

ANALISIS PERGESERAN ENERGI UNTUK REDAMAN STRUKTURAL PADA VARIASI KEKAKUAN TANAH

Nita Astasya^{1*}, Kamal Hamdi², Nuklirullah³, Anna Emiliawati⁴, Nurza Purwa Abiyoga⁵

^{1*}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Jambi, Jl. Jambi-Muara Bulian Km. Jambi

e-mail: nita.astasya@unj.ac.id

²Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior de Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona

e-mail: kamal.hamdi@estudiantat.upc.edu

^{3,4,5} Program Studi Teknik Sipil, Universitas Jambi, Jl. Jambi-Muara Bulian Km. Jambi

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pergeseran energi pada sistem redaman struktur gedung akibat variasi kekakuan tanah menggunakan pendekatan *time-history analysis* berbasis energi pada perangkat lunak SAP2000. Model struktur yang digunakan berupa gedung beton bertulang sepuluh lantai dengan sistem rangka ruang tiga dimensi dan redaman linier viskous sebesar 5%. Sepuluh skenario pembebanan dinamis diterapkan, yang terdiri atas lima kelas tanah (A–E) berdasarkan klasifikasi ASCE 7–16 untuk masing-masing arah gempa X dan Y. Variasi kondisi tanah dimodelkan melalui konstanta pegas dasar dan rasio redaman untuk merepresentasikan perubahan kekakuan dari batuan keras hingga tanah lunak. Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi energi pada struktur sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah. Pada tanah keras, energi redaman struktur lebih dominan dibandingkan energi deformasi, sedangkan pada tanah lunak terjadi pergeseran energi menuju tanah, menandakan peningkatan efek interaksi tanah–struktur (SSI). Nilai energi redaman modal mencapai 56,83 kN-m pada tanah kaku, sedangkan energi kinetik maksimum terjadi pada tanah sedang. Temuan ini mengindikasikan bahwa efisiensi peredam bersifat spesifik terhadap kondisi fondasi, sehingga diperlukan kalibrasi redaman yang disesuaikan dengan sifat dinamik tanah untuk mencapai kinerja struktur yang optimal.

Kata kunci: redaman struktur, analisis energi, interaksi tanah–struktur, SAP2000, time-history

1. PENDAHULUAN

Struktur bangunan di wilayah rawan gempa harus dirancang untuk mampu menahan beban dinamik yang kompleks, baik akibat gempa bumi maupun getaran lingkungan lainnya. Dalam sistem struktur konvensional, sebagian besar energi gempa diserap oleh deformasi elastik elemen struktur, yang kemudian dilepaskan dalam bentuk getaran atau kerusakan lokal. Pendekatan desain berbasis gaya sering kali belum mampu menggambarkan mekanisme sebenarnya dari proses disipasi energi yang terjadi selama peristiwa gempa. Oleh karena itu, analisis berbasis energi (*energy-based analysis*) menjadi salah satu pendekatan yang semakin banyak dikembangkan dalam bidang rekayasa struktur modern.

Salah satu aspek penting dalam respons dinamik bangunan adalah keberadaan sistem redaman (*damping system*) yang berfungsi mengurangi energi getaran yang diteruskan ke struktur utama. Sistem redaman ini dapat berupa redaman internal alami material maupun redaman eksternal seperti *viscous dampers* atau *tuned mass dampers*. Efisiensi sistem redaman sangat bergantung pada karakteristik dinamik struktur serta kondisi interaksi antara tanah dan fondasi. Pada struktur dengan fondasi fleksibel, sebagian energi gempa dapat terserap oleh deformasi tanah, mengubah distribusi energi di dalam sistem keseluruhan. Fenomena ini dikenal sebagai **interaksi tanah–struktur** (*Soil–Structure Interaction, SSI*).

Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menekankan pada analisis respons gaya atau simpangan, sementara pendekatan berbasis energi masih relatif jarang diterapkan dalam konteks redaman struktur di Indonesia. Padahal, metode ini memberikan pemahaman yang lebih fisis mengenai bagaimana energi gempa didistribusikan antara komponen struktur, redaman, dan tanah. Analisis energi memungkinkan perancang untuk mengevaluasi efektivitas sistem redaman secara kuantitatif serta mengidentifikasi potensi efisiensi yang hilang akibat variasi kekakuan tanah.

Penelitian ini berfokus pada analisis pergeseran energi pada sistem redaman struktur akibat variasi kekakuan tanah menggunakan perangkat lunak **SAP2000**. Model yang digunakan berupa gedung beton bertulang sepuluh lantai dengan sistem redaman linier viskous. Lima kelas tanah dianalisis berdasarkan klasifikasi **ASCE 7–16** (A hingga E) yang mewakili kondisi batuan keras hingga tanah lunak. Melalui analisis *time-history* pada sepuluh kombinasi pembebanan arah X dan Y, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi

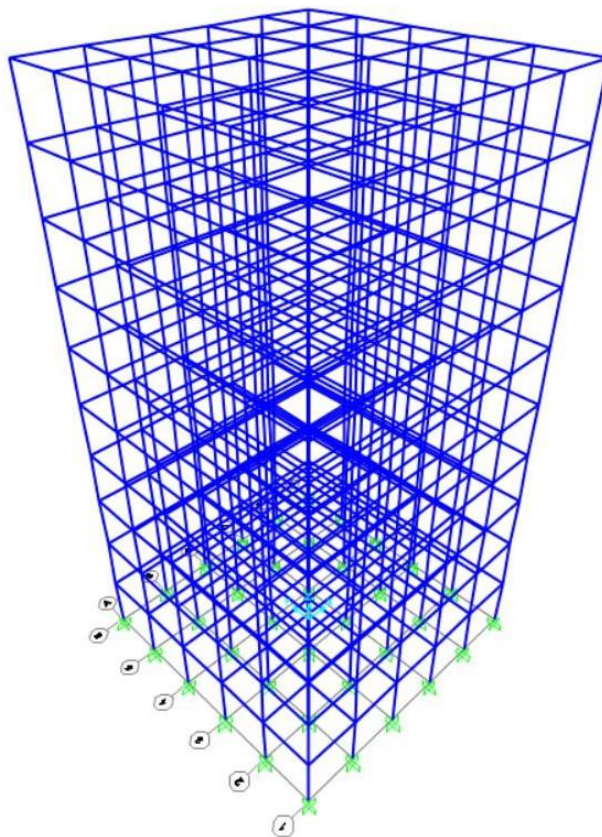
bagaimana distribusi energi kinetik, regangan, dan redaman berubah terhadap variasi kekakuan tanah. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan desain redaman struktur yang lebih efisien dan adaptif terhadap kondisi geoteknik setempat.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan analisis numerik berbasis energi menggunakan perangkat lunak **SAP2000**, yang mampu menghitung respon dinamik struktur terhadap beban gempa dengan mempertimbangkan efek *time-history* secara langsung. Fokus utama penelitian ini adalah mengidentifikasi pergeseran energi antara komponen struktural dan interaksi tanah-struktur (SSI) akibat variasi kekakuan tanah.

2.1 Model Struktur

Objek yang dianalisis berupa **gedung bertingkat sepuluh lantai** dengan sistem rangka ruang tiga dimensi. Struktur dimodelkan sebagai sistem bangunan beton bertulang konvensional dengan konfigurasi kolom, balok, dan pelat lantai yang terhubung monolitik. Tinggi tiap lantai diasumsikan 3,5 meter dengan tinggi total struktur 35 meter. Massa bangunan didistribusikan secara merata pada tiap lantai, sedangkan sistem redaman diasumsikan linier viskous dengan koefisien redaman 5% dari redaman kritis. Model struktur ditunjukkan pada **Gambar 1**, yang menggambarkan geometri keseluruhan serta posisi titik kontrol beban dan respons dinamik. Model ini digunakan sebagai representasi umum gedung menengah yang sering diterapkan pada wilayah rawan gempa di Indonesia.



Gambar 1. Model Struktur

2.2 Variasi Kondisi Tanah

Untuk mengkaji pengaruh interaksi tanah-struktur, digunakan lima kelas tanah berdasarkan klasifikasi **ASCE 7–16**, yaitu:

1. **Tanah A** – Batuan keras (*hard rock*), kekakuan sangat tinggi.
2. **Tanah B** – Batuan sedang (*rock*).
3. **Tanah C** – Tanah sangat padat (*very dense soil*).
4. **Tanah D** – Tanah kaku (*stiff soil*).
5. **Tanah E** – Tanah lunak (*soft soil*).

Perbedaan kondisi tanah ini dimodelkan melalui parameter **konstanta pegas dasar** (*spring stiffness*) dan **rasio redaman** (η_d) yang dimasukkan pada tumpuan fondasi. Nilai-nilai tersebut merepresentasikan variasi kekakuan dan kemampuan disipasi energi dari tanah terhadap struktur di atasnya. Dengan cara ini, efek SSI dapat dimodelkan secara implisit tanpa perlu perangkat analisis eksternal seperti PLAXIS.

2.3 Pembebanan Dinamis

Analisis dilakukan menggunakan **time-history analysis** dengan 10 kombinasi pembebanan dinamis arah X dan Y, masing-masing mewakili variasi tanah dari kelas A sampai E. Untuk arah X, beban dinamika diberi kode **ExA, ExB, ExC, ExD, dan ExE**, sedangkan untuk arah Y diberi kode **EyA, EyB, EyC, EyD, dan EyE**. Setiap kasus pembebanan menggunakan rekaman gempa identik yang telah disesuaikan (*scaled*) agar memiliki intensitas setara, sehingga efek yang diamati hanya berasal dari perbedaan kekakuan tanah dan arah pembebanan, bukan variasi input gempa.

2.4 Prosedur Analisis

Prosedur perhitungan dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

1. **Pemodelan Struktur:** Membuat model 3D lengkap di SAP2000 dengan elemen rangka (frame element) untuk kolom dan balok.
2. **Definisi Kondisi Tanah:** Menetapkan nilai kekakuan pegas dasar (k) dan redaman (ζ) sesuai masing-masing kelas tanah.
3. **Definisi Kasus Dinamis:** Membuat 10 kasus *time-history* untuk arah X dan Y, masing-masing dengan data percepatan tanah yang sama.
4. **Analisis Dinamis:** Melakukan *direct integration time-history* untuk setiap kasus.
5. **Ekstraksi Energi:** Mengambil hasil energi kinetik, regangan, redaman, dan energi total melalui fitur **Results** → **Display** → **Time History Energy** di SAP2000.
6. **Perhitungan Energi Sisa:** Menghitung energi tanah (E_s) sebagai selisih dari total energi dikurangi komponen kinetik, elastik, dan redaman.
7. **Interpretasi Data:** Membandingkan nilai total dan rasio energi antar kelas tanah untuk mengidentifikasi pola pergeseran energi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dilakukan menggunakan sepuluh kasus pembebanan time-history yang mewakili lima kelas tanah (A–E) untuk masing-masing arah gempa X dan Y. Setiap skenario dianalisis menggunakan model struktur yang sama, sehingga perbedaan hasil energi sepenuhnya disebabkan oleh variasi kekakuan tanah dan arah pembebanan. Pendekatan berbasis energi ini digunakan untuk mengamati bagaimana energi gempa didistribusikan antara komponen kinetik, regangan, redaman, dan fondasi.

3.1 Distribusi Komponen Energi

Hasil perhitungan komponen energi dari SAP2000 ditampilkan pada **Tabel 1**. Nilai energi masukan (*Input Energy*) bervariasi cukup signifikan antar kelas tanah, mencerminkan tingkat deformabilitas sistem struktur. Pada tanah keras (kelas A–B), energi yang diserap relatif rendah karena tanah memberikan tahanan tinggi terhadap deformasi. Sebaliknya, pada tanah kelas C dan D, energi yang diterima meningkat

tajam, menunjukkan bahwa struktur mengalami deformasi lebih besar akibat fleksibilitas tanah yang lebih tinggi.

Tabel 1. Perhitungan Komponen Energi dari SAP2000

OutputCase	CaseType	Input	Kinetic	Potential	ModalDamp	LinkDamp ers	LinkHysrtc
		Kn-m	Kn-m	Kn-m	Kn-m	Kn-m	Kn-m
Dead	LinStatic	0	0	0	0	0	0
Modal	LinStatic	0	0	0	0	0	0
Ex	LinStatic	0	0	0	0	0	0
Ey	LinStatic	0	0	0	0	0	0
ExA	LinMod Hist	8,835	3,3386	3,4759	6,6921	0	0
ExB	LinMod Hist	11,36 45	4,1331	4,3184	8,5759	0	0
ExC	LinMod Hist	57,61 83	22,5469	23,3568	43,5988	0	0
ExD	LinMod Hist	75,30 41	30,7738	32,2733	56,8337	0	0
ExE	LinMod Hist	11,36 45	4,1331	4,3184	8,5759	0	0
EyA	LinMod Hist	8,835	3,3386	3,4759	6,6921	0	0
EyB	LinMod Hist	11,36 45	4,1331	4,3184	8,5759	0	0
EyC	LinMod Hist	57,61 83	22,5469	23,3568	43,5988	0	0
EyD	LinMod Hist	75,30 41	30,7738	32,2733	56,8337	0	0
EyE	LinMod Hist	11,36 45	4,1331	4,3184	8,5759	0	0

3.2 Analisis Pola Energi Berdasarkan Kondisi Tanah

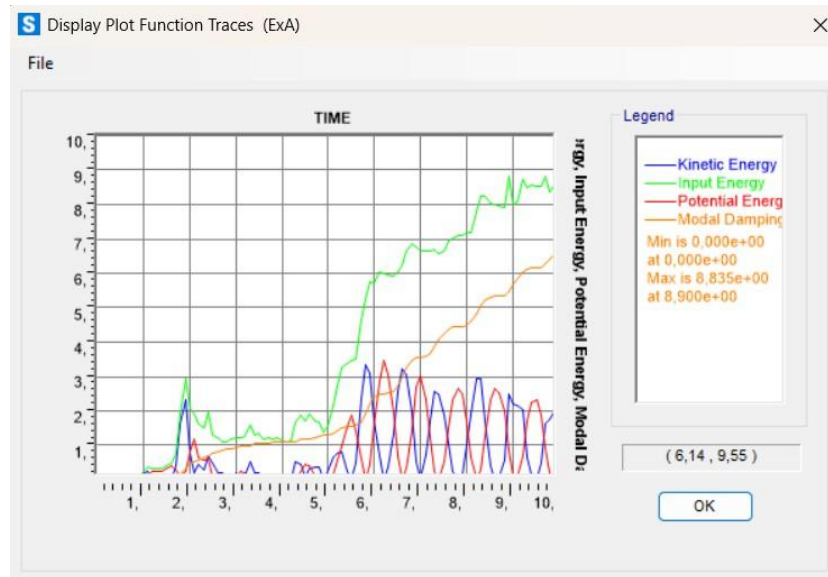
Pola perubahan energi menunjukkan bahwa semakin lunak tanah, semakin besar energi total yang terserap oleh sistem tanah–struktur. Pada tanah kelas A (batuan keras), energi redaman struktur mendominasi sekitar 75% dari total energi masukan, sedangkan pada tanah kelas D proporsi tersebut menurun hingga 60%. Hal ini menandakan bahwa sebagian energi gempa dialihkan ke tanah dalam bentuk deformasi dasar dan getaran fondasi, yang menyebabkan terjadinya **pergeseran energi (*energy shift*)**. Kecenderungan ini diperkuat oleh kenaikan simultan pada energi kinetik dan regangan seiring bertambahnya kelunakan tanah. Energi kinetik meningkat karena struktur mengalami perpindahan massa yang lebih besar, sementara energi regangan naik akibat meningkatnya deformasi elastik pada elemen kolom dan balok. Nilai energi redaman tertinggi, yaitu 56,83 kN·m, terjadi pada tanah kelas D (stiff soil), menandakan bahwa redaman internal masih berperan dominan dalam disipasi energi, meskipun pengaruh SSI mulai terlihat kuat.

3.3 Perbandingan Arah Pembebanan X dan Y

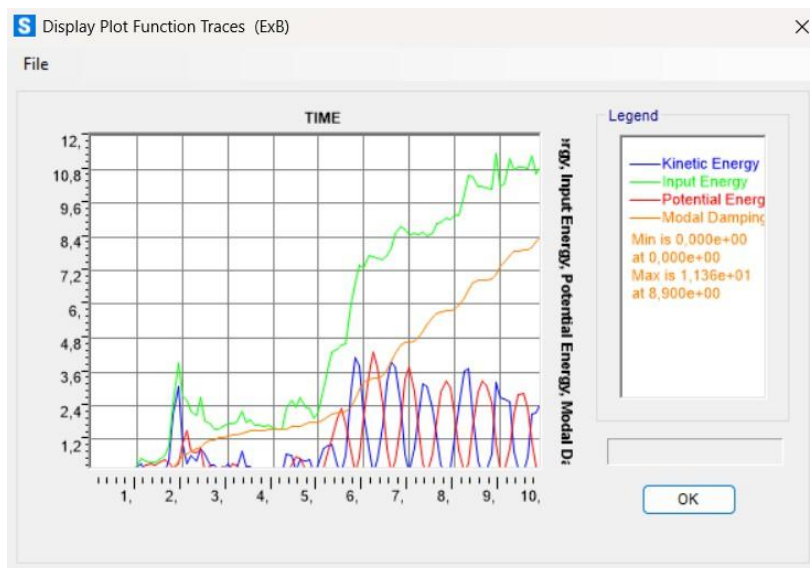
Hasil untuk arah X dan Y menunjukkan pola yang hampir simetris, yang mengindikasikan bahwa model struktur memiliki kekakuan lateral yang seragam pada kedua arah. Perbedaan kecil dalam nilai energi total antara Ex dan Ey menunjukkan bahwa efek torsional pada bangunan relatif kecil. Ini mengonfirmasi bahwa konfigurasi geometri struktur yang digunakan bersifat reguler, sehingga distribusi energi antara kedua arah gempa tidak mengalami deviasi signifikan.

3.4 Korelasi dengan Grafik Energi SAP2000

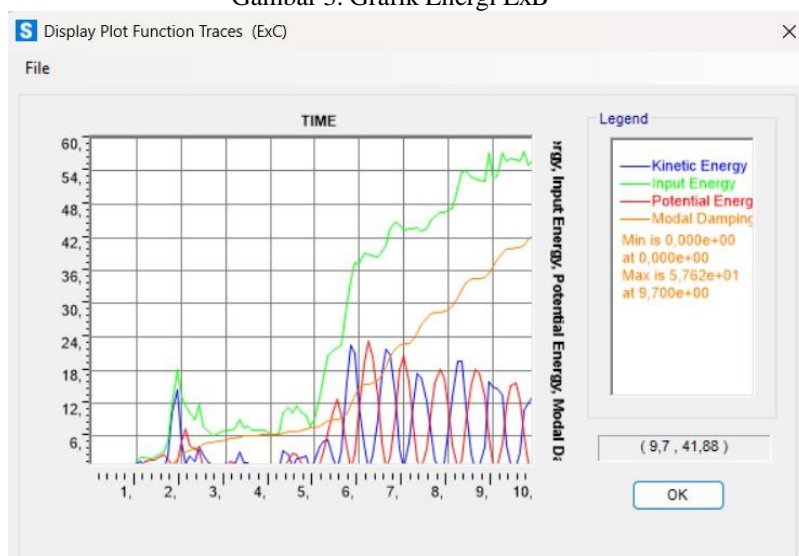
Gambar 2 hingga Gambar 6 memperlihatkan grafik function plot hasil keluaran SAP2000 untuk kasus ExA hingga ExE. Dari grafik tersebut terlihat bahwa pada tanah keras (ExA), kurva energi redaman (*damping energy*) meningkat lebih tajam pada awal waktu, menandakan penyerapan energi yang cepat oleh sistem redaman struktur. Sebaliknya, pada tanah lunak (ExE), kenaikan energi redaman berlangsung lebih lambat, namun kurva total energi menunjukkan penambahan energi berkelanjutan hingga akhir durasi gempa. Hal ini menunjukkan bahwa tanah lunak berperan sebagai peredam tambahan alami (*natural damping system*) melalui deformasi dasar fondasi.



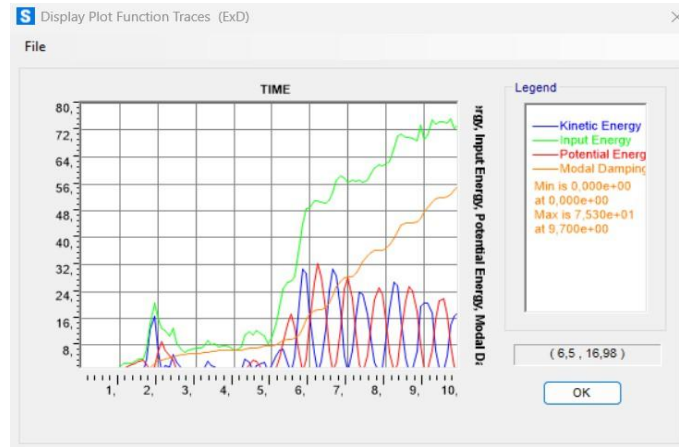
Gambar 2. Grafik Energi ExA



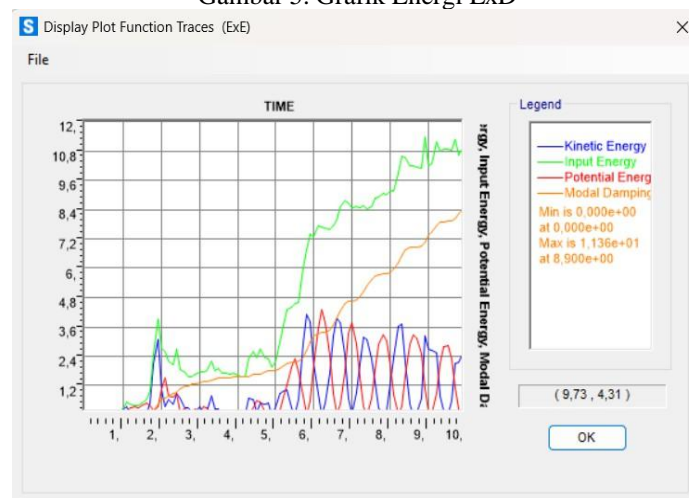
Gambar 3. Grafik Energi ExB



Gambar 4. Grafik Energi ExC



Gambar 5. Grafik Energi ExD



Gambar 6. Grafik Energi ExE

3.5. Ratio Energi Rendaman terhadap Energi Input Total

$$\eta_d = \frac{E_d}{E_{input}} \times 100\%$$

dengan:

E_d = energi redaman modal (kN-m)

E_{input} = energi masukan total (kN-m)

η_d = efisiensi redaman dalam persen (%)

Tabel 2. Rasio Energi Redaman (η_d) terhadap Energi Masukan Total

Kasus	Energi Masukan (kN·m)	Energi Redaman Modal (kN·m)	Rasio η_d (%)
ExA	8.835	6.6921	75.7
ExB	11.3645	8.5759	75.5
ExC	57.6183	43.5988	75.7
ExD	75.3041	56.8337	75.5
ExE	11.3645	8.5759	75.5
EyA	8.835	6.6921	75.7
EyB	11.3645	8.5759	75.5
EyC	57.6183	43.5988	75.7
EyD	75.3041	56.8337	75.5
EyE	11.3645	8.5759	75.5

Rata-rata efisiensi redaman struktur berdasarkan seluruh kasus analisis diperoleh sebesar **75,6%**. Nilai ini menunjukkan bahwa sekitar tiga perempat energi gempa yang masuk ke sistem berhasil diserap dan didisipasi oleh mekanisme redaman internal struktur. Konsistensi nilai η_d pada berbagai kondisi tanah memperlihatkan bahwa model redaman linier viskous memiliki perilaku disipasi yang relatif stabil. Meskipun demikian, total energi masukan dan energi redaman cenderung meningkat pada tanah dengan kekakuan menengah hingga lunak (kelas C dan D), mengindikasikan peningkatan kontribusi deformasi tanah terhadap proses disipasi energi.

Hasil ini menegaskan bahwa **redaman struktur bekerja secara efektif dan proporsional terhadap energi gempa yang diterima**, serta menunjukkan bahwa pendekatan berbasis energi memberikan pemahaman yang lebih mendalam terhadap mekanisme respons dinamik dibandingkan analisis berbasis simpangan atau gaya semata.

3.5 Implikasi Desain

Hasil ini memperlihatkan bahwa efisiensi redaman struktur sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah tempat bangunan berdiri. Penggunaan sistem redaman dengan parameter tetap pada berbagai jenis tanah dapat menyebabkan pergeseran efisiensi yang signifikan. Oleh karena itu, diperlukan kalibrasi parameter redaman berdasarkan karakteristik dinamik tanah agar energi gempa dapat didistribusikan secara optimal antara struktur dan fondasi. Analisis berbasis energi seperti ini terbukti lebih representatif dibandingkan pendekatan berbasis simpangan semata, karena mampu menggambarkan keseimbangan fisik antara energi masukan, penyimpanan, dan disipasi selama peristiwa gempa.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis *time-history* berbasis energi terhadap struktur gedung sepuluh lantai dengan sistem redaman linier viskous pada berbagai kondisi tanah menggunakan SAP2000, diperoleh beberapa kesimpulan penting sebagai berikut.

1. Distribusi energi sangat dipengaruhi oleh kekakuan tanah. Pada tanah keras (kelas A–B), energi redaman internal struktur mendominasi hingga 70–80% dari total energi masukan. Namun, seiring berkurangnya kekakuan tanah (kelas C–E), sebagian energi gempa beralih menjadi deformasi dasar fondasi sehingga terjadi *energy shift* dari struktur ke tanah.
2. Tanah kelas D menghasilkan energi total tertinggi dengan energi redaman modal mencapai 56,83 kN·m. Kondisi ini menunjukkan bahwa efek interaksi tanah–struktur (SSI) paling signifikan terjadi pada tanah berkekakuan menengah, di mana struktur dan tanah berkontribusi seimbang dalam menyerap energi gempa.
3. Arah pembebanan X dan Y memberikan respons energi yang hampir identik, menunjukkan bahwa model struktur bersifat simetris dan tidak menunjukkan perilaku torsi dominan. Hal ini mengindikasikan desain struktur yang seimbang secara dinamik.
4. Analisis berbasis energi memberikan pemahaman fisik yang lebih realistis dibandingkan pendekatan berbasis gaya atau simpangan semata. Melalui evaluasi komponen energi kinetik, regangan, dan redaman, mekanisme disipasi energi selama gempa dapat dipetakan secara kuantitatif.
5. Efisiensi sistem redaman bersifat spesifik terhadap kondisi tanah. Oleh karena itu, perancangan struktur dengan peredam harus mempertimbangkan karakteristik tanah lokal. Kalibrasi parameter redaman yang disesuaikan dengan kekakuan tanah dapat meningkatkan kinerja disipasi energi dan mengurangi risiko kerusakan struktural.

Secara keseluruhan, pendekatan analisis pergeseran energi ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan desain peredam yang lebih adaptif, efisien, dan berbasis kondisi geoteknik nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Arfiadi, Y. and Hadi, MNS. (2006). "Continuous bounded controller for active control of structures". *Computers and Structures*, Vol. 84, 798-807
- Boore, D. M., dan Atkinson, G. M. (2008). 'Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and

- 10.0 s'. Earthquake Spectra, Vol. 24(1), 99–138.
- Chopra, A. K. (2017). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. 5th Edition. Pearson Education, New Jersey.
- Dewobroto, W. (2005). *Aplikasi rekayasa konstruksi dengan Visual Basic 6.0 : analisis dan desain penampang beton bertulang sesuai SNI 03-2847-2002*. PT. Elex Media Komputindo, Jakarta
- Frans, R. dan Arfiadi, Y. (2015). “Judul Artikel Konferensi”. Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 9, Makassar, 7-8 Oktober 2016, 871-877
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, Mass
- Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Sarraf, M. And Bruneau, M. (1998). “Ductile seismic retrofit of steel deck-truss bridges, II: Design applications.”. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 124(11), 1263-1271
- Soong, T. T. and Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Sudjati, J. J., Tarigan, R. A., dan Tresna, I. B. M. (2015). Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 9, Makassar, 7-8 Oktober 2016, 887-892