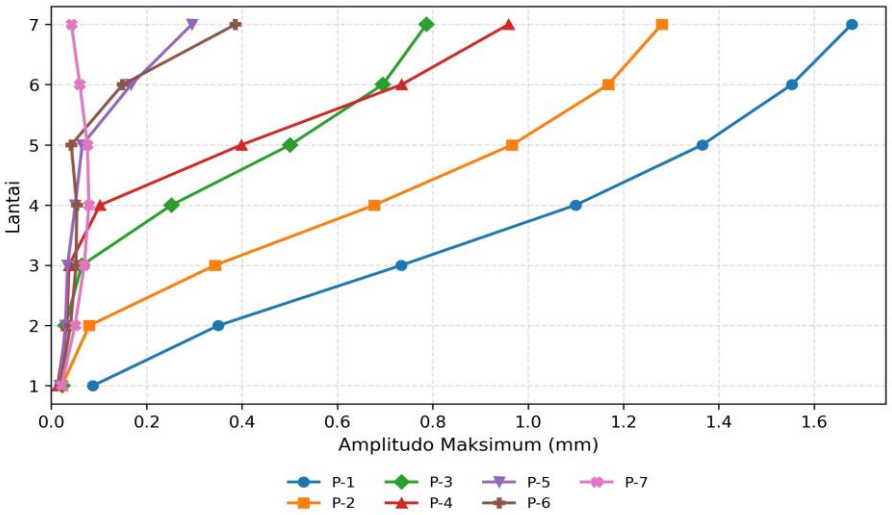
Hasil analisis 196 model menunjukkan bahwa letak isolator adalah faktor yang paling menentukan bentuk amplitudo (perpindahan absolut lantai terhadap dasar tetap struktur, sebagaimana didefinisikan pada Subbab 2.2) di sepanjang tinggi bangunan. Kontribusinya terhadap variasi amplitudo mencapai 79,8%–91,4%, jauh lebih besar daripada pengaruh dimensi struktur maupun redaman. Polanya konsisten pada semua model: lantai-lantai di dalam zona isolasi memiliki amplitudo jauh lebih rendah dan relatif seragam. Sebaliknya, lantai-lantai di luar zona isolasi mengalami lonjakan amplitudo yang tajam dan terus membesar menuju lantai paling atas, gejala yang disebut efek cambukan (*whipping effect*), umum terjadi pada struktur bertingkat tanpa isolasi. Titik peralihan kekakuan selalu muncul tepat di lantai pertama di atas batas zona isolasi.

Pola amplitudo yang terus meningkat di atas zona isolasi, alih-alih mendatar seperti perilaku gerak rigid pada *base isolation* konvensional, mencerminkan fleksibilitas substruktur yang belum sepenuhnya terdekopling dari superstruktur. Dengan demikian, pola ini bukan mengindikasikan pemilihan properti isolator yang kurang tepat, melainkan menegaskan bahwa perilaku dinamis IFI secara inheren berbeda dari base isolation konvensional akibat kontribusi kekakuan substruktur yang tidak dapat diabaikan.

Pola ini berlaku pada setiap model, seperti terlihat pada Tabel 4 dan Tabel 5. Tabel 4 menunjukkan amplitudo lengkap Model 1 (dimensi elemen terkecil) pada redaman ξ = 2%, divisualisasikan pada Gambar 5. Model 1 dipilih sebagai kasus representatif karena kekakuan strukturnya terendah (Tabel 1). Sebagai pembanding, Tabel 5 menunjukkan amplitudo lengkap Model 4 (dimensi elemen terbesar) pada redaman ξ = 2%, divisualisasikan pada Gambar 6. Model 4 dipilih karena kekakuan strukturnya terbesar. Perbandingan reduksi amplitudo P-1 terhadap P-7 pada lantai atap mengonfirmasi hal ini: Model 1 mengalami reduksi 97,48%, sedikit lebih tinggi dibandingkan Model 4 (94,27%).

Tabel 4. Matriks amplitudo model 1 (ξ = 0,02)

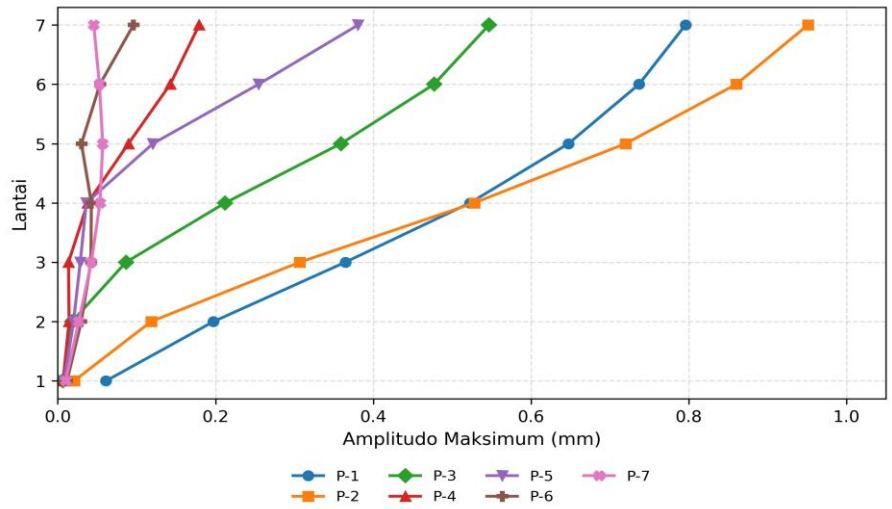
Kode Penempatan	Lantai 1 (mm)	Lantai 2 (mm)	Lantai 3 (mm)	Lantai 4 (mm)	Lantai 5 (mm)	Lantai 6 (mm)	Lantai 7 (mm)
P-7	0.0215	0.0498	0.0693	0.0789	0.0759	0.0600	0.0423
P-6	0.0183	0.0403	0.0521	0.0535	0.0420	0.1497	0.3864
P-5	0.0172	0.0299	0.0342	0.0504	0.0650	0.1677	0.2949
P-4	0.0135	0.0324	0.0372	0.1023	0.3989	0.7347	0.9592
P-3	0.0236	0.0295	0.0640	0.2523	0.5012	0.6952	0.7870
P-2	0.0224	0.0797	0.3431	0.6775	0.9664	1.1683	1.2804
P-1	0.0872	0.3503	0.7338	1.0997	1.3655	1.5529	1.6785



Gambar 5. Distribusi nilai amplitudo maksimum model 1 (ξ = 0,02)

Tabel 5. Matriks amplitudo model 4 (ξ = 0,02)

Kode Penempatan	Lantai 1 (mm)	Lantai 2 (mm)	Lantai 3 (mm)	Lantai 4 (mm)	Lantai 5 (mm)	Lantai 6 (mm)	Lantai 7 (mm)
P-7	0.0098	0.0267	0.0425	0.0535	0.0570	0.0528	0.0456
P-6	0.0117	0.0298	0.0420	0.0426	0.0300	0.0535	0.0960
P-5	0.0080	0.0200	0.0285	0.0361	0.1207	0.2546	0.3809
P-4	0.0068	0.0143	0.0136	0.0379	0.0896	0.1426	0.1793
P-3	0.0067	0.0181	0.0864	0.2122	0.3591	0.4771	0.5468
P-2	0.0206	0.1183	0.3067	0.5280	0.7201	0.8604	0.9512
P-1	0.0611	0.1974	0.3645	0.5227	0.6476	0.7370	0.7959



Gambar 6. Distribusi nilai amplitudo maksimum model 4 (ξ = 0,02)

Perbandingan P-1 terhadap P-7 pada Model 1 menunjukkan amplitudo berkurang 75,30% di lantai 1 (dari 0,0872 menjadi 0,0215) dan 97,48% di lantai 7 (dari 1,6785 menjadi 0,0423). Ini menegaskan bahwa semakin banyak lantai yang termasuk zona isolasi, semakin besar pengurangan amplitudo yang dicapai, terutama pada lantai yang tadinya berada di luar zona isolasi. Secara keseluruhan dari 196 kombinasi, pengurangan amplitudo P-1 terhadap P-7 berkisar 81,35% (lantai 1) sampai 95,28% (lantai 7). Namun, laju pengurangan amplitudo antar konfigurasi tidak bergerak lurus. Pengurangan rata-rata tertinggi terjadi saat berpindah dari P-2 ke P-3 (44,65%), sedangkan dari P-5 ke P-6 pengurangannya hampir nol (−0,54%). Ini menunjukkan ada titik jenuh di sekitar P-4/P-5: memperluas zona isolasi melewati titik ini tidak lagi memberi manfaat berarti. Pola serupa, meski dengan nilai yang lebih kecil karena struktur lebih kaku, juga terlihat pada Model 4 (Tabel 5, Gambar 6). Temuan titik jenuh ini dapat menjadi acuan praktis bagi perancang struktur: penambahan isolator melampaui P-4/P-5 tidak lagi memberikan manfaat reduksi amplitudo yang sepadan dengan biaya tambahan isolator, sehingga konfigurasi di sekitar P-4/P-5 dapat dipertimbangkan sebagai titik keseimbangan optimal antara efektivitas reduksi respons dan biaya implementasi. Seluruh konfigurasi P-1 hingga P-7 dalam penelitian ini bersifat kumulatif dari lantai dasar ke atas; perbandingan terhadap skema penempatan tidak berurutan dengan jumlah isolator yang sama (misalnya isolator hanya di lantai 1 dan 4, bukan lantai 1 dan 2) berada di luar lingkup penelitian ini dan menjadi arah penelitian lanjutan yang relevan.

Temuan penting lainnya adalah pergeseran lokasi amplitudo maksimum pada konfigurasi P-7. Pada konfigurasi P-1 sampai P-6, amplitudo maksimum selalu muncul di lantai paling atas (lantai 7), sesuai pola efek cambukan di bagian struktur bebas di atas zona isolasi. Namun pada P-7, karena seluruh lantai sudah terisolasi dan tidak ada lagi bagian struktur bebas di atasnya, pola cambukan itu tidak lagi terbentuk. Sebagai gantinya, amplitudo tetap rendah di seluruh ketinggian dengan titik puncak bergeser ke tengah bangunan (lantai 4 untuk Model 1, ξ = 2%, lihat Tabel 4; bervariasi antara lantai 4–5 tergantung kombinasi model dan redaman).

4.2 Pengaruh Nilai Redaman terhadap Amplitudo

Berbeda dari dugaan umum bahwa redaman yang lebih besar selalu menurunkan amplitudo, hasil analisis pada lingkup 196 model bangunan tujuh lantai berbasis IFI ini menunjukkan variasi redaman efektif (2%–30%) hanya berpengaruh sangat kecil terhadap amplitudo, yaitu 0,03%–0,39% dari total variasi di semua lantai, jauh di bawah pengaruh letak isolator maupun dimensi struktur. Temuan ini berlaku untuk konfigurasi dan rentang redaman yang diuji dalam penelitian ini, dan belum tentu sama untuk sistem isolasi lain. Perubahan amplitudo terhadap redaman juga tidak beraturan: amplitudo justru sedikit naik dari redaman 2% ke 5%, lalu relatif datar di rentang 10%–30% dengan perubahan yang sangat kecil, seperti terlihat pada Tabel 6 untuk konfigurasi P-7 Model 1.

Pola ini bisa dijelaskan dari sisi metode: amplitudo dalam penelitian ini adalah nilai puncak spektral pada frekuensi dominan hasil transformasi FFT, bukan energi total respons atau laju peluruhan getaran terhadap waktu. Secara teori, rasio redaman lebih memengaruhi lebar pita frekuensi di sekitar puncak spektrum dan laju peluruhan amplitudo seiring waktu, dibandingkan besar puncak spektral itu sendiri pada gempa yang sama. Jadi, amplitudo puncak spektral yang kurang peka terhadap perubahan redaman ini adalah ciri khas metode FFT, bukan tanda kesalahan pada data atau model.

Tabel 6. Distribusi Amplitudo (mm) Model 1, Penempatan (P-7), Redaman (ξ = 0,02, ξ = 0,05, ξ = 0,10, ξ = 0,15, ξ = 0,20, ξ = 0,25, ξ = 0,30)

Amplitudo lantai	**ξ = 0,02**	**ξ = 0,05**	**ξ = 0,10**	**ξ = 0,15**	**ξ = 0,20**	**ξ = 0,25**	**ξ = 0,30**
Lantai 1	0.0215	0.0202	0.0204	0.0205	0.0205	0.0205	0.0234
Lantai 2	0.0498	0.0465	0.0469	0.0470	0.0470	0.0471	0.0538
Lantai 3	0.0693	0.0641	0.0645	0.0647	0.0647	0.0647	0.0742
Lantai 4	0.0789	0.0725	0.0730	0.0731	0.0732	0.0732	0.0845
Lantai 5	0.0759	0.0698	0.0703	0.0704	0.0704	0.0705	0.0811
Amplitudo lantai	**ξ = 0,02**	**ξ = 0,05**	**ξ = 0,10**	**ξ = 0,15**	**ξ = 0,20**	**ξ = 0,25**	**ξ = 0,30**
Lantai 6	0.0600	0.0554	0.0558	0.0560	0.0560	0.0560	0.0644
Lantai 7	0.0423	0.0391	0.0394	0.0395	0.0395	0.0395	0.0454

4.3 Pengaruh Dimensi Elemen Struktur terhadap Amplitudo

Variasi dimensi balok dan kolom (Model 1–4) — yang berdasarkan estimasi Tabel 1 meningkatkan kekakuan lentur kolom hingga 9,38 kali dari Model 1 ke Model 4 — memberi pengaruh sedang terhadap amplitudo, sekitar 1,91%–7,30% dari total variasi. Semakin besar kekakuan struktur yang dihasilkan dari pembesaran dimensi tersebut, semakin kecil amplitudonya, karena struktur yang lebih kaku memiliki periode getar yang lebih pendek dan lebih mampu menahan deformasi akibat gempa yang sama. Namun, pada konfigurasi P-7 terdapat pengecualian di lantai puncak: amplitudo Model 4 (0,0456 mm) sedikit lebih tinggi dibandingkan Model 3 (0,0317 mm), berbeda dari pola penurunan amplitudo yang konsisten pada lantai dan model lainnya. Perbandingan keempat model pada konfigurasi P-7, redaman ξ = 2%, dirangkum pada Tabel 7.

Tabel 7. Distribusi amplitudo (mm) Model 1, Model 2, Model 3, dan Model 4 (ξ = 0,02)

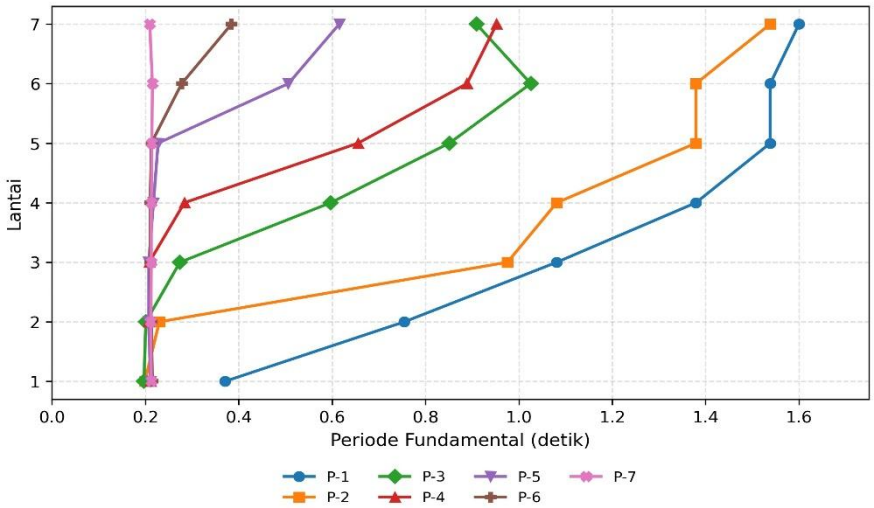
Amplitudo lantai	**Model 1**	**Model 2**	**Model 3**	**Model 4**
Lantai 1	0.021537	0.013371	0.008719	0.009808
Lantai 2	0.049850	0.033784	0.024142	0.026741
Lantai 3	0.069294	0.049732	0.038373	0.042467
Lantai 4	0.078893	0.058218	0.047478	0.053465
Lantai 5	0.075900	0.056667	0.048427	0.056981
Lantai 6	0.060043	0.045552	0.041377	0.052779
Lantai 7	0.042342	0.032408	0.031748	0.045585

4.4 Pengaruh Konfigurasi Penempatan terhadap Periode Fundamental

Analisis periode fundamental menunjukkan pola yang berbeda, bahkan berlawanan arah, dari pola amplitudo. Periode fundamental Model 1 (Tabel 8) divisualisasikan pada Gambar 7, dan Model 4 (Tabel 9) pada Gambar 8.

Tabel 8. Nilai periode fundamental (detik) model 1 pada kondisi redaman $\xi = 0{,}02$

Penempatan	Lantai 1	Lantai 2	Lantai 3	Lantai 4	Lantai 5	Lantai 6	Lantai 7
P-7	0.2128	0.2116	0.2128	0.2128	0.2139	0.2151	0.2094
P-6	0.2151	0.2128	0.2105	0.2105	0.2128	0.2778	0.3846
P-5	0.2116	0.2073	0.2073	0.2174	0.2273	0.5063	0.6154
P-4	0.2116	0.2073	0.2083	0.2837	0.6557	0.8889	0.9524
P-3	0.1970	0.2010	0.2740	0.5970	0.8511	1.0256	0.9091
P-2	0.1990	0.2299	0.9756	1.0811	1.3793	1.3793	1.5385
P-1	0.3704	0.7547	1.0811	1.3793	1.5385	1.5385	1.6000



Gambar 7. Distribusi nilai periode fundamental model 1 ($\xi = 0{,}02$)

Konfigurasi P-1 paling efektif memperpanjang periode fundamental secara bertahap, dari 0,3704 detik di lantai dasar sampai 1,6000 detik di lantai atap (naik ±332%). Ini mencerminkan perilaku isolasi yang diinginkan, yaitu seluruh struktur di atas titik isolasi bergerak sebagai satu kesatuan yang fleksibel.

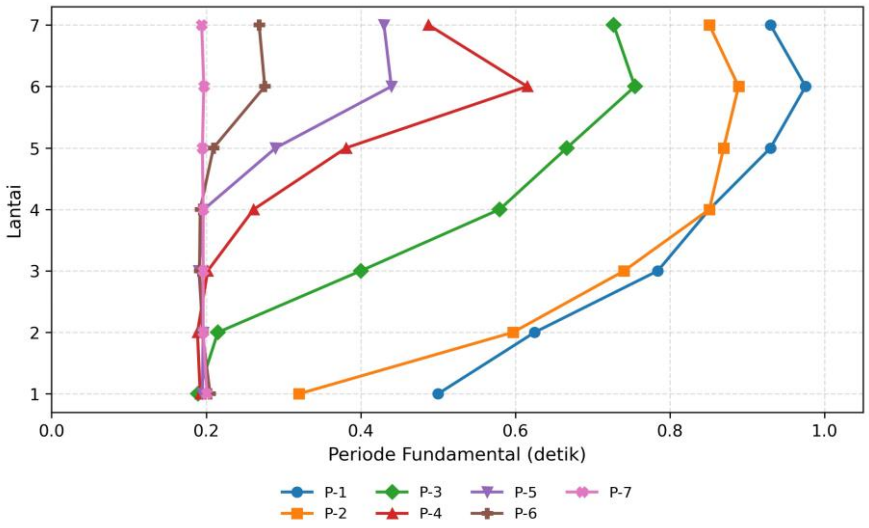
Temuan penting terjadi pada konfigurasi P-7: periode fundamental di semua lantai menjadi hampir seragam (0,2094–0,2151 detik pada Model 1; 0,1942–0,2010 detik pada Model 4), setara dengan struktur tanpa isolasi sama sekali. Ini terjadi karena isolator yang dipasang di semua lantai sekaligus membuat setiap lapisan isolasi saling menahan gerakan satu sama lain, sehingga struktur kehilangan kebebasan gerak yang dibutuhkan untuk berperilaku sebagaimana struktur yang hanya diisolasi pada lantai dasar.

Penelitian ini melengkapi temuan-temuan terdahulu dengan pola dan angka yang jelas: konfigurasi tepat di mana efek ini mendominasi (P-7) serta seberapa besar penyeragaman periode yang terjadi, sesuatu yang belum terpetakan secara sistematis pada penelitian-penelitian sebelumnya. Sebaliknya, konfigurasi P-2 sampai P-6 menghasilkan pola campuran: lantai di dalam zona isolasi memiliki periode seragam-pendek (0,18–0,28 detik), sedangkan

lantai di atasnya meningkat bertahap, dengan titik peralihan selalu tepat di lantai pertama di atas batas zona isolasi. Konfigurasi P-1 paling efektif memperpanjang periode, namun peningkatannya jauh lebih besar pada Model 1 (±332%, dari 0,3704 menjadi 1,6000 detik) dibanding Model 4 (±86%, dari 0,5000 menjadi 0,9302 detik), karena struktur yang lebih kaku lebih sulit digerakkan sebagai satu kesatuan fleksibel oleh isolator tunggal.

Tabel 9. Nilai periode fundamental (detik) model 4 pada kondisi redaman $\xi = 0{,}02$

Penempatan	Lantai 1	Lantai 2	Lantai 3	Lantai 4	Lantai 5	Lantai 6	Lantai 7
P-7	0.2010	0.1961	0.1961	0.1961	0.1951	0.1970	0.1942
P-6	0.2051	0.1951	0.1914	0.1923	0.2094	0.2759	0.2685
P-5	0.1951	0.1961	0.1905	0.1970	0.2899	0.4396	0.4301
P-4	0.1923	0.1887	0.2020	0.2614	0.3810	0.6154	0.4878
P-3	0.1896	0.2151	0.4000	0.5797	0.6667	0.7547	0.7273
P-2	0.3200	0.5970	0.7407	0.8511	0.8696	0.8889	0.8511
P-1	0.5000	0.6250	0.7843	0.8511	0.9302	0.9756	0.9302



Gambar 8. Distribusi nilai periode fundamental model 4 ($\xi = 0{,}02$)

4.5 Pengaruh Nilai Redaman terhadap Periode Fundamental

Redaman efektif membuat distribusi periode antar lantai lebih stabil tanpa mengubah nilainya secara berarti, seperti terlihat pada Tabel 10, yaitu periode fundamental antar redaman untuk konfigurasi P-7 Model 1. Hasilnya menunjukkan bahwa redaman bukan variabel prioritas dalam mengendalikan periode fundamental pada sistem IFI, sehingga upaya optimasi desain lebih baik difokuskan pada penempatan isolator dan dimensi struktur, yang terbukti jauh lebih dominan pengaruhnya.

Tabel 10. Distribusi periode fundamental (detik) Model 1, penempatan (P-7), redaman (ξ = 0,02, ξ = 0,05, ξ = 0,10, ξ = 0,15, ξ = 0,20, ξ = 0,25, ξ = 0,30)

Periode Fundamental Lantai	ξ = 0,02	ξ = 0,05	ξ = 0,10	ξ = 0,15	ξ = 0,20	ξ = 0,25	ξ = 0,30
Lantai 1	0.2128	0.2128	0.2094	0.2094	0.2094	0.2094	0.2083
Lantai 2	0.2116	0.2139	0.2128	0.2116	0.2116	0.2116	0.2116
Lantai 3	0.2128	0.2139	0.2139	0.2139	0.2139	0.2139	0.2116
Lantai 4	0.2128	0.2139	0.2139	0.2139	0.2128	0.2128	0.2116
Lantai 5	0.2139	0.2139	0.2139	0.2139	0.2139	0.2139	0.2128
Periode Fundamental Lantai	**ξ = 0,02**	**ξ = 0,05**	**ξ = 0,10**	**ξ = 0,15**	**ξ = 0,20**	**ξ = 0,25**	**ξ = 0,30**
Lantai 6	0.2151	0.2139	0.2139	0.2139	0.2139	0.2139	0.2116
Lantai 7	0.2094	0.2094	0.2083	0.2083	0.2073	0.2073	0.2083

4.6 Pengaruh Nilai Redaman terhadap Periode Fundamental

Semakin besar dimensi elemen struktur, semakin pendek periode fundamental di lantai 2 sampai 7 secara konsisten (Tabel 11). Namun, temuan penting penelitian ini terletak pada pola pengecualian yang teridentifikasi di lantai 1, tepat di level isolator untuk konfigurasi P-1: penambahan dimensi struktur tidak selalu menurunkan periode di lantai tersebut, Model 3 (0,5556 detik) justru lebih tinggi dari Model 4 (0,5000 detik), berbeda dari pola menurun monoton di lantai lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa tepat di level isolator, periode fundamental dipengaruhi secara bersamaan oleh kekakuan isolator dan kekakuan substruktur, sehingga hubungannya dengan dimensi struktur tidak lagi sesederhana pada lantai-lantai lain. Pola dan karakteristik pengecualian inilah yang menjadi kontribusi utama penelitian ini, mengisi kesenjangan mengenai perilaku periode fundamental yang belum terpetakan secara sistematis tepat di titik pertemuan isolator dan substruktur. Temuan ini sekaligus menjadi masukan praktis: menambah dimensi elemen struktur bukan cara yang efektif untuk mengoptimalkan performa isolasi seismik tepat di level isolator, berbeda dengan lantai-lantai lainnya. Seperti dibahas pada Bagian 4.3, dimensi elemen hanya menggeser besaran amplitudo tanpa mengubah pola distribusinya secara mendasar; letak isolator jauh lebih menentukan profil dinamik yang menguntungkan.

4.7 Pengaruh Nilai Redaman terhadap Periode Fundamental

Dataset amplitudo dan periode fundamental dari seluruh 196 model yang telah dibahas pada Bagian 4.1–4.6 selanjutnya digunakan untuk melatih dan menguji model prediksi ANN-RF, melalui pembagian data latih dan data verifikasi sebagaimana dijelaskan pada Subbab 3.4. Model ANN-RF menunjukkan performa yang baik dalam memprediksi amplitudo dan periode fundamental. Dari 700 titik data verifikasi pada 50 model bangunan, sebagian besar hasil prediksi masuk kategori akurat hingga sangat akurat: 85,57% titik data (599 dari 700) memiliki error di bawah 10%, dan 96,57% (676 dari 700) di bawah 20%, seperti terlihat pada Tabel 12. Namun, keandalan kedua besaran ini berbeda: prediksi periode fundamental sangat akurat pada seluruh 350 titik data (100%) dengan error di bawah 10%, tanpa satu pun yang

melampaui batas itu. Sebaliknya, prediksi amplitudo lebih bervariasi: 71,14% titik data berada di bawah 10% error, dan 24 titik data (6,86% dari total data amplitudo) memiliki error di atas 20%.

Tabel 11. Distribusi periode fundamental (detik) Model 1, Model 2, Model 3, dan Model 4 (ξ = 0,02)

Periode Fundamental lantai	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Lantai 1	0.3704	0.3774	0.5556	0.5000
Lantai 2	0.7547	0.7273	0.6780	0.6250
Lantai 3	1.0811	0.9091	0.8696	0.7843
Lantai 4	1.3793	1.0811	0.9756	0.8511
Lantai 5	1.5385	1.4815	1.1765	0.9302
Lantai 6	1.5385	1.5385	1.1111	0.9756
Lantai 7	1.6000	1.3333	1.1429	0.9302

Tabel 12. Distribusi *error* per rentang dan per besaran

Rentang Error	Amplitudo (n)	Amplitudo (%)	Periode Fundamental (n)	Periode Fundamental (%)	Total (n)	Total (%)
0–5%	180	51,43	333	95,14	513	73,29
5–10%	69	19,71	17	4,86	86	12,29
10–15%	55	15,71	0	0	55	7,86
15–20%	22	6,29	0	0	22	3,14
>20%	24	6,86	0	0	24	3,43
Total	350	100	350	100	700	100

Distribusi error pada Tabel 12 bersifat spesifik untuk lingkup 196 model tujuh lantai, satu rekaman gempa (Altadena), dan rentang variasi yang diuji; generalisasi ke variasi bangunan tinggi yang lebih luas, baik dari segi jumlah lantai, tipe struktur, maupun karakteristik rekaman gempa yang berbeda memerlukan validasi lebih lanjut. Keunggulan utama pendekatan ini adalah kecepatan: prediksi untuk kombinasi parameter baru dapat dilakukan dalam hitungan milidetik setelah pelatihan selesai, jauh lebih cepat dibanding simulasi time history penuh, membuka peluang ANN sebagai alat bantu desain awal struktur ber-IFI.

4.8 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya oleh Suan et al. (2025) mengkaji bangunan yang sama menggunakan metode statik ekuivalen dan spektrum respons. Penelitian itu menyimpulkan bahwa memasang isolator di semua lantai efektif mengurangi gaya dalam kolom (12,20–63,30%) dan balok (25,90–56,61%), serta mencapai level kinerja Immediate Occupancy pada semua variasi redaman menurut ATC-40. Temuan itu tetap valid untuk parameter yang mereka ukur. Namun, penelitian ini mengungkap temuan yang berbeda dari Suan et al. (2025), baik dari segi hasil maupun cakupan analisisnya. Suan et al. (2025) menggunakan metode statik ekuivalen dan spektrum respons yang hanya menghasilkan satu nilai periode fundamental

untuk keseluruhan bangunan, sedangkan penelitian ini menggunakan analisis time history nonlinier yang menghasilkan periode fundamental pada setiap lantai secara terpisah, sehingga pola perubahannya di sepanjang tinggi bangunan dapat teridentifikasi, sesuatu yang tidak dapat diperoleh dari metode yang mereka gunakan. Melalui pendekatan ini ditemukan bahwa pada konfigurasi isolasi penuh (P-7), yang oleh Suan et al. (2025) justru direkomendasikan sebagai konfigurasi paling efektif dari sisi gaya dalam, periode fundamental di seluruh lantai justru menjadi seragam dan mendekati kondisi fixed-base (Bagian 4.4), sebuah tanda bahwa fungsi utama isolasi seismik, yaitu memperpanjang periode alami struktur, justru hilang. Perbedaan hasil ini terjadi karena dua hal: pertama, elemen isolator pada penelitian ini dimodelkan sebagai elemen nonlinear (Subbab 3.2), sehingga periode fundamental efektifnya bergantung pada amplitudo dan riwayat respons aktual selama gempa berlangsung, berbeda dari asumsi kekakuan konstan pada analisis statik ekuivalen dan spektrum respons konvensional; kedua, analisis per-lantai yang dilakukan penelitian ini mengungkap pola distribusi periode yang tidak dapat ditangkap oleh pendekatan satu-nilai-untuk-seluruh-bangunan pada penelitian terdahulu.

Temuan ini menunjukkan bahwa menilai kinerja struktur ber-IFI hanya dari parameter global (gaya dalam, level kinerja *pushover*) saja tidak cukup untuk memastikan isolasi benar-benar efektif secara menyeluruh. Struktur ber-IFI tidak lagi bergerak sebagai satu kesatuan, melainkan terbagi menjadi beberapa bagian yang responsnya bergantung pada posisi isolator, sebagaimana ditunjukkan secara kuantitatif per lantai melalui penelitian ini. Karena itu, distribusi periode fundamental per lantai perlu dijadikan kriteria tambahan dalam standar perencanaan bangunan ber-IFI, terutama untuk konfigurasi isolasi lebih dari satu lantai, agar fungsi utama sistem isolasi tetap terjaga.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis terhadap 196 model bangunan tujuh lantai dengan sistem *intermediate floor isolation*, penelitian ini menyimpulkan beberapa hal utama:

1. Letak isolator adalah faktor paling dominan dalam menentukan amplitudo respons struktur, jauh melampaui pengaruh redaman maupun dimensi elemen struktur. Efektivitasnya jenuh di sekitar konfigurasi P-4/P-5, sehingga memperluas zona isolasi melebihi titik tersebut tidak lagi memberi manfaat berarti; konfigurasi isolasi penuh (P-7), meski paling efektif menekan amplitudo, bukan pilihan yang otomatis paling optimal.
2. Pola periode fundamental berlawanan arah dengan pola amplitudo dan sangat bergantung pada konfigurasi penempatan: isolasi hanya di dasar (P-1) menghasilkan perpanjangan periode yang ideal, sedangkan isolasi penuh (P-7) justru membuat periode kembali seragam dan pendek, mendekati kondisi tanpa isolasi, pola dan karakteristik dinamis IFI yang belum terpetakan secara sistematis pada penelitian sebelumnya.
3. Redaman efektif dan dimensi elemen struktur berperan sebagai faktor pendukung, bukan penentu utama, sehingga optimasi desain IFI sebaiknya memprioritaskan penempatan isolator, dengan dimensi struktur dioptimalkan secara bersamaan, bukan terpisah.

4. Model ensemble ANN-RF terbukti andal sebagai alat bantu prediksi cepat, dengan akurasi prediksi periode fundamental yang sangat tinggi dan akurasi prediksi amplitudo yang cukup baik, sehingga berpotensi digunakan sebagai alat bantu desain awal struktur ber-IFI tanpa perlu mengulang simulasi time history nonlinier yang memerlukan banyak waktu secara komputasi.

Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa kinerja struktur ber-IFI tidak dapat dinilai hanya dari parameter global seperti gaya dalam atau level kinerja *pushover*, melainkan memerlukan pemahaman atas pola dan karakteristik respons dinamis di setiap lantai, sehingga distribusi periode fundamental per lantai perlu dipertimbangkan sebagai kriteria tambahan dalam standar perencanaan bangunan ber-IFI.

Keterbatasan Penelitian dan Saran Penelitian Lanjutan

Penelitian ini punya tiga keterbatasan utama. Pertama, seluruh 196 model bangunan bersifat fiktif dan dianalisis secara komputasional (ETABS v22.5.1 dan TensorFlow) tanpa validasi eksperimental fisik, sehingga akurasi model prediksi dan temuan perilaku dinamis IFI masih terbatas pada ranah numerik. Kedua, analisis time history hanya memakai satu rekaman gempa (Altadena, gempa Northridge 1994), dipilih dari pustaka bawaan ETABS karena kandungan frekuensinya yang luas, tetapi belum mewakili keragaman record-to-record antar rekaman gempa, sehingga hasil penelitian ini perlu digeneralisasi secara hati-hati. Ketiga, penelitian ini menemukan pola pengecualian pada amplitudo lantai puncak Model 4 konfigurasi P-7 (Bagian 4.3), namun tidak menelusuri lebih jauh penyebab munculnya pola tersebut. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan lebih banyak variasi rekaman gempa serta validasi melalui uji shaking table atau data pemantauan bangunan nyata (structural health monitoring), serta mengkaji lebih lanjut penyebab pola pengecualian amplitudo yang ditemukan pada penelitian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana, Kupang, atas dukungan fasilitas penelitian, serta kepada seluruh rekan sejawat yang telah memberikan masukan konstruktif selama proses penelitian berlangsung.

PERNYATAAN KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam penelitian dan penulisan naskah ini.

6. DAFTAR REFERENSI

Alavi, A. H., & Gandomi, A. H. (2011). Prediction of principal ground-motion parameters using a hybrid method coupling artificial neural networks and simulated annealing. *Computers & Structures*, *89*(23–24), 2176–2194. doi:10.1016/j.compstruc.2011.08.003

Athya, T., & Singh, R. (2025). Use of artificial neural network-based prediction of optimum case of multistory buildings by using structural response. *IJRASET Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*.

Ayebare, M., Chavula, P., & Mugisha, S. (2025). TensorFlow-native implementation for automated crack detection in concrete structures. *Mesopotamian Journal of Civil Engineering*, 97–108.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung (SNI 1726:2019). Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.

Bridgestone Corporation. (2017). *Seismic isolation product line-up*. Tokyo, Japan: Seismic Isolation & Vibration Control Products Business Department, Bridgestone Corporation.

Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc.

Clough, R. W., & Penzien, J. (2003). *Dynamics of Structures* (3rd ed.). Berkeley, CA: Computers & Structures, Inc.

Computers and Structures, Inc. (2023). *ETABS: Building Analysis and Design*. Berkeley, CA: CSI.

Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, *19*(90), 297–301. doi:10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1

Faiella, D., & Mele, E. (2019). Vibration characteristics and higher mode coupling in intermediate isolation systems (IIS): A parametric analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *17*(8), 4347–4387. doi:10.1007/s10518-019-00637-w

Gao, L., Liu, D., Lei, M., Ding, Y., & Mu, S. (2023). Study on Shock-Absorbing Effect of a Double-Story Isolation Structure Considering Soil–Structure Interaction. *Buildings*, *13*(11), 2677. doi:10.3390/buildings13112677

Ghosh, S. K., Kashyap, I., & Das, D. (2026). Machine learning-enhanced metaheuristic optimization of lead rubber bearings for inter-story isolated buildings under seismic load. *Engineering Structures and Civil Engineering*, *20*, 36–79. doi:10.1007/s11709-026-1275-y

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. Cambridge, MA: MIT Press.

Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines* (3rd ed.). Upper Saddle River,
NJ: Pearson Education.

Imam, M. H., Mohiuddin, M., Shuman, N. M., Oyshi, T. I., Debnath, B., & Liham, M. I. M. H. (2024). Prediction of seismic performance of steel frame structures: A machine learning approach. *Structures*, *69*, 107547. doi:10.1016/j.istruc.2024.107547

Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. New York, NY: John Wiley & Sons.

Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi teknik dan rekayasa kegempaan*. Yogyakarta, Indonesia: Pustaka Pelajar.

Pusat Studi Gempa Nasional (Pusgen). (2017). Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017. Bandung, Indonesia: Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Suan, F. R., Pah, J. J. S., & Bolla, M. E. (2025). *Analisis kinerja struktur bangunan base isolation pada setiap lantai bangunan dengan variasi redaman efektif isolator* [Skripsi tidak diterbitkan]. Kupang, Indonesia: Universitas Nusa Cendana.

Suryanita, R., Maizir, H., Firzal, Y., Jingga, H., & Yuniarto, E. (2019). Response prediction of multi-story building using backpropagation neural networks method. In

MATEC Web of Conferences (Vol. 276, p. 1011). doi:10.1051/matecconf/201927601011

Tang, J., & Liu, D. (2024). Study on the shock-absorption performance of isolation systems in high-rise vertically irregular double-story structures: Dynamic time history evaluation. *Buildings*, *14*(12), 3792. doi:10.3390/buildings14123792

TensorFlow. (2024). *Keras: Building and training neural networks*. Retrieved from https://www.tensorflow.org/guide/keras/sequential_model

Wang, S.-J., Chang, K.-C., Hwang, J.-S., & Lee, B.-H. (2011). Simplified analysis of mid-story seismically isolated buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *40*(2), 119–133. doi:10.1002/eqe.1004

Wang, S.-J., Hwang, J.-S., Chang, K.-C., Lin, M.-H., & Lee, B.-H. (2013). Analytical and experimental studies on midstory isolated buildings with modal coupling effect. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *42*(2), 201–219. doi:10.1002/eqe.2203

Zhao, G., Zhang, L., Liu, D., & Shen, K. (2025). Seismic response analysis of double-layer isolation structures in high-rise buildings. *Buildings*, *15*(8), 1292. doi:10.3390/buildings15081292

LAMPIRAN PANDUAN PENGGUNAAN DAN APLIKASI ANTARMUKA HTML MODEL ANN-RF

Lampiran ini berisi panduan penggunaan dan aplikasi antarmuka HTML berbasis web untuk prediksi instan menggunakan model Ensemble ANN-RF. Dokumen panduan dan berkas aplikasi interaktif tersebut dapat diakses melalui tautan berikut: https://drive.google.com/drive/folders/1wOVF3VDhgI_ieiZrmQ_8GuA0UVkreqU?hl=ID