

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Umum

Dalam kehidupan sehari-hari manusia sering merasakan suatu getaran. Suatu benda dapat bergetar apabila mendapatkan suatu energi yang kemudian diteruskan sampai ke benda yang bersangkutan. Meskipun tidak termasuk kejadian dalam kehidupan sehari-hari, gempa bumi juga dapat menimbulkan suatu getaran. Rusaknya struktur batuan pada saat terjadinya gempa bumi menghasilkan energi mekanik yang kemudian berubah menjadi energi gelombang yang dapat membuat batuan disekitarnya bergetar. Getaran tersebut selanjutnya diteruskan oleh tanah sampai pada permukaan tanah yang akan mengakibatkan bangunan yang berada di atasnya ikut bergetar.

Terdapat beberapa jenis beban dalam perencanaan struktur yaitu beban hidup, beban mati, beban angin dan juga beban gempa bumi. Tidak semua perencanaan bangunan atau analisa struktur memperhitungkan beban gempa, namun apabila struktur yang dianalisis berada pada suatu lokasi dimana gempa bumi dapat terjadi, maka analisa terhadap beban gempa harus dilakukan. Besaran tingkatan pembebanan suatu gempa pada setiap wilayah berbeda, dipengaruhi oleh geologi dan seismotektonik pada wilayah tersebut.

Kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa bumi dapat diantisipasi dengan cara konvensional maupun secara teknologi. Pada masa sekarang, para ahli telah lebih banyak menggunakan sistem *seismic devices*.

Cara kerja *seismic devices* adalah mengubah kekakuan, damping dan menambahkan massa kedalam struktur. Salah satu sistem *seismic device* adalah dengan menggunakan *curved damper*. *Curved damper* bekerja untuk meningkatkan kekuatan struktur, kekakuan dan mendisipasi energi. Besarnya energi yang didisipasi oleh *damper* merupakan hubungan gaya dan juga simpangan yang akan berbentuk loop jajaran genjang atau bisa juga disebut *hysteristic loop*.

Suatu bangunan atau struktur harus dirancang dapat menahan beban horizontal dari gaya gempa agar bangunan tersebut memiliki tingkat keamanan yang memadai. Menurut (Paulay, 1988), ada tiga tingkat layanan suatu struktur bangunan yang menerima suatu gaya gempa, yaitu:

1. *Serviceability*

Pada suatu perencanaan struktur harus memperhatikan kontrol dan batasan simpangan (*drift*) agar mampu dalam menahan gaya gempa dengan intensitas percepatan tanah ringan agar semua fungsi dan aktivitas didalam bangunan maupun perlengkapan tidak terganggu.

2. Kontrol kerusakan

Komponen struktur ataupun non-struktur diharapkan masih dalam batas elastis apabila dikenai gempa dengan periode ulang yang sama dengan masa rencana struktur bangunan dan mampu menahan gempa dengan percepatan tanah yang kecil.

3. *Survival*

Suatu struktur direncanakan untuk dapat bertahan walaupun dengan tingkat kerusakan parah tanpa mengalami keruntuhan (*collapse*) dalam menahan apabila gempa yang kuat terjadi dalam umur masa rencana bangunan untuk mengurangi adanya korban dalam kejadian ini.

Getaran horizontal yang dihasilkan oleh gempa bumi akan sangat merusak struktur karena menimbulkan gaya reaksi yang besar, terlebih lagi pada lokasi puncak bangunan dapat mengalami perbesaran hingga dua kalinya.

Dibutuhkan cara serta solusi yang tepat dalam merencanakan suatu bangunan pada daerah yang rawan terjadinya gempa bumi untuk dapat meminimalisir korban jiwa maupun harta benda. Salah satu cara dalam menangani hal tersebut adalah menggunakan suatu teknologi yang akan kita bahas pada tugas akhir ini yaitu penggunaan *curve damper*.

2.2. Karakteristik Struktur Bangunan

Terdapat tiga bagian utama dalam persamaan diferensial suatu struktur yaitu massa, kekakuan dan redaman. Dari ketiga bagian utama tersebut,

hanya kekakuan struktur yang digunakan pada suatu problem dan yang lainnya tidak.

2.2.1. Massa

Banyaknya derajat kebebasan pada suatu struktur yang kontinu dapat ditentukan oleh banyaknya massa pada struktur bangunan karena banyaknya persamaan diferensial yang ada.

Umumnya untuk mendeskripsikan massa struktur terdapat dua permodelan pokok, yaitu

1. *Model lumped mass*

Dalam model ini, massa terintegrasi dalam posisi atau sambungan atau join tertentu, dimana setiap join hanya memiliki satu derajat kebebasan atau *degree of freedom*, dan elemen strukturalnya adalah matriks dengan konten diagonal saja.

(Clough & Penzien, 1993) menyatakan bahwa gaya inersia hanya bekerja pada massa, sehingga penampangnya nol. Dalam model ini, massa dianggap pada titik tak berdimensi, sehingga tidak ada rotasi (*rotation degree of freedom*) dalam model ini, tetapi jika titik ini memiliki ukuran fisik, maka momen inersia dapat dihitung.

Karena hanya ada satu derajat kebebasan disetiap tingkatnya, jumlah derajat kebebasan di gedung bertingkat juga dapat ditentukan oleh jumlah tingkat di gedung tersebut.

2. *Model consistent mass matrix*

Dalam model ini, elemen struktur berdisplacement dengan cara tertentu sesuai dengan fungsinya. Model ini mempertimbangkan tiga derajat kebebasan pada setiap titik, seperti horizontal, vertikal, dan rotasi, ini menghasilkan matriks bukan sama dengan nol (*full-populated consistent matrix*) diluar diagonal. Dalam model ini, matriks massa adalah diagonal dan tidak ada rangkaian massa. Jika tidak, momen inersia massa akibat perpindahan dan rotasi harus dipertimbangkan.

2.2.2. Kekakuan

Kekakuan, selain massa bangunan, merupakan sifat dinamis yang sangat penting dari struktur bangunan. Ada hubungan unik antara massa dan kekakuan suatu struktur, yang disebut karakteristik diri atau *eigenproblem*. Hubungan ini menentukan nilai frekuensi sudut ω dan periode getar T . kedua nilai ini merupakan parameter yang sangat penting dan berpengaruh besar terhadap respon dinamik struktur.

Pada prinsip bangunan geser (*shear building*) balok dianggap horizontal di lantai baik sebelum maupun sesudah adanya getaran. Adanya pelat yang menempel kuat pada balok dapat membantu mencegah balok terlalu kaku. Karena prinsip desain bangunan tahan gempa, diinginkan bahwa kolom lebih kuat. Namun, hubungan ini tidak terlalu sebanding dengan kekakuannya. Prinsip struktur bangunan geser memungkinkan pemakaian *lumped mass*, yang memungkinkan menghitung kekakuan setiap kolom berdasarkan persamaan yang ada.

2.2.3. Redaman

Redaman adalah peristiwa disipasi energi struktural yang dapat dikarenakan oleh berbagai penyebab. Penyebab tersebut antara lain pelepasan energi akibat gesekan antarmolekul pada material, pelepasan energi akibat gesekan antara konektor dengan system pendukung, dan pelepasan energi akibat gesekan dengan udara. Dalam reaksi inelastic, adanya sendi plastis juga menyebabkan pelepasan energi. Redaman memiliki kemampuan untuk melepaskan energi yang membuat struktur kurang reaktif. Ada banyak jenis peredam yang umum digunakan berikut ini akan dijelaskan pada sub-bab berikutnya.

2.2.3.1. Bantalan Karet Tahan Gempa (*Seismic Bearing*)

Seismic Rubber Bearing Pads adalah gasket karet yang digunakan untuk melindungi bangunan dari gempa bumi dan dikenal sebagai *base isolation*. Penggunaan *base isolation* bukan untuk memperkuat struktur bangunan, tetapi untuk mengurangi gaya gempa yang bekerja pada bangunan

tersebut. Bantalan karet padat dibuat dengan mengurangi getaran *seismic* horizontal dan memungkinkan bangunan bergerak bebas tanpa tertahan oleh pondasi saat terjadi gempa. Karena karet alam memiliki fleksibilitas untuk mengurangi daya reaksi hingga 70%. Bantalan dipasang di baris antara pondasi dan bangunan. Digunakan untuk mengurangi getaran gempa dengan karet alam, pelat baja digunakan untuk meningkatkan kekakuan bantalan karet. Sehingga penurunan gedung saat diatas bantalan karet tidak besar.

2.2.3.2. Lock Up Device (LUD)

Shock Transmission Unit (STU) atau lebih sering disebut *Lock-Up Device* (LUD), adalah perangkat yang dipasang untuk menghubungkan unit-unit struktural yang terpisah, menahan pergerakan struktur sambil menimbulkan dampak gaya eksternal antara struktur yang terhubung. *Lock-Up Device* dapat diterapkan untuk memperkuat struktur jembatan ketika frekuensi, kecepatan dan berat kendaraan yang lewat melebihi kriteria desain asli dari struktur tersebut. Salah satu ujungnya terhubung ke mekanisme dan ujung lainnya terhubung ke piston di dalam silinder. Pendingin yang terdapat dalam silinder adalah formulasi senyawa silikon yang dirancang khusus untuk mencapai kinerja alat dalam proyek tertentu. Silikon yang digunakan adalah *reverse thixotropic*. Silikon dapat bocor dari katup dan celah antara piston dan dinding silinder selama perubahan suhu dalam struktur atau selama gerakan lambat yang disebabkan oleh kontraksi dan geser beton yang terjadi seiring waktu. Sesuaikan jarak yang diperlukan antara piston dan dinding silinder. Dinding silinder menawarkan karakteristik yang berbeda. Karena beban mendadak, batang penghubung berakselerasi berkat senyawa silikon di dalam silinder. Akselerasi yang cepat membuat katup tetap tertutup, dimana silikon tidak bisa lepas dari piston. Pada titik ini, perangkat akan terkunci selama 0,5 detik.

2.2.3.3. Fluid Viscous Damping (FVD)

Fluid viscous damper (FVD) adalah perangkat peredam tambahan yang digunakan untuk mengurangi gaya dinamis yang bekerja pada struktur seperti beban gempa, beban angin, beban getaran mesin, dan lain-lain, dengan mereduksi tegangan serta defleksi yang menghasilkan energi kinetik. FVD mengubah energi kinetik tersebut menjadi energi panas yang kemudian akan hilang di udara.

Jika piston FVD tertekan, fluida mengalir dari Chamber 2 (Ruang 2) ke Chamber 1 (Ruang 1), sebaliknya jika piston FVD tertarik, maka fluida mengalir dari Chamber 1 ke Chamber 2. Perbedaan tekanan yang besar akan dihasilkan sebelum dan sesudah menciptakan gaya hambat.

2.2.3.4. High Damping Device (HiDAM)

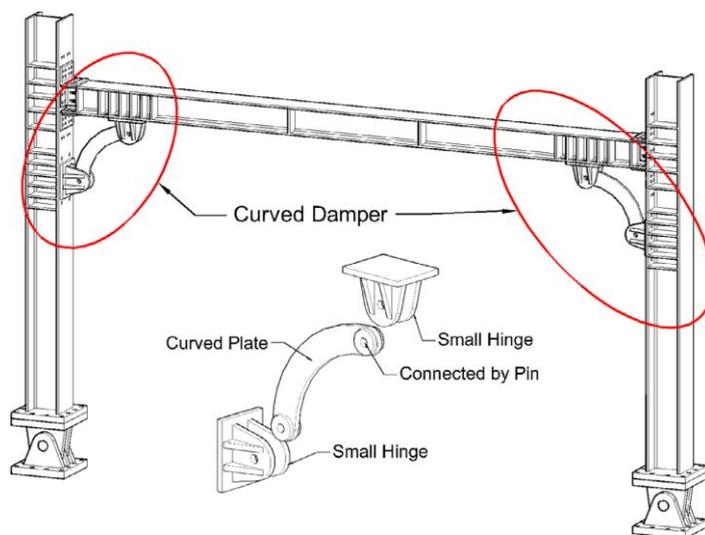
High damping device adalah perangkat redaman tinggi tipe silinder hidrolis di mana bagian silinder atau bagian dari batang piston terhubung ke rangka struktural dan bagian yang tersisa terhubung ke perangkat kontrol seismik terintegrasi dengan rangka. Ini terhubung ke ruang hidrolis di sisi berlawanan dari piston melalui piston. Bagian ini dilengkapi dengan katup kontrol tekanan yang mengontrol aliran oli di antara ruang hidrolis. Selain itu, sistem akumulator menyediakan jalan pintas bagi oli yang mengalir di antara silinder hidrolis dan mengatur oli kejut. Sebuah katup Pelepas tekanan disediakan secara paralel dengan katup pengatur tekanan untuk memberikan faktor redaman variabel yang melindungi peredam kejut dari kelebihan beban akibat dampak seismik yang berlebihan.

Prinsip pengoperasian HiDAM hampir sama dengan FVD. Artinya, kedua tersebut menggunakan prinsip viskositas untuk menghasilkan gaya redaman. Mekanisme aksi ini mirip dengan suspensi mobil dan peredam kejut dan digunakan untuk mengatur pergerakan pegas pada posisi turun. Kecepatan stroke menjadi nol dan kemudian berbalik, sehingga menjadi nol pada defleksi maksimum. Ketika kolom kembali ke posisi semula, kecepatan operasi maksimum atau gaya redaman maksimum, dan pada

posisi normal kolom, tegangan yang diterapkan pada kolom adalah yang terendah. Menurut hasil penelitian peredam kejut HiDAM, gaya redaman yang dibutuhkan oleh beban kendaraan dan beban impact relatif kecil dibandingkan dengan gaya yang dibawa oleh pegas, dan tingkat redaman mekanis berkurang 10% sampai 20% dengan HiDAM. Penting untuk mengurangi respons struktural terhadap kerusakan bangunan dan memenuhi standar seismik tradisional Jepang.

2.2.3.5. *Curved Damper*

Curved damper adalah desain *brace* baru yang digunakan untuk memperkuat struktur portal dalam menahan *displacement*. *Curved damper* adalah elemen struktural yang terbuat dari baja yang didesain melengkung dan kemudian ditempatkan pada balok ke daerah kolom. *Curved damper* digunakan untuk meningkatkan kinerja struktur portal. Karena kemampuan dalam menahan *displacement* besar dan disipasi energi yang signifikan, *curved damper* dapat diterapkan pada desain struktur tahan gempa. Penggunaan *curved damper* dapat dilihat dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Desain Penggunaan *Curved Damper*
(Sumber :H.-L. Hsu, 2017)

2.2.4. Analisis Redaman Struktural Internal

Redaman gerak osilasi pada struktur dan formasi geologi disebabkan oleh berbagai proses fisik. Sebagian besar dari proses ini dapat diklasifikasikan sebagai internal, eksternal atau redaman radiasi. Redaman struktural internal mencakup damping material yang tepat, gesekan kolom di sambungan dan pembentukan microcracks pada beton dan semua yang terkait dengan regangan dinamis (perpindahan relatif). Redaman eksternal disebabkan oleh gesekan angin (*Aerodynamic damping*) dan gaya hambat lekat (*viscous drag forces*). Redaman radiasi muncul dari disipasi energi melalui struktur pendukung dan ke tanah sekitarnya. Jika struktur pendukung kaku dibandingkan struktur yang dipertimbangkan, redaman radiasi mungkin diabaikan. Jadi, tidak jarang ditemukan bahwa efek dominan adalah suatu bentuk redaman internal. Prediksi redaman dalam sistem nyata dikaitkan dengan banyak ketidakpastian karena tidak seperti massa ada sifat kekakuan suatu struktur, redaman tidak didasarkan pada fenomena fisik sederhana. Namun, sebagian besar struktur dirancang untuk merespons rentang elastis dan sedikit teredam : tingkat redaman tipikal, diukur sebagai persentase redaman kritis, berkisar antara 2 hingga 4 persen untuk struktur baja, dan 4 hingga 7 persen untuk struktur beton bertulang. Hal ini menyebabkan seringnya penggunaan model perkiraan untuk menyertakan efek redaman.

2.2.4.1. Rayleigh Damping

Rayleigh damping banyak digunakan untuk memodelkan redaman struktural internal. Dimana Redaman Rayleigh merupakan salah satu yang paling populer dimana analisis seismiknya mempertahankan mode alami sistem yang tidak diredam. Rayleigh damping biasanya digunakan untuk menyatakan sumber disipasi energi dalam analisis struktur yang menanggapi beban dinamis seperti beban gempa. Penggunaan Rayleigh Damping untuk analisis seismik melibatkan bagian proporsional massa dan bagian proporsional kekakuan yang menggunakan kekakuan linier awal matriks struktur. Adapun rumus Rayleigh Damping sebagai berikut :

$$C = \mu M + \lambda K \quad (2.1)$$

Dimana :

μ (miu) = adalah koefisien massa redaman Rayleigh proporsional

λ (lamda) = adalah koefisien kekakuan redaman Rayleigh proporsional

M = adalah matriks massa struktural sistem

K = matriks kekakuan struktural sistem

Pada Rayleigh damping terdapat rasio redaman yang dicapai bervariasi dengan frekuensi respons. Suku proporsional kekakuan memberikan kontribusi redaman yang berbanding lurus dengan frekuensi respon dan istilah proporsional massa berkontribusi redaman yang berbanding terbalik dengan frekuensi respon.

2.3. Simpangan (*Drift*) Akibat Gaya Gempa

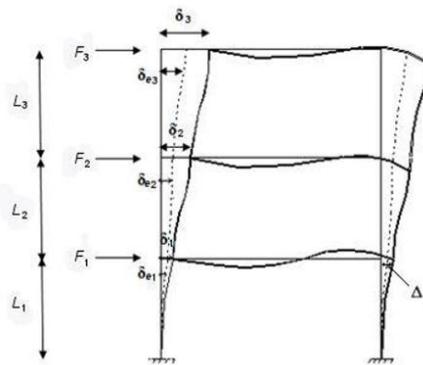
Simpangan (*drift*) adalah perpindahan horizontal relatif dalam setiap lantai atau lantai dua dari bangunan yang berdekatan atau deviasi horizontal dari satu lantai ke lantai lainnya (*horizontal story to story deflection*).

Menurut (Naeim, 1989) berikut merupakan bagian penting dalam perencanaan:

1. Stabilitas struktural (*structural stability*)
2. Kesempurnaan arsitektural (*architectural integrity*) dan potensi kerusakan berbagai komponen non-struktural
3. Kenyamanan manusia (*human comfort*), selama dan setelah gempa bangunan tersebut mengalami gerakan seismik

Demikian pula, (White, 1987) berpendapat bahwa desain gedung pencakar langit selalu dipengaruhi oleh pertimbangan defleksi dan bukan resistensi terhadap titik-titik fundamental berbasis tanah. Perbedaan antara dua tingkat dan perbandingan ketinggian setiap tingkat tidak boleh melebihi 0,005 atau 2cm. Tidak mempengaruhi kenyamanan penghuni bangunan dan mengurangi momen sekunder akibat penyimpangan garis aksi gaya aksial kolom.

Berdasarkan SNI 1726:2019, penentuan deviasi antara tingkat desain harus dihitung sebagai selisih antara deviasi centroid di atas dan dibawah tingkat yang dipertimbangkan (lihat Gambar 2.2). Jika pusat-pusat massa tidak sejajar secara vertikal, perpindahan di bagian bawah tingkat dapat dihitung berdasarkan proyeksi vertikal dari pusat tingkat atas. Desain gaya seismik yang ditentukan sebagai nol tanpa batas pelepas tegangan.



Gambar 2.2. Penentuan simpangan antar tingkat

Tingkat 3

- F_3 = gaya gempa desain tingkat kekuatan
- δ_{e3} = perpindahan elastic yang dihitung akibat gaya gempa desain tingkat kekuatan
- δ_3 = $C_d \delta_{e3} / I_e$ = perpindahan yang diperbesar
- δ_{e3} = $(\delta_{e3} - \delta_{e2}) C_d / I_E \leq \Delta_a$

Tingkat 2

- F_2 = gaya gempa desain tingkat kekuatan
- δ_{e2} = perpindahan elastic yang dihitung akibat gaya gempa desain tingkat kekuatan
- δ_2 = $C_d \delta_{e2} / I_e$ = perpindahan yang diperbesar
- δ_{e2} = $(\delta_{e2} - \delta_{e1}) C_d / I_E \leq \Delta_a$

Tingkat 1

- F_1 = gaya gempa desain tingkat kekuatan
- δ_{e1} = perpindahan elastic yang dihitung akibat gaya gempa desain tingkat kekuatan
- δ_1 = $C_d \delta_{e1} / I_e$ = perpindahan yang diperbesar
- Δ_1 = $\delta_1 \leq \Delta_a$
- Δ_1 = simpangan antar tingkat

Δ_i/L_i = Rasio simpangan antar tingkat
 δ_3 = Perpindahan total

2.4. Derajat Kebebasan (*Degree Of Freedom, DOF*)

Derajat kebebasan (*degree of freedom*) adalah derajat independensi yang diperlukan untuk mengetahui posisi sistem pada saat tertentu. Perpindahan massa pada saat tertentu hanya memiliki posisi atau koordinat tertentu menurut tanda negatif dan positif. Pada kondisi tersebut, simpangan pada massa saat waktu t dinyatakan dalam koordinat tunggal yaitu $U(t)$. Struktur ini disebut derajat kebebasan tunggal (*SDOF system*).

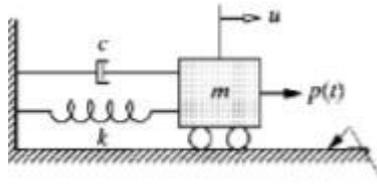
Dalam SDOF atau model sistem 1 derajat kebebasan, setiap massa m , kekakuan k , redaman c , dan gaya luar diasumsikan bergantung pada faktor fisik. Struktur dengan n -derajat kebebasan atau struktur dengan beberapa derajat kebebasan disebut *multy degree of freedom* (MDOF). Akhirnya, dapat menyimpulkan bahwa jumlah derajat kebebasan adalah jumlah koordinat yang diperlukan untuk mewakili posisi massa pada waktu yang ditentukan.

2.4.1. Persamaan diferensial pada struktur SDOF

Sistem derajat kebebasan tunggal (SDOF) hanya memiliki satu koordinat yang diperlukan untuk mewakili posisi massa pada saat tertentu yang bersangkutan. Model matematis sistem SDOF ditunjukkan pada Gambar 2.1. $F(t)$ tampak sebagai beban dinamis, yang besarnya merupakan fungsi waktu.

Dan elemen-elemen lain yang ada dalam gambar adalah sebagai berikut:

1. Elemen massa (m), mewakili massa dan inersia struktur
2. Elemen pegas (k), mewakili gaya balik elastis dan kapasitas energi potensial dari struktur atau kekakuan pada kolom
3. Elemen redaman (c), mewakili sifat kehilangan energi dari struktur



Gambar 2.3. Gambar matematis sistem SDOF
(Sumber: Chopra, 1995)

Apabila beban dinamik $F(t)$ bekerja ke arah kanan, maka akan terdapat perlawanan pegas, damper dan gaya redaman seperti pada gambar. Berdasarkan prinsip keseimbangan dinamik pada *free body diagram*, maka dapat diperoleh hubungan,

$$F(t) - fS - fD = m\ddot{u} \quad \text{atau} \quad F(t) = m\ddot{u} + fD + fS \quad (2.2)$$

dimana:

$$fD = c\dot{u}$$

$$fS = ku \quad (2.3)$$

Apabila persamaan (2.3) disubstitusikan ke persamaan (2.2), maka akan diperoleh:

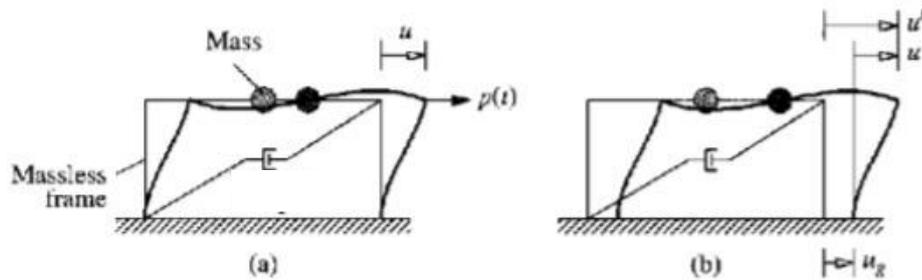
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F(t) \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) adalah persamaan diferensial gerakan massa suatu struktur SDOF yang memperoleh pembebanan dinamik $F(t)$ pada problem dinamik.

2.4.2. Persamaan diferensial struktur SDOF akibat *base motion*

Beban gempa yang biasa digunakan dalam analisis struktur berbeda dengan beban angin. Gempa bumi mengguncang permukaan bumi dan getaran direkam sebagai gambar aselogram. Dalam hal ini, selalu diasumsikan bahwa tanah dasar dan tanah penyangga bergerak Bersama-sama atau tanah bercampur. Anggapan ini tidak sepenuhnya benar dalam praktik. Karena alasnya bukan bahan yang keras, alasnya bisa direkatkan ke pondasi. Pada kenyataannya, tanah dan pondasi tidak bergerak Bersama-sama. Pondasi selalu bergerak mendatar terhadap tanah yang menopangnya. Ini merupakan kondisi yang kompleks karena pengaruh

tanah terhadap analisis struktur sering disebut *soil-structure interaction analysis*. Dalam keadaan ini, ujung bawah pilar dan lapisan bawah bergerak secara bersamaan. Persamaan diferensial untuk Gerakan model yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Struktur SDOF akibat *base motion*
(Sumber: Chopra, 1995)

Berdasarkan pada *free body diagram* seperti diatas maka *displacement* total yang terjadi adalah

$$u^t(t) = u(t) + u_g(t) \quad (2.5)$$

Dari *free body diagram* yang mengandung inersia f_1 tampak bahwa persamaan kesetimbangannya menjadi

$$f_1 + f_D + f_s = 0 \quad (2.6)$$

dimana inersia adalah,

$$f_1 = m\ddot{u}^t \quad (2.7)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.3) dan (2.6) ke (2.6) dan (2.5), sehingga diperoleh persamaannya sebagai berikut

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = m\ddot{u}_g(t) \quad (2.8)$$

Persamaan (2.8) diatas merupakan persamaan diferensial relatif karena gaya inersia, redaman dan pegas disebabkan oleh defleksi relatif. Ruas kanan pada persamaan (2.8) disebut sebagai beban gempa efektif atau beban gerakan tanah efektif. Ruas kanan tersebut seolah menjadi gaya dinamik efektif yang bekerja pada elevasi lantai tingkat. Kemudian gaya luar ini akan disebut sebagai gaya efektif gempa:

$$P_{ef}(t) = m\ddot{u}_g(t) \quad (2.9)$$

2.4.3. Persamaan Gerak Pada Sistem Portal SDOF

Pada semua kasus, persamaan gerak sistem linier berderajat kebebasan tunggal mempunyai bentuk

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (2.10)$$

Perpindahan dan kecepatan pada saat $t = 0$ adalah

$$u(0) = u_0, \quad \dot{u}(0) = \dot{u}_0 \quad (2.11)$$

dimana, u_0 dan \dot{u}_0 adalah perpindahan awal dan kecepatan awal.

Persamaan (2.10) dapat ditulis kembali menjadi

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = \left(\frac{\omega_n^2}{k}\right)p(t) \quad (2.12)$$

dimana

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m}$$

dan

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}}$$

$$c_{cr} = 2m\omega_n = \frac{2k}{\omega_n} = 2\sqrt{km}$$

Untuk getaran bebas $\rightarrow P(t) = 0$, maka persamaan (2.10) dan (2.12)

menjadi:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.13)$$

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad (2.14)$$

ω_n adalah frekuensi alami sudut tak teredam (rad/s), ξ adalah faktor redaman dan c_{cr} adalah koefisien redaman kritis.

Respon total:

$$u(t) = u_p(t) + u_c(t) \quad (2.15)$$

Didalam istilah matematika, penyelesaian umum dari persamaan diferensial terdiri dari penyelesaian sesungguhnya $u_p(t)$ dan penyelesaian komplemen atau pelengkap $u_c(t)$. Untuk memenuhi persamaan (2.13) dan (2.14), maka digunakan asumsi

$$u = \underline{C}e^{st} \quad (2.16)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.16) kedalam (2.14), maka diperoleh

$$(\underline{s}^2 + 2\xi\omega_n\underline{s} + \omega_n^2)\underline{C}e^{\underline{s}t} = 0 \quad (2.17)$$

Agar persamaan (2.15) valid untuk semua nilai t , kita harus menentukan

$$\underline{s}^2 + 2\xi\omega_n\underline{s} + \omega_n^2 = 0 \quad (2.18)$$

1. Getaran bebas pada sistem SDOF tak teredam (*Undamped*)

Persamaan gerak untuk sistem berderajat kebebasan tunggal (SDOF) tak teredam adalah

$$\dot{u} + \omega_n^2 u = 0 \quad (2.19)$$

Dan persamaan karakteristik yang sesuai adalah

$$\underline{s}^2 + \omega_n^2 = 0 \quad (2.20)$$

Akar dari persamaan adalah

$$\underline{s}_{1,2} = \pm i \omega_n \text{ dimana } i = \sqrt{-1} \quad (2.21)$$

Jika akar-akar tersebut di substitusikan ke persamaan (2.18), kita mendapat penyelesaian umum

$$u = \underline{C}_1 e^{i\omega_n t} + \underline{C}_2 e^{-i\omega_n t} \quad (2.22)$$

Dengan menggunakan persamaan Euler

$$e^{\pm i\theta} = \cos\theta \pm i \sin\theta \quad (2.23)$$

Persamaan (2.22) dalam bentuk fungsi trigonometri dapat ditulis sebagai berikut

$$u = A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t \quad (2.24)$$

Dimana A_1 dan A_2 adalah konstanta real untuk ditentukan dari kondisi awal yaitu persamaan (2.10). Persamaan (2.10) dan (2.24) mengacu pada

$$u(0) = u_0 = A_1$$

$$\dot{u}(0) = \dot{u}_0 = A_2 \omega_n \quad (2.25)$$

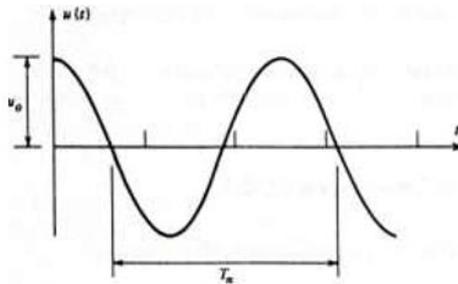
Jadi,

$$u = u_0 \cos \omega_n t + \left(\frac{\dot{u}_0}{\omega_n} \right) \sin \omega_n t \quad (2.26)$$

Adalah respon getaran bebas dari sistem SDOF tak teredam.

Pertama, pertimbangkan kasus sistem yang menggantikan dan melepaskan dari posisi yang sama dengan jumlah u_0 . Kemudian $u(0) = 0$, jadi

$$u = u_0 \cos \omega_n t \quad (2.27)$$



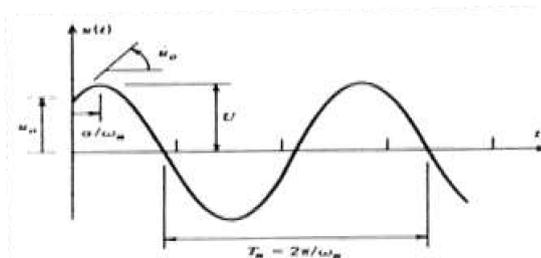
Gambar 2.5. Getaran Bebas Dari Sistem SDOF Tak Teredam Dengan $u(0) = 0$
(Sumber: Buku Ajar Dinamika, Sugeng P Budio)

Kita dapat melihat bahwa gerak yang dihasilkan adalah gerak harmonik sederhana dengan amplitudo u_0 , periode natural dari sistem tak teredam (*undamped natural period*) adalah

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \text{ (s)} \quad (2.28)$$

Dan frekuensi natural dari sistem tak teredam (*undamped natural frequency*) adalah

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} \text{ (Hz)} \quad (2.29)$$



Gambar 2.6. Respon Getaran Bebas Secara Umum Dari Sistem SDOF Tak Teredam
(Sumber: Buku Ajar Dinamika, Sugeng P Budio)

Gambar 2.5. menunjukkan grafik persamaan (2.6) ketika u_0 atau \ddot{u}_0 adalah 0 (nol). Ini adalah gerakan harmonik sederhana dengan periode T_n $u(t)$ yang dapat dinyatakan dengan persamaan (2.26) atau dengan persamaan

$$u(t) = U \cos \cos (\omega_n - \alpha) = U \cos \cos \omega_n \left(1 - \frac{\alpha}{\omega_n}\right) \quad (2.30)$$

2. Getaran bebas pada sistem SDOF teredam (*Damped*)

Persamaan (2.12) ditulis kembali sebagai berikut :

$$\dot{u} = 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = 0 \quad (2.31)$$

Mengasumsi kembali sebuah solusi dari bentuk :

$$u = \underline{C}e^{\underline{s}t}$$

$$\dot{u} = \underline{s}\underline{C}e^{\underline{s}t} \quad (2.32)$$

$$\dot{u} = \underline{s}^2\underline{C}e^{\underline{s}t}$$

Dan diperoleh persamaan karakteristik :

$$\underline{s}^2 + 2\xi\omega_n\underline{s} + \omega_n^2 = 0 \quad (2.33)$$

Nilai \underline{s}_1 dan \underline{s}_2 adalah

$$\underline{s}_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1} \quad (2.34)$$

2.5. *Time History*

Karena beban gempa merupakan fungsi dari waktu, maka respon yang terjadi pada struktur gedung juga bergantung pada durasi beban.

Analisis riwayat waktu paling sering digunakan untuk kondisi nonlinier, tetapi tidak jarang juga dipakai pada kondisi linier.

Analisis modal untuk mendapatkan respon struktur tidak dapat menggunakan akselogram. Integrasi numerik langsung dengan

memperhatikan struktur merupakan dasar dari analisis *time history*, dimana metode integrasi yang umum digunakan adalah metode Newmark. Gerak seismik yang tepat adalah gaya patahan dan jarak yang mengendalikan kondisi dengan mekanisme sumber. Untuk lokasi kurang dari 5 km dari patahan aktif dan asal bahaya seismik, setiap pasang komponen seismik berputar dalam arah normal patahan dan dalam arah sejajar dengan patahan sumber, dari 0,2T sampai 1,5T. Rentang nilai rata-rata komponen longitudinal patahan lebih besar dari spektrum respons seismik CEFR.