

BAB II

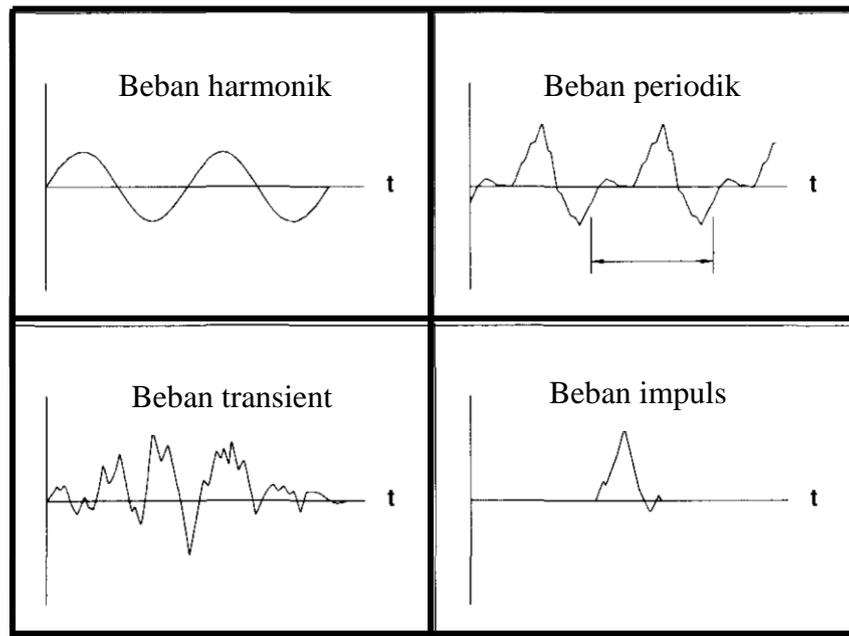
TINJAUAN PUSTAKA

Suatu prosedur design yang disediakan untuk menentukan kriteria penerimaan manusia akibat getaran lantai, bervariasi sesuai dengan bahan yang digunakan dalam konstruksi lantai. Murray, et al (1997), mengusulkan batas kriteria sesuai dengan standar ISO 2361-1/2. Batasan ini menunjukkan bahwa toleransi manusia untuk getaran sangat tergantung pada lingkungan, sebagai contoh seorang yang sedang belajar di perpustakaan akan mentolerir getaran jauh lebih sedikit dibandingkan dengan seseorang yang berbelanja di mal pada hari raya.

II. 1 Konsep Getaran

Beberapa istilah yang digunakan dalam analisis antara lain :

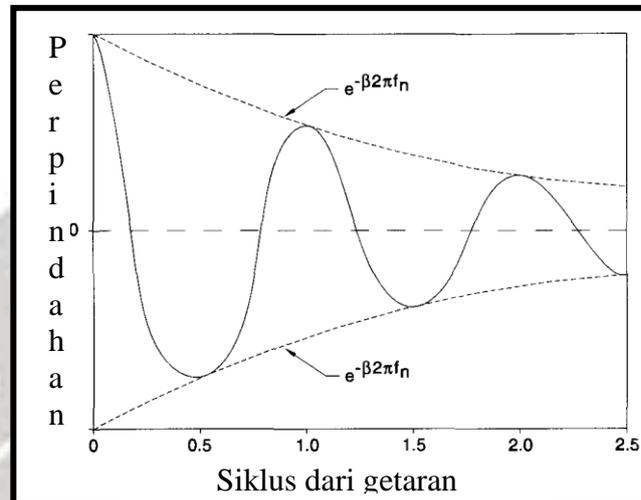
1. Beban dinamis, dapat diklasifikasikan sebagai beban harmonik atau sinusoidal (mesin berputar), beban periodik (aktivitas berirama manusia), beban sementara (pergerakan orang: berjalan dan berlari), dan beban impuls (orang melompat). Beberapa bentuk khas dari pembebanan dinamis ini dapat dilihat pada gambar 1.
2. Periode adalah waktu yang diperlukan untuk bergetar selama satu kali sedangkan frekuensi adalah kebalikan dari periode yaitu jumlah getaran dalam satu unit waktu.



Gambar 1. Tipe-tipe beban dinamik

3. Jika sistem struktur terkena gaya pendorong harmonik terus menerus, gerakan yang dihasilkan akan memiliki frekuensi dan amplitudo maksimum yang konstan disebut sebagai gerak *steady state*, sedangkan jika sistem struktur dikenakan gaya impuls tunggal dan oleh redaman dalam sistem menyebabkan gerakan berkurang disebut sebagai gerak sementara.
4. Frekuensi alami adalah frekuensi dari sistem yang bergetar secara bebas. Kondisi ini disebut sebagai getaran bebas.
5. Redaman mengacu pada kehilangan energi per siklus selama sistem bergetar. *Vicous damping* adalah redaman sebanding dengan kecepatan. Redaman kritis diperlukan untuk mencegah osilasi dari sistem. Rasio redaman merupakan perbandingan redaman aktual dengan redaman kritis. Untuk redaman yang lebih

kecil dari redaman kritis, sistem akan berosilasi secara bebas seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh moda redaman dalam respon getaran

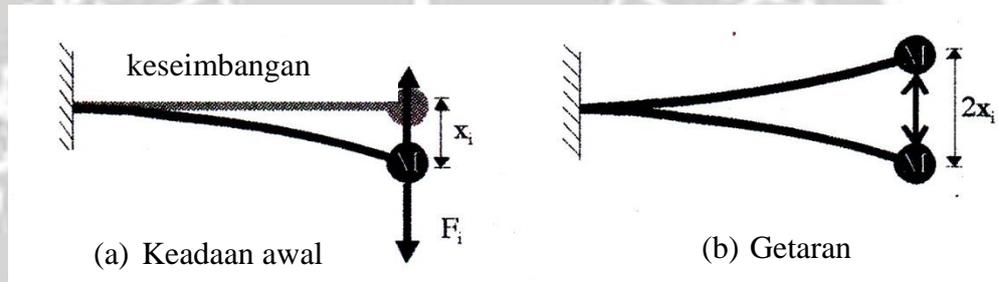
6. Resonansi terjadi ketika frekuensi dari sebuah sistem gaya dimana frekuensi tersebut berimpit (mendekati sama dengan) frekuensi alami dari sistem tersebut.
7. *Mode shape* yaitu bentuk struktur ketika bergetar pada frekuensi alami.
8. Deret Fourier yaitu suatu prosedur matematis untuk mengubah catatan waktu menjadi frekuensi spektrum tanpa kehilangan data.
9. Spektrum yaitu variasi relatif antara amplitudo dengan frekuensi getaran yang berkontribusi ke beban atau gerakan.

II. 2 Getaran sebagai Derajat Kebebasan Tunggal

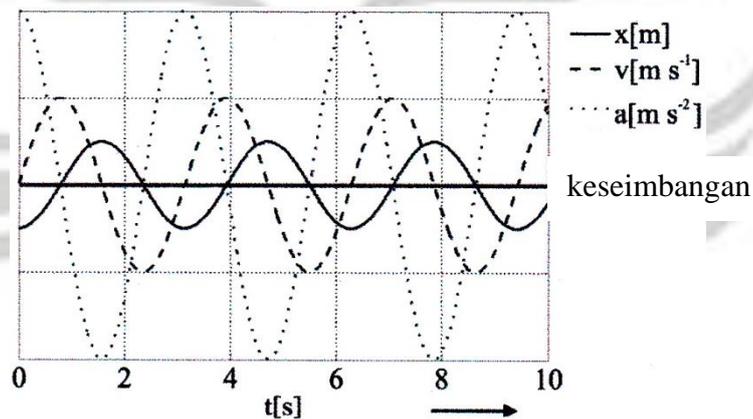
Getaran terjadi ketika gaya F_i memindahkan beberapa titik dari keseimbangannya yang disebut keadaan awal seperti pada gambar 3 yaitu sebuah ayunan batang horizontal sederhana dengan massa

terkonsentrasi di ujung batang. Gaya akan menyebabkan perpindahan vertikal dari massa dan menghasilkan gaya yang berlawanan pada batang, F_r yang bekerja pada batang tersebut yang mengarah pada keadaan seimbang. Ketika gaya awal dilepaskan maka yang tersisa hanyalah gaya menunjuk arah keseimbangan dan massa akan bergerak dalam getaran harmonik.

Gerakan ini umumnya dijelaskan dalam bentuk perpindahan (x), kecepatan (v) dan percepatan (a) seperti pada gambar 4.



Gambar 3. Getaran dari massa pada ujung kantilever



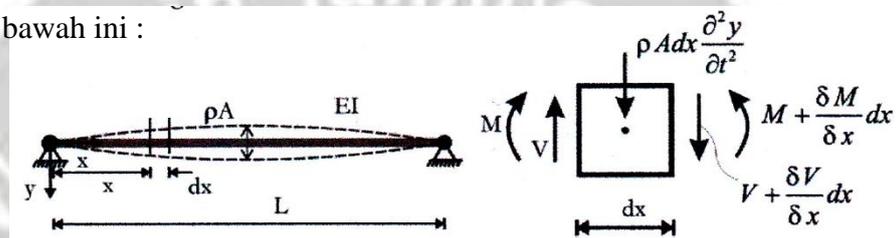
Gambar 4. Hubungan antara perpindahan (x), kecepatan (v) dan percepatan (a) pada getaran.

Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$v(t) = \frac{\partial x(t)}{\partial t} = x \quad , \quad a(t) = \frac{\partial x(v)}{\partial v} = x \dots\dots\dots(2.1)$$

II. 3 Getaran dalam Struktur Balok

Suatu permasalahan yang khusus yang lebih memadai untuk menggambarkan getaran yang terjadi di lantai adalah struktur balok. Struktur balok dengan beberapa kondisi dukungan, distribusi beban dan bentuk penampang yang bervariasi. Skematik dari struktur balok yang bergetar jika dibebani gaya dinamis ditampilkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 5. Skematis getaran dari balok dukungan sederhana dan gaya yang bekerja pada penampang (dx).

Persamaan diferensial pada sistem ini menggambarkan posisi vertikal (y) dari setiap titik di balok sepanjang sumbu- x dalam waktu tertentu (t).

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

Dengan :

x = jarak dari perletakan (m)

y = perpindahan vertical pada titik- x (m)

L = panjang balok (m)

EI = kekakuan lentur balok (N.m²)

ρA = massa per satuan panjang (Kg/m)

V = gaya geser (N)

M = momen lentur (N.m)

t = waktu

II. 4 Prinsip Getaran Lantai

Kebanyakan masalah getaran lantai diakibatkan adanya gaya berulang yang disebabkan oleh mesin atau kegiatan manusia seperti menari, aerobik atau berjalan, meskipun berjalan sedikit lebih rumit dari yang lain karena lokasi beban berubah pada setiap langkah. Gaya berulang bisa diwakili oleh deret Fourier :

$$F = P (1 + \sum \alpha_i \cos(2\pi i f_{\text{step}} t + \Phi_i)) \dots \dots \dots (2.3)$$

dengan :

P = Berat Manusia

α_i = Koefisien dinamik dari beban harmonik.

i = banyaknya harmonik

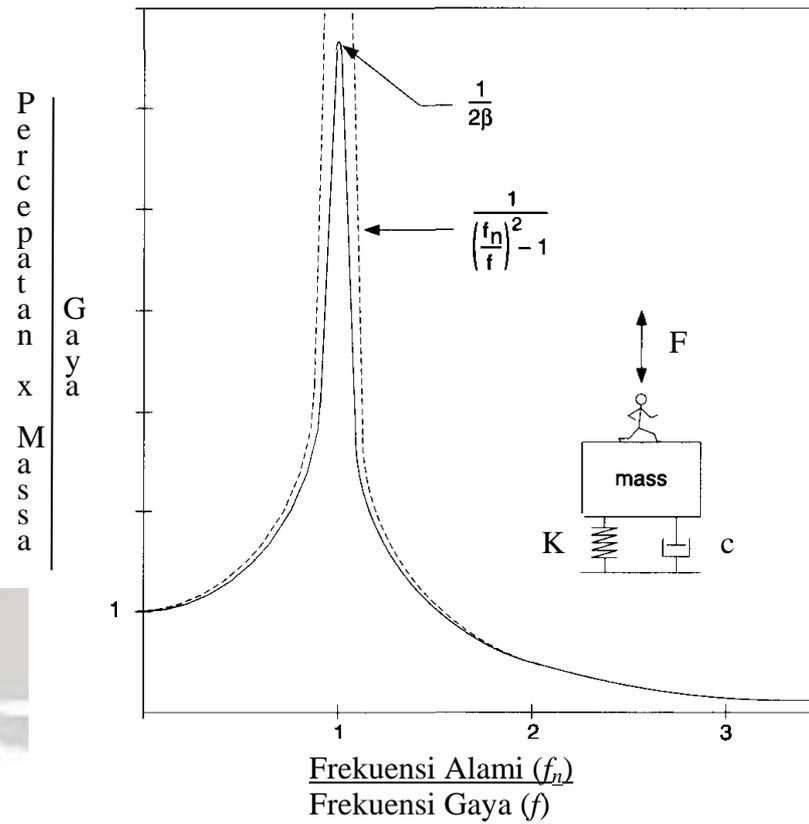
f_{step} = frekuensi langkah dari aktivitas manusia

t = waktu

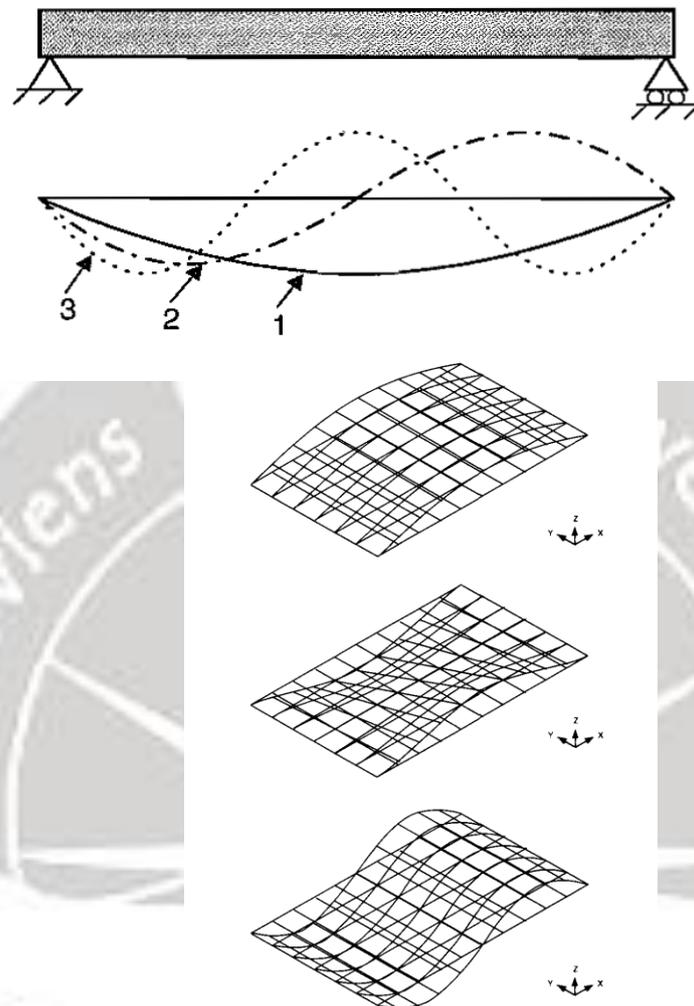
Φ_i = besarnya sudut beban harmonik

Secara umum besarnya koefisien dinamis menurun dengan meningkatnya beban harmonik, secara teori jika setiap frekuensi yang terkait dengan beban sinusoidal mengimbangi frekuensi alami dari bentuk getaran, maka resonansi akan terjadi menyebabkan menguatnya getaran. Gambar 6 menunjukkan respons sinusoidal jika hanya satu modus getaran walaupun banyak orang di sistem lantai,

setiap modus getaran memiliki konfigurasi perpindahan sendiri atau *mode shape* dan frekuensi alami.



Gambar 6. Respon dari gaya sinusoidal



Gambar 7. Tiga bentuk awal dari ragam balok dengan dukungan sederhana dan pada sistem lantai.

Getaran akibat aktivitas manusia untuk ragam yang lebih tinggi sulit dihasilkan karena orang yang tersebar di daerah yang relatif besar dan cenderung memaksa panel yang berdekatan bergerak dalam arah yang berlawanan. Berjalan menghasilkan beban dinamis

sehingga dapat menyebabkan terjadinya ragam yang lebih tinggi.

Model dasar pada gambar 6 dapat diwakili oleh persamaan :

$$\text{Percepatan Sinusoidal} = \left(\frac{\text{Force}}{\text{Massa}} \right) \times \text{Faktor Respons} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana faktor respons sangat tergantung dari perbandingan frekuensi alami dengan frekuensi gaya (f_n/f).

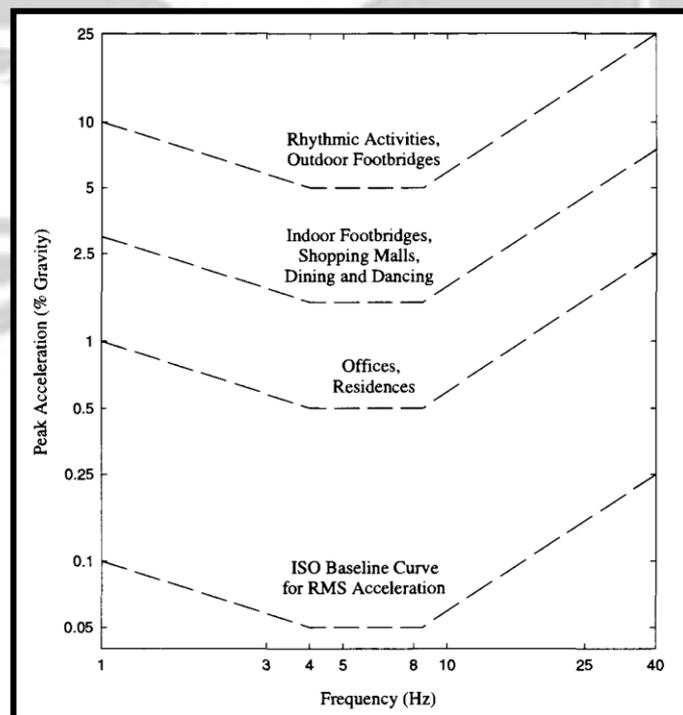
Untuk mengontrol percepatan pada resonansi yang disebabkan oleh meningkatnya redaman atau massa, percepatan adalah gaya dibagi redaman kali massa. Frekuensi alami juga mempunyai fungsi karena gaya sinusoidal umumnya menurun dengan meningkatnya harmonik, semakin tinggi frekuensi alami semakin rendah gaya.

II. 5 Kriteria Penerimaan untuk Kenyamanan Manusia

A. Respons Manusia Terhadap Getaran Lantai

Sebuah gerak kontinyu (*steady-state*) dapat menimbulkan getaran yang berlebihan daripada gerak yang disebabkan oleh gaya transien. Batas persepsi gerakan lantai di tempat kerja yang sibuk bisa lebih tinggi daripada di sebuah apartemen yang tenang. Reaksi orang yang lebih tua berbeda dengan orang dewasa walaupun keduanya mengalami gerakan yang sama. Reaksi orang yang merasakan getaran sangat tergantung pada apa yang mereka lakukan. Orang-orang di kantor atau tempat tinggal tidak suka dengan getaran lantai

yang jelas terasa (puncak percepatan sekitar 0,5% dari percepatan gravitasi, g) sedangkan orang-orang yang mengambil bagian dalam suatu kegiatan akan menerima getaran sekitar 10 kali lebih besar (5% atau lebih dari percepatan gravitasi, g). Orang yang makan di samping lantai dansa atau berdiri di pusat perbelanjaan akan menerima getaran (sekitar 1,5% dari percepatan gravitasi). Kepekaan dalam setiap hunian bervariasi dengan durasi getaran dan letaknya sumber getaran. Batas untuk frekuensi getaran lantai adalah 4 Hz dan 8 Hz, di luar dari rentang frekuensi ini orang akan menerima percepatan getaran yang lebih tinggi seperti yang ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Rekomendasi puncak percepatan untuk kenyamanan manusia untuk getaran lantai akibat aktivitas manusia

B. Batas Getaran

Besarnya getaran harus dibandingkan dengan beberapa nilai batas untuk memastikan apakah tingkat getaran tersebut dapat diterima. Tidak ada nilai tunggal sebagai pedoman untuk membatasi tingkat getaran. Persepsi manusia terhadap tingkat getaran sangat tergantung pada lingkungan dimana getaran dirasakan dan juga tergantung pada frekuensi dan durasi getaran. Standart ISO 2361-1 dan 2 biasanya digunakan sebagai dasar dalam menentukan nilai batas yang digunakan untuk mendefinisikan kenyamanan manusia akibat getaran yang berlebihan.

C. Rekomendasi Kriteria Design Struktural

Banyak kriteria untuk kenyamanan manusia telah diusulkan selama bertahun-tahun. Berikut ini direkomendasikan kriteria design untuk eksitasi berjalan, metode untuk memperkirakan sifat lantai yang diperlukan dan prosedur design yang pertama kali diusulkan oleh Allen dan Murray (1993). Kriteria ini didasarkan pada respon dinamik balok-balok silang atau dukungan baja pada sistem lantai untuk beban berjalan dan dapat digunakan untuk mengevaluasi sistem struktur kantor, pusat perbelanjaan, jembatan pejalan kaki dan bangunan hunian. Perkembangannya dijelaskan sebagai berikut :

1. Kriteria ini dikembangkan dengan menggunakan :

Batas percepatan seperti yang direkomendasikan oleh *International Standard Organization* (ISO 2631-2, 1989) menunjukkan batas percepatan rms sebagai kelipatan dari dasar kurva garis seperti pada gambar 8 yaitu percepatan puncak untuk kantor adalah 10, pusat perbelanjaan adalah 30 dan jembatan pejalan kaki. Untuk keperluan design batas percepatan dapat diasumsikan berkisar antara 0,8 sampai 1,5 kali nilai yang dianjurkan tergantung pada durasi getaran dan frekuensi getaran yang terjadi.

2. Menurut Murray et al. (1997), waktu tergantung pada komponen harmonik yang sesuai dengan frekuensi dasar lantai:

$$F_i = P \cdot \alpha_i \cdot \cos(2\pi f_{step} t) \dots \dots \dots (2.5)$$

dimana :

P = Berat Manusia (untuk design = 0,7 kN)

α_i = Koefisien dinamik dari beban harmonik.

i = banyaknya harmonik

f_{step} = frekuensi langkah dari aktivitas manusia

t = waktu

Nilai yang direkomendasikan untuk koefisien dinamik dari beban dinamik diberikan pada tabel 1.

Tabel 1. Hubungan antara frekuensi gaya dengan koefisien dinamis

Harmonik I	Manusia berjalan	
	f, Hz	α_i
1	1,6 – 2,2	0,5
2	3,2 – 4,4	0,2
3	4,8 – 6,6	0,1
4	6,4 – 8,8	0,01

Sumber : Steel Design Guide 11 (Murray et al., 1997)

3. Bentuk fungsi respons resonansi :

$$\frac{a}{g} = \frac{R\alpha_i P}{\beta W} \cdot \cos(2\Pi_i f_{step} t) \dots\dots\dots(2.6)$$

a/g = rasio percepatan lantai terhadap percepatan gravitasi

R = faktor reduksi (0,5 untuk lantai)

β = rasio redaman

W = berat efektif lantai

Oleh Allen dan Murray (1993), persamaan (2.6) dapat disederhanakan menjadi:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0,35f_n)}{\beta W} \leq \frac{P_0}{g} \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana :

a_p/g = perkiraan percepatan puncak (inchi)

a_0/g = batas percepatan (lihat gambar 8)

f = frekuensi alami struktur lantai

P_0 = gaya konstan sebesar 0,29 kN

Persamaan tersebut di atas merupakan beban harmonik akibat berjalan yang menghasilkan respons pada frekuensi alami lantai.

II. 6 Frekuensi Alami Lantai Rangka Baja

A. Konsep yang digunakan

Parameter yang paling penting untuk design servis getaran lantai dan evaluasi sistem rangka lantai adalah frekuensi alami.

Lantai terdiri dari dek beton yang didukung balok baja antara kolom, frekuensi alami diperkirakan dengan terlebih dahulu mempertimbangkan ragam sebuah balok dengan ragam dek lantai secara terpisah kemudian digabungkan. Atau frekuensi alami dapat diperkirakan dengan analisis elemen hingga.

Frekuensi alami balok atau balok anak dapat diperkirakan dari frekuensi alami fundamental yang persamaannya sebagai berikut (Murray et al, 1997)

$$f_n = \frac{\pi}{2} \frac{gE_s I_t}{wL^4}^{1/2} \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana :

f_n = frekuensi dasar alami

g = percepatan gravitasi (9,8 m/dtk²)

E_s = Modulus Elastisitas Baja

I_t = Momen Inersia Transformasi

w = berat batang

L = panjang batang

Persamaan sistem struktur dapat diperkirakan dengan menggunakan hubungan Dunkerley :

$$\frac{1}{f_n^2} = \frac{1}{f_j^2} + \frac{1}{f_g^2} \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana :

f_j = frekuensi pengaku

f_g = frekuensi balok girder

Persamaan 2.7 dapat ditulis kembali menjadi :

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana : $\Delta = 5wL^4/(384E_sI_t)$

Δ = defleksi di tengah bentang

Jika deformasi akibat geser juga diperhitungkan, persamaan

Dunkerley dapat ditulis kembali sebagai berikut :

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g}} \dots\dots\dots(2.11)$$

dimana :

Δ_j dan Δ_g = defleksi dari pengaku dan balok girder

Persamaan berikut untuk memperhitungkan momen inersia efektif balok jika kedudukan balok tidak cukup kaku :

$$I_g = I_{nc} + (I_c - I_{nc}) / 4 \dots \dots \dots (2.12)$$

dimana :

I_{nc} = momen inersia non komposit

I_c = momen inersia komposit

I_g = momen inersia balok girder

Untuk balok girder :

$$I_{mode} = C_r \cdot I_{chords} \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana :

$$C_r = 0,90 (1 - e^{-0,28(L/D)^{2,8}}) \dots \dots \dots (2.14)$$

Untuk : $6 \leq L/D \leq 24$

$$C_r = 0,721 + 0,00725 (L/D) \dots \dots \dots (2.15)$$

Untuk $10 \leq L/D \leq 24$

L = bentang pengaku

D = tinggi pengaku

Momen inersia transformasi efektif balok-T kemudian dapat dihitung dengan menggunakan :

$$I_{eff} = \frac{1}{\frac{\gamma}{I_{pengaku}} + \frac{1}{I_{comp}}} \dots \dots \dots (2.16)$$

$$\gamma = \frac{1}{C_r} - 1 \dots \dots \dots (2.17)$$

B. Aksi Komposit

Dalam menghitung frekuensi alami, perubahan momen inersia akan digunakan jika pelat atau dek melekat pada batang pendukungnya, asumsi ini harus diterapkan bahkan jika konektor struktural tidak digunakan karena kekuatan geser di permukaan slab dan batang ditahan oleh gesekan antara beton dengan permukaan baja.

Untuk memperhitungkan kekakuan yang lebih besar dari beton pada dek baja dibawahnya, beban dinamis dibandingkan dengan beban statis direkomendasikan bahwa modulus elastisitas beton diambil sebesar 1,35 kali dari yang ditentukan dalam standar struktural saat ini dalam perhitungan momen inersia transformasi.

Menentukan momen inersia transformasi dari balok, lebar efektif pelat beton diambil sebagai jarak batang tetapi tidak boleh lebih besar dari 0,4 kali panjang batang.

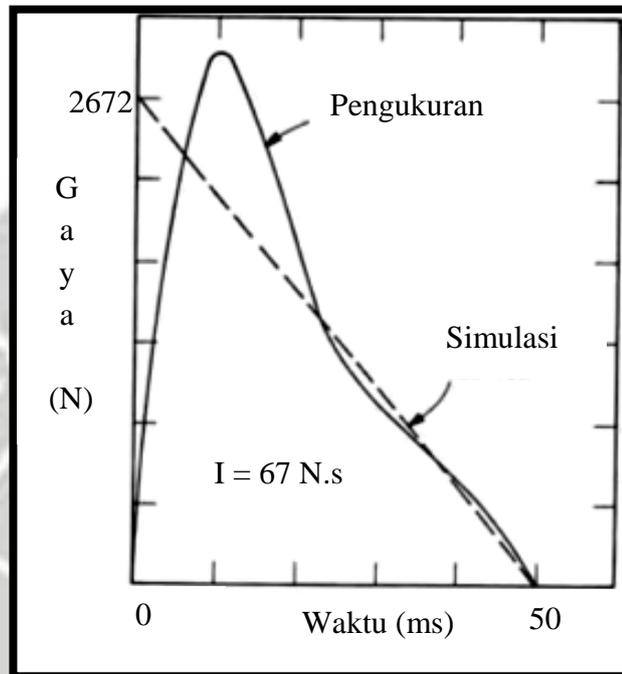
C. Beban Terbagi Rata

Beban hidup untuk lantai kantor diambil sebesar $2,5 \text{ kN/m}^2$, yaitu beban hidup yang disarankan khusus area kantor dengan adanya meja, kursi, lemari arsip, rak buku dan lain – lain, nilai yang lebih rendah digunakan jika barang–barang tersebut tidak ada.

D. Beban akibat berjalan

Fungsi beban segitiga Allen et al (1977), yang digunakan untuk simulasi penurunan dampak tumit untuk memperoleh respons

dinamik dari model elemen hingga yang ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Fungsi beban dinamik akibat hentakan kaki

Fungsi beban akibat dampak tumit sebesar 2,672 KN untuk penerapan beban awalnya kemudian menurun secara linear menjadi nol selama 0,05 detik dengan impuls adalah 67 Newton-detik.

E. Koefisien Redaman

Damping adalah istilah untuk menggambarkan aspek dari struktur yang mempengaruhi energi di dalamnya yang mengarah pada pengurangan getaran. Redaman menggambarkan jumlah energi yang hilang ketika struktur bergetar. Dengan tingkat redaman yang tinggi banyak energi yang hilang sehingga getaran

pada struktur berkurang. Semua struktur memiliki tingkat redaman yang melekat pada struktur tersebut. Ketika menghitung respons getaran penting untuk memperkirakan redaman struktur yang realita, pengalaman dengan konstruksi lantai yang sama akan memberikan perkiraan yang akurat dari jumlah kemungkinan redaman yang akan dicapai.

Penelitian yang dilakukan oleh Elnimeiri (1989), pada lantai komposit merekomendasikan koefisien redaman 3% untuk lantai terbuka dan 4,5% - 6% redaman untuk lantai dengan partisi. Naeim (1991), mempersyaratkan persentase redaman kritis untuk situasi desain lantai yang berbeda, dimana redaman kritis untuk sistem lantai kantor dengan penggantung langit-langit dan pekerjaan mekanikal elektikal diperkirakan berada pada 3,0%. Maurenbrecher et al (1997), setelah mempertimbangkan struktur hunian diberikan faktor redaman berikut: 1% untuk jembatan pejalan kaki, 2% untuk pusat perbelanjaan dan 2% - 5% untuk kantor dan tempat tinggal. Secara umum, koefisien redaman tampaknya berada antara 2% - 6%.

Carson et al (1994), dari hasil uji lapangan menyatakan bahwa rata-rata rasio redaman lantai beton bertulang sekitar 2,2 % dan untuk lantai komposit 1%.

F. Frekuensi Lantai

Frekuensi alami dari sistem lantai merupakan kunci dalam menentukan perilaku dinamis lantai. Dalam prakteknya, penyederhanaan ini dilakukan dalam panduan desain, di mana formula baku ditentukan untuk memperkirakan frekuensi natural dan respons getaran lantai, berdasarkan teori balok yang diberikan. Pendekatan teoritis dan praktis untuk mengevaluasi frekuensi alami lantai telah dilakukan dari berbagai metode yang dibahas.

Metode perhitungan yang tepat telah mendorong peneliti untuk menentukan pendekatan yang sederhana dalam memprediksi besarnya frekuensi alami lantai, salah satunya dengan metode balok ekivalen. Metode ini dikembangkan oleh Murray (1975) untuk lantai komposit dimana pelat lantai diperkirakan sebagai balok yang mempunyai lebar efektif dan momen inersia, frekuensi alami diberikan sebagai berikut :

$$f_n = K \sqrt{\frac{EI_t}{mL^4}} \dots\dots\dots(2.18)$$

Nilai K tergantung dari kondisi batas dan diberikan sebagai 1,57 untuk dukungan sederhana, dukungan semi kaku 2,45 dan dukungan sangat kaku 3,56. Untuk balok kantilever nilai K adalah 0,56. Formula ini identik dengan solusi pada persamaan 2.8.

G. Analisa Riwayat Waktu

Analisa riwayat waktu dilakukan dalam studi ini yang menyajikan evaluasi tingkat getaran pada sistem lantai akibat

beban dinamis yang berasal dari aktivitas manusia. Respons dinamis lantai komposit ditentukan melalui analisa perpindahan, kecepatan dan percepatan. Hasil analisa dinamik yang diperoleh dari analisa numerik didasarkan pada metode elemen hingga menggunakan program ETABS.

