Aplikasi Eigen dalam Memastikan Kestabilan Gedung Tinggi terhadap Gempa

Theo Kurniady | 13523154
Program Studi Teknik Informatika
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia
[1]*13523154@mahasiswa.itb.ac.id*, [2]*13523154@std.stei.ac.id* [3]*theokurniady12@gmail.com*

***Abstract*— Analisis eigenvalue dan eigenvector merupakan metode yang efektif untuk menghitung frekuensi alami suatu struktur, termasuk pada gedung tinggi seperti Taipei 101, yang sangat penting dalam penilaian kestabilan bangunan terhadap gempa. Setiap bangunan memiliki frekuensi alami yang mencerminkan pola getaran yang terjadi saat gedung tersebut terpapar gaya eksternal. Dengan menggunakan analisis ini, kita dapat mengidentifikasi frekuensi alami dan mode getaran yang terkait, serta memahami bagaimana struktur gedung merespons gaya dinamis seperti guncangan gempa. Dengan melakukan analisis terhadap frekuensi alami dan mode getaran, kita dapat merancang bangunan dengan lebih baik, menghindari resonansi yang merusak, dan meningkatkan daya tahan gedung terhadap guncangan, sehingga memastikan keselamatan penghuni dan keandalan struktur dalam jangka panjang.**

***Keywords*— analisis eigen, frekuensi alami, gedung tinggi, kestabilan gempa, mode getar, tuned mass damper.**

I. PENDAHULUAN

Gempa bumi adalah salah satu bencana alam yang paling merugikan suatu daerah dan juga penghuninya. Salah satu risiko dari gempa bumi adalah runtuhnya bangunan. Untuk menghindari hal tersebut, bangunan kini harus dibangun agar tahan gempa, terutama gedung tinggi.

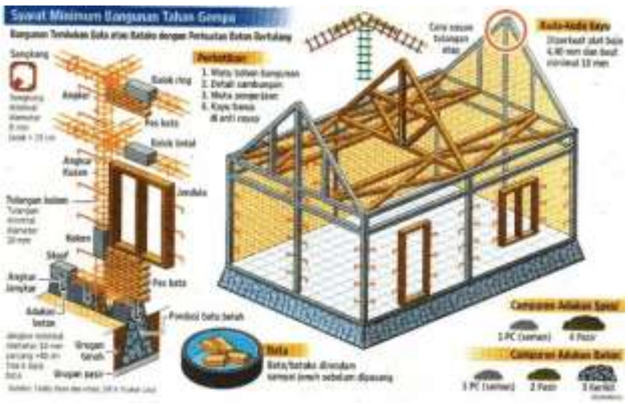
Gedung tinggi yang terletak di wilayah rawan gempa menghadapi tantangan besar dalam menjaga kestabilan dan keselamatan struktur selama guncangan gempa. Salah satu faktor penting yang menentukan stabilitas gedung adalah hubungan antara frekuensi alami gedung dan frekuensi dominan gempa. Ketika frekuensi alami gedung sebanding atau hampir sama dengan frekuensi dominan gempa, dapat terjadi fenomena resonansi, yang menyebabkan amplitudo getaran meningkat secara drastis dan berpotensi merusak struktur gedung. Oleh karena itu, sangat penting untuk menganalisis dan mengontrol frekuensi alami gedung agar tidak berada dalam zona resonansi, yang dapat mengakibatkan kerusakan parah.

Dalam konteks ini, analisis eigenvalue dan eigenvector menawarkan solusi yang efektif untuk menghitung frekuensi alami dan mode getaran gedung. Melalui analisis ini, kita dapat mengetahui bagaimana gedung bergetar pada berbagai frekuensi dan bentuk mode, serta mengidentifikasi potensi risiko resonansi. Untuk mengatasi masalah ini, teknik seperti Tuned Mass Damper (TMD) dapat diterapkan untuk menyesuaikan frekuensi alami gedung, menjauhkannya dari frekuensi dominan gempa dan meningkatkan stabilitas gedung terhadap guncangan. Pendekatan ini memungkinkan perancangan gedung tinggi yang lebih tahan terhadap gempa dan lebih aman bagi penghuninya.

II. TEORI DASAR

A. *Struktur Dinamis*

Struktur sebagai objek fleksibel dalam berbagai sistem rekayasa memiliki karakteristik dinamis yang khas, yang bergantung pada sifat material dan desainnya. Beberapa parameter seperti elastisitas, massa jenis material, serta volume dan penampang menentukan kekakuan dan inersia, yang pada gilirannya mempengaruhi karakteristik dinamis struktur tersebut. Perhatikan gambar di bawah.



Gambar di atas menunjukkan bahwa syarat agar bangunan tahan gempa dipengaruhi banyak faktor. Faktor-faktor tersebut adalah bahan bangunan, fondasi, pengukuran pembangunan, kualitas kayu anti-rayap, dan lainnya

Ketika struktur mengalami gangguan atau pembebanan dinamis, respons struktur tersebut akan berubah seiring waktu. Gangguan dan pembebanan ini bisa berasal dari kondisi operasi atau lingkungan tempat struktur berada, seperti pesawat yang terpengaruh oleh turbulensi udara, mobil yang terganggu oleh ketidakteraturan jalan, atau gedung yang terpapar angin atau gempa bumi.

Struktur gedung dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan gerakan suatu struktur fleksibel secara umum sebagai berikut.

$$[M]\{\ddot{z}\}+[C]\{\dot{z}\}+[K]\{z\}=\{F\}$$

- [M] adalah matriks massa, yang berisi informasi tentang distribusi massa di dalam struktur. Ini mencakup massa gedung itu sendiri, serta massa tambahan seperti massa dari elemen struktur atau beban dinamis.
- [C] adalah matriks redaman, yang menggambarkan bagaimana struktur meredam getaran, biasanya bergantung pada material dan geometri struktur.
- [K] adalah matriks kekakuan, yang menunjukkan sejauh mana struktur menahan deformasi terhadap gaya yang diberikan, bergantung pada kekuatan dan elastisitas bahan bangunan.
- {z}adalah vektor perpindahan yang menggambarkan posisi titik-titik dalam struktur selama getaran.
- {F} adalah gaya eksternal, seperti beban gempa atau angin, yang bekerja pada struktur.

B. Frekuensi Alami

Frekuensi Alami adalah suatu nilai frekuensi pada struktur yang bergetar secara alami jika benda mengalami gangguan. Nilai frekuensi alami dapat digunakan untuk menentukan bila struktur sedang beresonansi atau tidak. Ada beberapa faktor yang memengaruhi frekuensi alami, yaitu kekakuan (k) dan massa (m). Nilai frekuensi alami dalam rad/s dapat dihitung menggunakan rumus berikut.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- k adalah kekakuan sistem (dalam N/m), yang mengukur sejauh mana sistem tersebut dapat menahan deformasi.
- m adalah massa sistem (dalam Kg)

Selain rumus di atas, frekuensi alami juga dapat diperoleh dengan menghitung akar kuadrat dari nilai eigen.

$$\omega_n = \sqrt{\lambda_n}$$

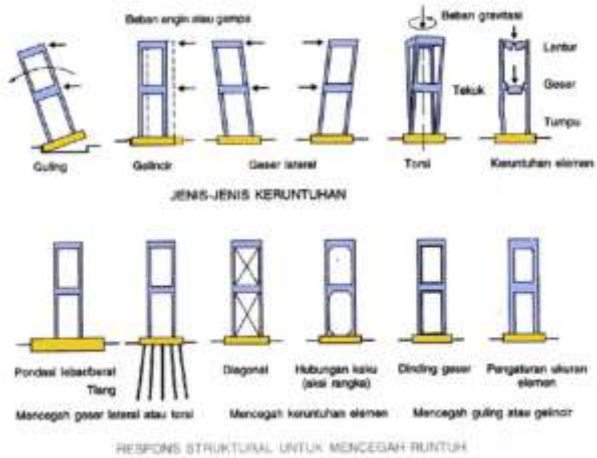
Frekuensi alami dalam rad/s dapat dikonversi menjadi nilai frekuensi dalam hertz dengan berikut.

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Untuk gedung tinggi, frekuensi alami yang rendah bisa sangat berisiko karena getaran dari angin atau gempa dapat menyebabkan respons struktural yang besar. Oleh karena itu, berbagai teknik rekayasa digunakan untuk memodifikasi atau menyesuaikan frekuensi alami gedung, termasuk penggunaan Tuned Mass Damper (TMD) untuk mengurangi dampak getaran yang disebabkan oleh gempa atau angin, seperti yang dilakukan pada gedung Taipei 101.

C. Mode Getaran

Mode getaran atau bentuk mode adalah pola atau konfigurasi spesifik di mana struktur akan bergetar pada frekuensi alaminya. Setiap frekuensi alami memiliki bentuk mode yang berbeda, yang menggambarkan bagaimana elemen-elemen dalam struktur bergerak relatif satu sama lain selama getaran.



Gambar diatas menunjukkan bahwa suatu gedung memiliki beberapa cara untuk runtuh atau bergeser. Pergerakan tersebut dapat diketahui dengan perhitungan mode getaran. Dari mode getaran, dapat diketahui arah dan seberapa besar amplitudo pergerakannya.

Pada struktur dengan lebih dari satu derajat kebebasan (seperti gedung tinggi), terdapat beberapa mode getaran, masing-masing terkait dengan frekuensi alami yang berbeda. Struktur bisa memiliki berbagai mode getaran tergantung pada kompleksitas dan ukuran sistem tersebut. Beberapa contoh mode adalah mode getaran di mana seluruh struktur bergerak bersama pada frekuensi terendah dan mode yang mana bagian atas struktur bergerak berbeda dengan bagian bawahnya dan frekuensinya lebih tinggi.

Bentuk mode diwakili oleh vektor eigen dalam analisis struktur dinamis, yang menggambarkan distribusi pergeseran atau perubahan posisi pada elemen-elemen struktur. Dalam analisis lebih lanjut, nilai eigen dari matriks massa dan kekakuan akan memberi informasi tentang frekuensi alami serta mode-mode getaran yang terkait.

Sebagai contoh, terdapat suatu vektor eigen $\mathrm{v} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.8 \\ 0.4 \end{bmatrix}$. Setiap elemen pada v merujuk pada lantai atau segmen dari gedung secara mengurut. Hal ini berarti segmen pertama bekerja sebagai dasar dari segmen berikutnya dan memiliki simpangan relatif terbesar (amplitudo sebesar 1). Segmen 2 memiliki 0.8x dari amplitudo segmen 1, yaitu 0.8x dari 1 dan masih dalam arah yang sama. Segmen 3 pun semakin kecil dengan 0.4x dari 1 dan masih dalam arah yang sama.

D. Nilai Eigen dan Vektor Eigen

Dalam aljabar linear, nilai eigen (λ) dan vektor eigen (v) adalah konsep penting yang digunakan untuk memahami sifat-sifat matriks dalam berbagai konteks, seperti transformasi linier, dinamika sistem, dan analisis struktur. Secara intuitif, vektor eigen adalah vektor yang arah transformasinya tidak berubah ketika matriks tertentu diterapkan, sementara nilai eigen adalah faktor skala yang menunjukkan seberapa besar vektor tersebut diperbesar atau diperkecil.

Hubungan antara matriks (A), vektor eigen (v), dan nilai eigen (λ) dinyatakan sebagai:

$$A \cdot \mathrm{v} = \lambda \cdot \mathrm{v}$$

- A adalah matriks persegi (n x n)
- v adalah vektor eigen
- λ adalah nilai eigen

Persamaan tersebut berarti bahwa transformasi linear yang diberikan oleh matriks A hanya mengubah panjang (dengan faktor λ) atau membalik arah vektor v, tanpa mengubah arah aslinya. Vektor v atau vektor eigen menunjukkan arah tertentu dalam ruang vektor di mana matriks A hanya memberikan perubahan skala, tanpa mengubah arah.

Untuk memperoleh nilai eigen, kita mencari solusi dari persamaan karakteristik yang diperoleh dari:

$$\det(\lambda \mathrm{I} - \mathrm{A}) = 0$$

- I adalah Matriks identitas (n×n)
- det adalah Determinan matriks

Setelah didapatkan solusi dari persamaan tersebut yang berupa nilai-nilai eigen, vektor eigen dapat diperoleh untuk setiap nilai eigen yang didapatkan dengan:

$$(\lambda \mathrm{I} - \mathrm{A})v = 0$$

Solusi non-nol dari sistem ini adalah vektor eigen yang sesuai dengan nilai eigen λ. Karena sistem ini homogen, solusinya tidak unik dan biasanya dinyatakan dalam bentuk kombinasi linier.

E. Matriks Kekakuan

Matriks kekakuan adalah salah satu konsep utama dalam analisis struktur, terutama dalam analisis dinamik dan statis. Matriks ini digunakan untuk menggambarkan hubungan antara gaya (force) dan perpindahan (displacement) dalam sistem mekanik atau struktural. Matriks kekakuan digunakan dalam metode elemen hingga (Finite Element Method, FEM), yang merupakan teknik numerik untuk menyelesaikan masalah teknik struktural, termal, dan fluida.

Secara matematis, hubungan antara gaya dan perpindahan dalam sistem struktural dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\{F\} = [K]\{u\}$$

Di mana:

- {F}: Vektor gaya (force vector) yang bekerja pada sistem.
- [K]: Matriks kekakuan, yang menggambarkan kekuatan struktur dalam menahan deformasi akibat gaya eksternal.
- {u}: Vektor perpindahan (displacement vector) yang menunjukkan perubahan posisi elemen struktur akibat gaya.

Matriks kekakuan [K] mencerminkan kekuatan material dan elemen struktural dalam menahan gaya eksternal. Matriks ini berisi koefisien-koefisien yang menunjukkan hubungan antara gaya yang diterapkan pada satu titik struktur dan perpindahan yang dihasilkan di titik tersebut atau titik lainnya.

Beberapa faktor yang memengaruhi nilai dalam matriks kekakuan adalah:

- Material Struktur: Modulus elastisitas (E) dan sifat material lainnya seperti kekuatan tarik dan kompresi.
- Geometri Struktur: Panjang elemen, luas penampang, dan orientasi elemen.
- Kondisi Batas: Penjepitan, tumpuan, atau kebebasan elemen struktur untuk bergerak.
- Koneksi Antar Elemen: Koneksi kaku, engsel, atau sambungan elastis memengaruhi distribusi kekakuan.

III. METODOLOGI

Dalam menentukan kestabilan suatu gedung terhadap gempa, diperlukan matriks M, yaitu matriks diagonal yang berisi massa tiap lantai dan matriks K, yaitu matriks kekakuan lantai. Untuk menyederhanakan matriks M menjadi matriks berukuran 3x3, gedung dibagi menjadi 3 sekmen sehingga setiap nilai pada diagonal berupa massa total dibagi 3. Untuk matriks kekakuan 3x3, digunakan matriks berikut.

$$K = \begin{bmatrix} 2k & -k & 0 \\ -k & 2k & -k \\ 0 & -k & k \end{bmatrix}$$

Kedua matriks digunakan dalam persamaan karakteristik eigen dalam konteks analisis dinamis struktur sebagai berikut.

$$\det(K - \lambda M) = 0$$

Melalui persamaan karakteristik tersebut, kita dapat memperoleh nilai eigen (λ). Dari sini, kita membutuhkan dua hal, yaitu frekuensi alami gedung dan mode getaran. Frekuensi alami dapat diperoleh dari persamaan berikut.

$$\omega = \sqrt{\frac{\lambda}{m}}$$

Perhitungan frekuensi alami dilakukan untuk setiap nilai eigen yang diperoleh. Setiap frekuensi alami dikonversi dari rad/s menjadi hertz (Hz).

$$\mathrm{f}_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$$

Frekuensi tersebut adalah frekuensi alami gedung. Frekuensi tersebut dapat dibandingkan dengan frekuensi dominan gempa. Bila frekuensi alami gedung dekat dengan frekuensi dominan gempa, maka akan lebih mudah mengalami resonansi, yang berarti akan lebih rawan terhadap gempa.

Untuk mengetahui pergerakan yang terjadi pada gedung ketika gempa pada frekuensi tersebut, dapat dicari mode bentukan. Mode bentukan dicari dengan perhitungan vektor eigen dengan nilai eigen yang telah diperoleh sebelumnya. Untuk setiap nilai eigen, rumus berikut berlaku.

$$(K - \lambda_n M)v_n = 0$$

Dengan rumus diatas, vektor eigen (v_n) dapat ditentukan. Vektor eigen tersebut melambangkan mode bentukan dari frekuensi alami yang sesuai. Setelah mendapatkan frekuensi alami dan mode bentukannya, frekuensi alami dapat dibandingkan dengan frekuensi gempa. Bila frekuensi alami mendekati frekuensi gempa, maka akan ada risiko resonansi yang dapat beralih ke kerusakan gedung.

IV. IMPLEMENTASI

Salah satu gedung tinggi yang terletak di daerah rawan gempa adalah Taipei 101. Taipei 101 terletak di Taipei, Taiwan, yang memiliki frekuensi dominan gempa 0.1 – 1.0 hz. Untuk mengimplementasikan metode ini, dibentuk matriks diagonal 3x3 terlebih dahulu yang berupa massa dari taipei 101.

$$\frac{massa\ total}{3} = \frac{7 \times 10^8}{3} = 2.33 \times 10^8\ kg$$

sehingga dapat dibentuk matriks berikut.

$$\mathrm{M} = \begin{bmatrix} 2.33 \times 10^8 & 0 & 0 \\ 0 & 2.33 \times 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 2.33 \times 10^8 \end{bmatrix}$$

Untuk memperoleh informasi kekakuan struktur gedung terhadap perubahan bentuk, dapat dibentuk matriks kekakuan K yang berisi informasi tersebut. Untuk menyederhanakan, kita anggap bahwa kekakuan setiap lantai struktur adalah konstan dan sama, yaitu 10^9 N/m sehingga diperoleh matriks kekakuan K sebagai berikut.

$$\mathrm{K} = \begin{bmatrix} 2k & -k & 0 \\ -k & 2k & -k \\ 0 & -k & k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \times 10^9 & -10^9 & 0 \\ -10^9 & 2 \times 10^9 & -10^9 \\ 0 & -10^9 & 10^9 \end{bmatrix}$$

Dalam konteks analisis dinamis struktur, dapat diperoleh persamaan karakteristik dengan tujuan sama dengan persamaan karakteristik eigen dalam umumnya, yaitu mencari nilai eigen. Oleh karena itu, nilai eigen diperoleh dari persamaan berikut.

$$\det(K - \lambda M) = 0$$

$$\det\left(\begin{bmatrix} 2 \times 10^9 & -10^9 & 0 \\ -10^9 & 2 \times 10^9 & -10^9 \\ 0 & -10^9 & 10^9 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 2.33 \times 10^8\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 2.33 \times 10^8\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 2.33 \times 10^8\lambda \end{bmatrix}\right) = 0$$

$$\det\left(\begin{bmatrix} 20 - 2.33\lambda & -10 & 0 \\ -10 & 20 - 2.33\lambda & -10 \\ 0 & -10 & 10 - 2.33\lambda \end{bmatrix} \times 10^8\right) = 0$$

$$-1.2649337 \times 10^{25}\lambda^3 + 2.71445 \times 10^{26}\lambda^2 - 1.398 \times 10^{27}\lambda + 10^{27} = 0$$

Dari persamaan diatas, nilai eigen yang diperoleh ada 3, yaitu sebagai berikut.

$$\lambda_1 = 0.8501$$
$$\lambda_2 = 6.67336$$
$$\lambda_3 = 13.9355$$

Setelah memperoleh nilai eigen, kita dapat mencari frekuensi alami dari gedung. Frekuensi alami dapat diperoleh dengan menghitung akar kuadrat dari nilai eigen seperti berikut.

$$\omega_1 = \sqrt{0.8501} = 0.922\ rad/s$$
$$\omega_2 = \sqrt{6.67336} = 2.583\ rad/s$$
$$\omega_3 = \sqrt{13.9355 = 3.732}\ rad/s$$

Frekuensi alami (rad/s) yang telah diperoleh dapat dikonversikan ke dalam bentuk hertz dengan berikut.

$$\mathrm{f}_1 = \frac{0.922}{2\pi} = 0.147\ Hz$$
$$\mathrm{f}_2 = \frac{2.583}{2\pi} = 0.411\ Hz$$
$$\mathrm{f}_3 = \frac{3.732}{2\pi} = 0.594\ Hz$$

Setelah mendapatkan frekuensi alami dari gedung, kita cari mode getaran untuk setiap nilai eigen. Dengan cara serupa dengan mencari vektor eigen dalam konteks analisis dinamis struktur, dapat diperoleh vektor eigen sebagai berikut.

Untuk λ_1,

$$(K - \lambda_1 M)v_1 = 0$$

$$\left(\begin{bmatrix} 2\times 10^9 & -10^9 & 0 \\ -10^9 & 2\times 10^9 & -10^9 \\ 0 & -10^9 & 10^9 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.980733\times 10^8 & 0 & 0 \\ 0 & 1.980733\times 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 1.980733\times 10^8 \end{bmatrix}\right) v_1 = 0$$

$$v_2 = \begin{bmatrix} 0.32798528 \\ 0.59100905 \\ 0.73697623 \end{bmatrix}$$

Untuk λ_2,

$$(K - \lambda_2 M)v_2 = 0$$

$$\left(\begin{bmatrix} 2\times 10^9 & -10^9 & 0 \\ -10^9 & 2\times 10^9 & -10^9 \\ 0 & -10^9 & 10^9 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 15.549\times 10^8 & 0 & 0 \\ 0 & 15.549\times 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 15.549\times 10^8 \end{bmatrix}\right) v_2 = 0$$

$$v_2 = \begin{bmatrix} -0.73697623 \\ -0.32798528 \\ 0.59100905 \end{bmatrix}$$

Untuk λ_3,

$$(K - \lambda_3 M)v_3 = 0$$

$$\left(\begin{bmatrix} 2\times 10^9 & -10^9 & 0 \\ -10^9 & 2\times 10^9 & -10^9 \\ 0 & -10^9 & 10^9 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 32.469\times 10^8 & 0 & 0 \\ 0 & 32.469\times 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 32.469\times 10^8 \end{bmatrix}\right) v_3 = 0$$

$$v_3 = \begin{bmatrix} -0.59100905 \\ 0.73697623 \\ -0.32798528 \end{bmatrix}$$

Berikut adalah program python yang dapat digunakan untuk menghitung frekuensi dan mode bentukan.

```python
import numpy as np

M = np.array([[2.33e8, 0, 0],
              [0, 2.33e8, 0],
              [0, 0, 2.33e8]])

K = np.array([[2e9, -1e9, 0],
              [-1e9, 2e9, -1e9],
              [0, -1e9, 1e9]])

eigenvalues, eigenvectors = np.linalg.eig(np.linalg.inv(M) @ K)

frequencies = np.sqrt(eigenvalues) / (2 * np.pi)

filtered_indices = (frequencies >= 0.5) & (frequencies <= 5)
filtered_frequencies = frequencies[filtered_indices]
filtered_mode_shapes = eigenvectors[:, filtered_indices]

print("Eigenvalues (λ):", eigenvalues)
print("Eigenvectors (Mode Shapes):")
print(eigenvectors)
print("-" * 50)
print("Frekuensi Alami dalam rentang 0.5 - 5 Hz:")

for i, freq in enumerate(filtered_frequencies):
    print(f"Frekuensi: {freq:.2f} Hz")
    print("Mode Bentukan (Eigenvector):")
    print(filtered_mode_shapes[:, i])
    print("-" * 50)
```

Program di atas menghitung frekuensi alami dan mode getaran dengan matriks M berupa matriks massa gedung dan matriks K berupa matriks kekakuan. Lalu program juga meng-filter frekuensi yang masuk ke dalam rentang frekuensi gempa.

V. Hasil dan Diskusi

Perhitungan ini dilakukan untuk memastikan kestabilan gedung Taipei 101 tanpa melibatkan keberadaan TMD (Turned Mass Damper). Untuk menentukan bila gedung tahan terhadap gempa, dapat diperhatikan dari perbandingan frekuensi alami gedung terhadap frekuensi gempa. Dalam hal ini, frekuensi gempa yang digunakan adalah frekuensi dominan gempa Taipei dari data gempa yang pernah melanda sebelumnya, seperti gempa Chichi yang berkisar 0.5–1.0 Hz. Hal ini didukung keberadaan tanah lunak di beberapa daerah dapat menurunkan frekuensi dominan menjadi lebih rendah dibandingkan wilayah berbatu. Dalam penelitian ini, dibatasi untuk gempa LF (low frequency) saja sehingga aktivitas gempa dibatasi untuk gempa yang memiliki frekuensi 0.5–5.0 Hz. Untuk diskusi ini, akan digunakan frekuensi dominan gempa sebesar 0.5–5.0 Hz karena rentangnya yang lebih luas. Bila dibandingkan dengan frekuensi alami gedung yang telah didapat, yaitu $f_1 = 0.147\ Hz$, $f_2 = 0.411\ Hz$, dan $f_3 = 0.594\ Hz$, dapat dilihat bahwa f_3 masuk ke dalam rentang tersebut. Ini menunjukkan kemungkinan adanya resonansi parsial pada mode getaran ke-3, yang dapat menyebabkan pergerakan signifikan pada bagian tertentu dari gedung.

Dari mode getaran ke-3 atau $v_3 = \begin{bmatrix} -0.59100905 \\ 0.73697623 \\ -0.32798528 \end{bmatrix}$, dapat dilihat pergerakan yang berbeda-beda dari ketiga segmen gedung. Segmen gedung dimulai dari bawah ke atas. Segmen pertama bergerak dengan amplitudo -0.591 searah dengan segmen ketiga yang bergerak dengan amplitudo -0.328. Segmen kedua berbalikan arah dengan amplitudo 0.737. Karena amplitudo perpindahan relatif dari segmen ketiga lebih kecil dibandingkan yang lainnya, bagian atas gedung mungkin mengalami getaran yang lebih kecil dibandingkan dengan bagian tengah (segmen 2). Adanya perbedaan arah pergerakan di antara segmen 1 dan 2 menciptakan gaya internal tambahan. Mode ini menghasilkan deformasi dengan pola lebih rumit, berpotensi menciptakan tegangan tambahan pada sambungan antar-segmen.

VI. Konklusi

Dari penelitian ini, kami dapat mengetahui bahwa nilai eigen dan vektor eigen memiliki berbagai macam aplikasi dan salah satunya adalah memeriksa kestabilan gedung tinggi terhadap gempa. Salah satu contohnya adalah memeriksa kestabilan gedung Taipei 101 tanpa TMD (Turned Mass Damper) terhadap gempa di daerahnya. Dari perhitungan, kami dapatkan kekurangan gedung Taipei 101 dalam menghadapi mode ketiga dengan frekuensi alami gedung sebesar 0.594 Hz. Frekuensi tersebut termasuk dalam rentang frekuensi dominan gempa LF (low frequency) yaitu 0.5 – 5.0 Hz sehingga ada risiko resonansi gedung dengan gempa yang mampu mengakibatkan kerusakan. Pada mode ketiga, didapatkan bahwa segmen pertama dan ketiga gedung bergerak pada arah yang sama dan segmen kedua atau segmen tengah bergerak sebaliknya. Perbedaan arah gerakan ini menciptakan gaya internal tambahan. Segmen 3 atau bagian atas gedung akan mengalami kerusakan minimum karena memiliki amplitudo terkecil. Dengan perhitungan ini, dapat dilihat bahwa gedung tinggi seperti Taipei 101 sebelum menggunakan TMD masih ada kekurangan dalam menghadapi bencana gempa.

VII. LAMPIRAN

Link Program : [Stahlynx/ProgramMakalahAlgeo]

VIII. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada dosen pengampu mata kuliah Aljabar Linear dan Geometri Kelas 3, Bapak Judhi Santoso dan Bapak Arrival Dwi Sentosa dari Institut Teknologi Bandung, atas penyampaian materi yang jelas dan terstruktur. Penjelasan yang mendalam dan metode pengajaran yang interaktif sangat membantu penulis dalam memahami konsep-konsep yang diajarkan dengan baik.

Selain itu, penulis juga ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada Bapak Rinaldi Munir atas penugasan pembuatan makalah ini. Penugasan tersebut memberikan kesempatan berharga bagi penulis untuk mendalami aplikasi praktis dari materi yang telah dipelajari di kelas. Melalui tugas ini, penulis tidak hanya memahami teori secara konseptual, tetapi juga mampu menerapkannya dalam konteks yang relevan dengan permasalahan nyata.

REFERENSI

[1] R. Munir, "Nilai Eigen dan Vektor Eigen". Nilai Eigen dan Vektor Eigen (Bagian 1)

[2] L. Gunawan, "Pengembangan Kemampuan Analisis Dinamika Benda Fleksibel Untuk Kemandirian Rekayasa Di Indonesia," 2024. Ebook-Prof.-Leonardo-Gunawan-Pengembangan-Kemampuan-Analisis-Dinamika-Benda-Fleksibel-untuk-Mendukung-Kemandirian-Rekayasa-di-Indonesia.pdf

[3] Testindo. (n.d.). Mengenal frekuensi alami (natural frequency). *Mengenal Frekuensi Alami (Natural Frequency) - TESTINDO.CO.ID*

[4] Council on Tall Buildings and Urban Habitat. (n.d.). *Taipei 101 skyscraper facts*. The SkyscraperCenter.

[5] Cesca, S., and Dahm, T. (2008). A frequency domain inversion code to retrieve time-dependent parameters of very long period volcanic sources. Comput. Geosci. 34, 235–246.

[6] Atlas Obscura. (n.d.). *Tuned mass damper of Taipei 101*. Atlas Obscura. https://www.atlasobscura.com/places/tuned-mass-damper-of-taipei-101

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 2 Januari 2025

Theo Kurniady | 13523154