

Diterima : 30 Juni 2023 | Selesai Direvisi : 05 Juli 2023 | Disetujui : 07 Juli 2023 | Dipublikasikan : Juni 2023

DOI : <http://dx.doi.org/10.24853/jk.14.2.175-188>

Copyright © 2023 Jurnal Konstruksia

This is an open access article under the CC BY-NC licence (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Estimasi Lentutan Pelat Untuk Menghitung Kapasitas Beban Dengan Akurasi Tinggi Menggunakan Uji Getar

Heri Khoeri^{1,2}, Sofia W. Alisjahbana¹, Jack Widjajakusuma¹ dan Najid¹

¹Prodi Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Let. Jend S. Parman No.1 Jakarta 11440

²Prodi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jakarta, Jl. Cempaka Putih Tengah 27, Jakarta, 10510

Email korespondensi: hkkhoeri@hesa.co.id

ABSTRAK

Asesmen kapasitas struktur bangunan eksisting dapat dilakukan dengan cara analitis, dimana mutu dan dimensi elemen struktur dapat diperoleh dari pengujian dan pengukuran. Uji beban statik disarankan untuk dilakukan dalam beberapa pedoman pemeriksaan bangunan eksisting, namun jarang dilakukan karena membutuhkan waktu persiapan dan pelaksanaan pengujian beberapa hari. Hal ini tentunya mengganggu operasional bangunan, selain masalah biaya dan resiko terhadap struktur itu sendiri. Alternatif yang cukup efektif adalah dengan uji getar, dari data percepatan menggunakan Fast Fourier Transformation, frekuensi struktur dapat diketahui. Lentutan dapat diestimasi dengan integrasi ganda data percepatan. Namun dalam banyak kasus mengubah data percepatan menjadi lentutan tidak selalu akurat karena ketidaktahuan kondisi awal dan noise yang tidak dapat dihindari dalam proses perekaman. Filtering data percepatan yang diterapkan pada satu kasus belum tentu cocok untuk kasus lainnya, karena proses koreksi memungkinkan menghilangkan/merubah data. Pada penelitian ini mengusulkan penggunaan Highpass Equiripple FIR pada data percepatan pada tiap tahap integrasi numerik dengan optimasi pada Panjang Filter. Interpolasi dilakukan dengan hermite kubik dan integrasi menggunakan metode Simpson 3/8. Dengan algoritma tersebut dihasilkan estimasi lentutan statik dari data percepatan 100.67% dari lentutan hasil uji statik dengan deviasi 1.86%.%. Kapasitas beban dapat diketahui dengan memasukkan lentutan ijin pada persamaan lentutan.

Kata kunci: percepatan, filter, FIR, lentutan, uji getar

ABSTRACT

Assessment of the capacity of existing building structures can be done in an analytical way, where the quality and dimensions of structural elements can be obtained from testing and measurement. Static load tests are recommended to be carried out in several existing building inspection guidelines, but are rarely carried out because they require several days of preparation time and test execution. This certainly interferes with building operations, in addition to cost issues and risks to the structure itself. A fairly effective alternative is to vibrate test, from the acceleration data using Fast Fourier Transformation, the frequency of the structure can be known. Deflection can be estimated by double integration of acceleration data. However, in many cases, converting acceleration data into deflection is not always accurate due to ignorance of the initial conditions and unavoidable noise in the recording process. Accelerated data filtering applied to one case is not necessarily suitable for other cases, because the correction process allows removing/changing data. This study proposes the use of Highpass Equiripple FIR in acceleration data at each stage of numerical integration with optimization in Filter Length. Interpolation is performed with cubic hermite and integration using the Simpson 3/8 method. With this algorithm, static deflection estimation is produced from acceleration data of 100.67% of the deflection of static test results with a deviation of 1.86%.%. The load capacity can be determined by inserting a permit deflection in the deflection equation.

Keywords: acceleration, filter, FIR, deflection, vibrating test

1. PENDAHULUAN

Dalam SNI 2847:2019, Pasal 27-Evaluasi Kekuatan Struktur Eksisting, 27.2.3 dinyatakan, “bila pengaruh penurunan kekuatan tidak diketahui dengan baik atau tidak memungkinkan untuk mengukur dimensi dan menentukan properti material pada komponen yang diperlukan untuk analisis, maka uji beban diperlukan sesuai 27.4” [1]. Uji beban statis pada pelat secara aktual menggambarkan performa pelat berdasarkan hubungan beban dan lendutan. Pada bangunan eksisting umumnya terkendala operasional bangunan, karena membutuhkan waktu dan menghentikan operasional bangunan setidaknya pada modul pelat yang akan diuji dan lantai di bawahnya. Metode pengujian lain yang dapat diterapkan adalah uji getar, yaitu dengan menempatkan sensor percepatan pada pelat yang dikenai beban impulse. Dari data percepatan, frekuensi pelat dapat diketahui dengan Fast Fourier Transformation, FFT. Jika frekuensi dan massa struktur diketahui, maka kekakuan struktur dapat diketahui.

Idealnya respon lendutan dapat diperoleh dengan integrasi ganda data percepatan. Mode shape lendutan dapat diperoleh dengan memplotkan posisi sensor, Selanjutnya persamaan statika dapat direkonstruksi agar mendekati aktualnya. Masalahnya mengubah melakukan integrasi ganda data percepatan menjadi lendutan tidak selalu memberikan solusi yang akurat, karena beberapa hal, diantaranya kondisi awal yang tidak diketahui dan noise yang tidak dapat dihindari dalam proses perekaman. Selain itu, proses koreksi yang diterapkan dalam memperkirakan lendutan dari percepatan memungkinkan menghilangkan beberapa data [2]. Untuk mengatasinya diusulkan filtering dengan Finite Impulse Response (FIR) diformulasi dalam domain waktu.

2. SIMPLIFIKASI PELAT SATU ARAH

Apabila pelat tertumpu di keempat sisinya, dan rasio bentang panjang terhadap bentang pendek lebih besar atau sama

dengan 2, maka hampir 95% beban akan dilimpahkan dalam arah bentang pendek, dan pelat akan menjadi sistem pelat satu arah.

Dalam SNI 2847-2019, dalam beberapa ketentuan memberikan penyederhanaan untuk disain pelat satu arah seperti pada balok, diantaranya:

- **R7.3.1** Ketentuan ketebalan minimum pelat satu arah sama seperti balok.
- **R7.3.2** Dasar perhitungan lendutan untuk pelat satu arah sama seperti pada balok.
- **R7.4.3.2** Persyaratan penampang geser kritis dalam pelat satu arah sama seperti pada balok.
- **R7.6.3** Dasar untuk penulangan geser minimum pada pelat satu arah sama seperti pada balok.
- **R7.6.3.2** Dasar evaluasi kekuatan berdasarkan pengujian untuk pelat satu arah sama seperti balok.
- **R7.7.3** Persyaratan penyaluran tulangan pada pelat satu arah sama dengan balok.

Statika Pada Balok Euler-Bernoulli

Persamaan *Euler-Bernoulli* menunjukkan hubungan antara lendutan balok dan beban merata yang bekerja [3].

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) = q \quad (1)$$

Dengan $z(x)$ lendutan vertikal elemen balok sejarak x dari tumpuan kiri, E modulus Young, I momen inersia penampang balok, persamaan (1) dapat dituliskan sebagai:

$$EI \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} = q(x) \quad (2)$$

Turunan lendutan, z adalah sudut rotasi :

$$\theta(x) = \frac{\partial z}{\partial x} \quad (3)$$

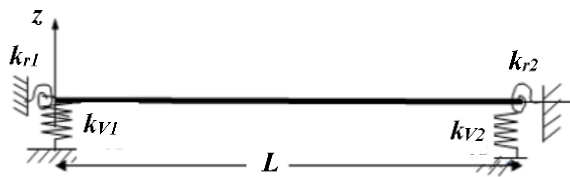
Momen, M dan geser, V dapat dinyatakan:

$$M(x) = -EI \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad (4)$$

$$V(x) = \frac{\partial M(x)}{\partial x} = -EI \frac{\partial^3 z}{\partial x^3} \quad (5)$$

Dengan substitusi kondisi batas, maka pers. (2), (3), (4), (5) dapat diselesaikan.

Tinjau balok dengan tumpuan Pegas Rotasi dan Pegas Vertikal seperti gambar berikut:



Gambar 1. Balok Euler-Bernoulli dengan dua pegas rotasi dan dua pegas vertikal

Kondisi batas balok pada Gambar 1 yang dibebani beban merata q adalah:

$$\begin{aligned} M|_{x=0} &= k_{r1}\theta|_{x=0} \\ M|_{x=L} &= -k_{r2}\theta|_{x=L} \\ V|_{x=0} &= -k_{v1}z|_{x=0} \\ V|_{x=L} &= k_{v2}z|_{x=L} \end{aligned} \quad (6)$$

Solusi untuk pers (2), (3), (4), (5), dengan kondisi batas (6) adalah:

$$\begin{aligned} y(x) = & q(k_{r1}k_{r2}k_{v1}k_{v2}L^4(L-x)^2x^2 + 144E^3I^3L(2k_{r1} + 2k_{r2} + k_{v2}L(L-x) + k_{v1}Lx) + 12E^2I^2(24k_{r1}k_{r2}L^2 + (5k_{r1} + 3k_{r2})k_{v2}L^4 + L^3(8k_{r2}k_{v1} - 4k_{r2}k_{v2} + k_{v1}k_{v2}L^2)x + 6k_{r1}(k_{v1} - kv2)L^2x^2 - 2k_{v1}L(2(k_{r1} + k_{r2}) + k_{v2}L^2)x^3 + ((k_{r1} + k_{r2})(k_{v1} + k_{v2}) + k_{v1}k_{v2}L^2)x^4) + 2EIL(k_{r1}k_{v1}k_{v2}L^2(3L - 2x)(L - x)x^2 + k_{r2}k_{v1}k_{v2}L^2(L - x)^2x(L + 2x) + 6k_{r1}k_{r2}(k_{v1}x^2(-2L + x)^2 + k_{v2}(L^2 - x^2)^2)))/ (24EI(k_{r1}k_{r2}k_{v1}k_{v2}L^4 + 12E^2I^2((k_{r1} + k_{r2})(k_{v1} + k_{v2}) + k_{v1}k_{v2}L^2) + 4EIL(3k_{r1}k_{r2}(k_{v1} + k_{v2}) + (k_{r1} + k_{r2})k_{v1}k_{v2}L^2)) \end{aligned} \quad (7)$$

Dinamika pada Balok Euler-Bernoulli

Teori balok menjelaskan hubungan antara lendutan, $z(x,t)$ dan momen lentur, $M(x,t)$:

$$M(x,t) = -EI \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad (8)$$

Dengan z lendutan vertikal sejarak x dari tumpuan kiri, E modulus Young, I momen inersia, *mode shape* getaran bebas Balok Euler-Bernoulli dapat dinyatakan [4]:

$$z(x,t) = Z(x)T(t) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Z(x) = & C_1 \sin(kx) + C_2 \cos(kx) \\ & + C_3 \sinh(kx) \\ & + C_4 \cosh(kx) \end{aligned} \quad (10)$$

$$T(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (11)$$

k dan ω terhubung satu sama lain dengan:

$$\omega_i = (k_i)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}; \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, \infty) \quad (12)$$

k menyatakan frekuensi tanpa dimensi dan ω adalah frekuensi sudut. $C1$ sampai dengan $C4$ ditentukan berdasarkan kondisi batas.

Fungsi Green

Sebuah persamaan diferensial parsial linear homogen dengan operator diferensial L dan fungsi sumber Rn Euclidean space, pada sebuah titik xf , maka fungsi Green $G(x,xf)$:

$$\{G(x, z)\} = \delta(x - x_f) \quad (13)$$

di mana $\delta(x - x_f)$ fungsi Dirac delta. Fungsi Dirac delta sendiri didefinisikan:

$$\delta(x) = \begin{cases} +\infty & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

Fungsi Dirac delta dalam hal ini memiliki fungsi penting, yaitu:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\delta(x - a) dx = f(a) \quad (15)$$

Getaran Bebas Balok Euler-Bernoulli

Kondisi batas balok sebenarnya kompleks, jarang ada kondisi yang sepenuhnya jepit, sendi atau bebas sempurna. Tinjau model balok Euler-Bernoulli dengan tumpuan pegas rotasi dan pegas vertikal di kedua ujungnya seperti pada Gambar 1. Dengan k_{r1} dan k_{r2} konstanta pegas rotasi kiri dan kanan, dan k_{v1} dan k_{v2} konstanta pegas vertikal pada tumpuan kiri dan kanan, maka *Mode shape* getaran vertikal dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} Z(\xi) = & C_1 \sin(k\xi) + C_2 \cos(k\xi) \\ & + C_3 \sinh(k\xi) \\ & + C_4 \cosh(k\xi) \end{aligned} \quad (16)$$

Dimana ξ (tanpa dimensi) menyatakan panjang dalam x/L . Kondisi batas balok Euler-Bernoulli Gambar 1 dapat dinyatakan:

$$\begin{aligned} M|_{\xi=0} &= k_{r1}\theta|_{\xi=0} \\ M|_{\xi=1} &= -k_{r2}\theta|_{\xi=1} \\ V|_{\xi=0} &= -k_{v1}z|_{\xi=0} \end{aligned} \quad (17)$$

$V|_{\xi=L} = k_{v1}z|_{\xi=L}$
Momen lentur, M , sudut rotasi, θ , dan gaya geser, V dapat dihitung sebagai berikut:

$$M(\xi) = \frac{EI k^2}{L^2} (-C_1 \sin(k\xi) - C_2 \cos(k\xi) + C_3 \sinh(k\xi) + C_4 \cosh(k\xi)) \quad (18)$$

$$V(\xi) = \frac{EI k^3}{L^3} (-C_1 \cos(k\xi) + C_2 \sin(k\xi) + C_3 \cosh(k\xi) + C_4 \sinh(k\xi)) \quad (19)$$

$$\theta(\xi) = \frac{EI k}{L} (C_1 \cos(k\xi) - C_2 \sin(k\xi) + C_3 \cosh(k\xi) + C_4 \sinh(k\xi)) \quad (20)$$

Substitusi pers. (18), (19), (20) ke kondisi batas (17), kemudian ditulis ulang dalam bentuk matriks. Selanjutnya untuk mencari solusi nontrivial C_1 sampai C_4 , determinan matriks harus nol. Dengan mathematica wolfram persamaan dapat diselesaikan, dan frekuensi sudut dapat dihitung dengan:

$$\omega_i = (k_i)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, \infty) \quad (21)$$

Getaran Paksa Balok Euler-Bernoulli

Kurva lendutan akibat getaran paksa pada Balok Euler-Bernoulli dengan gaya eksitasi terdistribusi acak $q(\xi, t)$ dapat dinyatakan:

$$\frac{EI \partial^4 z}{L^4 \partial \xi^4} + \rho A \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = q(\xi, t) \quad (22)$$

Aplikasikan transformasi Laplace:

$$\frac{EI}{L^4} z''''(\xi, \omega) + \rho A \omega^2 z(\xi, \omega) = q(\xi, \omega) \quad (23)$$

Kurva lendutan akibat getaran paksa pada Balok Euler-Bernoulli dengan gaya eksitasi terdistribusi acak $q(\xi, t)$ dapat dinyatakan dalam steady state:

$$z(\xi, t) = G(\xi, \xi_f) \exp(i\omega t) \quad (24)$$

dengan ξ_f adalah titik dimana beban bekerja Pers.(23) dapat dituliskan ulang menjadi:

$$\frac{EI}{L^4} G''''(\xi, \xi_f) - \rho A \omega^2 G(\xi, \xi_f) = \delta(\xi, \xi_f) \quad (25)$$

Jika redaman diabaikan, fungsi getaran dapat diturunkan untuk frekuensi tanpa dimensi, b lebih kecil dari frekuensi *cut-off*.

$$\sqrt{(r^2 - s^2) + \frac{4}{b^2}} > (r^2 + s^2) \quad (26)$$

Dengan $b < \frac{1}{r^2 s^2}$

$G(\xi, \xi_f)$ adalah penjumlahan dua bagian, solusi homogen dan solusi partikular.

$$G(\xi, \xi_f) = G_0(\xi) + G_1(\xi, \xi_f) H(\xi - \xi_f) \quad (27)$$

dimana $H(\xi - \xi_f)$ adalah step function, yang bernilai 0 jika $\xi < \xi_f$; dan 1 jika $\xi > \xi_f$. $G_0(\xi)$ adalah solusi homogen:

$$G_0(\xi) = C_1 \sin(k\xi) + C_2 \cos(k\xi) + C_3 \sinh(k\xi) + C_4 \cosh(k\xi) \quad (28)$$

k adalah frekuensi tanpa satuan:

$$k = \sqrt[4]{\frac{EI \omega^2 L^4}{\rho A}} \quad (29)$$

$G_1(\xi, \xi_f)$ adalah solusi tidak homogen:

$$G_1(\xi, \xi_f) = P_1 \cosh[k(\xi - \xi_f)] + P_2 \sinh[k(\xi - \xi_f)] + P_3 \cos[k(\xi - \xi_f)] + P_4 \sin[k(\xi - \xi_f)] \quad (30)$$

Dari kondisi kontinuitas:

$$\begin{aligned} G(\xi_f^+, \xi_f) - G(\xi_f^-, \xi_f) &= 0 \\ \theta(\xi_f^+, \xi_f) - \theta(\xi_f^-, \xi_f) &= 0 \\ M(\xi_f^+, \xi_f) - M(\xi_f^-, \xi_f) &= 0 \\ V(\xi_f^+, \xi_f) - V(\xi_f^-, \xi_f) &= 0 \end{aligned} \quad (31)$$

Sudut rotasi θ , momen M , dan gaya geser V , dapat dihitung sebagai berikut:

$$\theta(\xi, \xi_f) = \frac{dG}{dx} = \frac{1}{L} \frac{dG}{d\xi} \quad (32)$$

$$M(\xi, \xi_f) = EI \frac{d^2 G}{dx^2} = \frac{EI}{L^2} \frac{d^2 G}{d\xi^2} \quad (33)$$

$$V(\xi, \xi_f) = EI \frac{d^3 G}{dx^3} = \frac{EI}{L^3} \frac{d^3 G}{d\xi^3} \quad (34)$$

Dengan substitusi pers. (30), (32), (33), dan (34) ke dalam pers. (31), diperoleh:

$$\begin{aligned} P_1 + P_3 &= 0 \\ \frac{k}{L} (P_2 + P_4) &= 0 \end{aligned} \quad (35)$$

$$\frac{2EI k^2}{L^2} (P_1 - P_3) = 0$$

$$\frac{2EI k^3}{L^3} (P_2 - P_4) = 0$$

Pers. (35) dapat diselesaikan, dimana:

$$P_1 = 0; P_2 = \frac{L^2}{2EI k^2}; P_3 = 0;$$

$$P_4 = -\frac{L^2}{2EI k^2} \quad (36)$$

Getaran paksa dalam bentuk tertutup:

$$G(\xi, \xi_f) = C_1 \sin(k\xi) + C_2 \cos(k\xi) + C_3 \sinh(k\xi) + C_4 \cosh(k\xi) + \frac{L^2}{2EI k^2} \sinh[k(\xi - \xi_f)] H[k(\xi - \xi_f)] - \frac{L^2}{2EI k^2} \sin[k(\xi - \xi_f)] H[k(\xi - \xi_f)] \quad (37)$$

Pada balok dengan pegas rotasi dan pegas verikal Gambar 1, lendutan G seperti pada persamaan (37), Sementara Rotasi sudut, momen M , dan Geser V dapat dituliskan:

$$\theta[\xi, \xi_f] = \frac{k}{L} (C_1 \cos[k\xi] + C_2 \sin[k\xi] + C_3 \cosh[k\xi] + C_4 \sinh[k\xi] + \frac{L^3}{2EI k^3} \cosh[k(\xi - \xi_f)] H[\xi - \xi_f] - \frac{L^3}{2EI k^3} \cos[k(\xi - \xi_f)] H[\xi - \xi_f])$$

$$M[\xi, \xi_f] = \frac{EI k^2}{L^2} (-C_1 \sin[k\xi] - C_2 \cos[k\xi] + C_3 \sinh[k\xi] + C_4 \cosh[k\xi] + \frac{L^3}{2EI k^3} \sinh[k(\xi - \xi_f)] H[\xi - \xi_f] - \frac{L^3}{2EI k^3} \sin[k(\xi - \xi_f)] H[\xi - \xi_f]) \quad (39)$$

$$V[\xi, \xi_f] = \frac{EI k^3}{L^3} (-C_1 \cos[k\xi] + C_2 \sin[k\xi] + C_3 \cosh[k\xi] + C_4 \sinh[k\xi] + \frac{L^3}{2EI k^3} \cosh[k(\xi - \xi_f)] H[\xi - \xi_f] + \frac{L^3}{2EI k^3} \cos[k(\xi - \xi_f)] H[\xi - \xi_f]) \quad (40)$$

Kondisi batas untuk balok ini adalah:

$$M(0, \xi_f) = k_{R1} \theta(0, \xi_f)$$

$$M(\xi, \xi_f) = k_{R2} \theta(\xi, \xi_f) \quad (41)$$

$$V(0, \xi_f) = k_{V1} V(\xi, \xi_f)$$

$$V(\xi, \xi_f) = k_{V2} V(\xi, \xi_f)$$

Dengan substitusi pers. (37), (38), (39), dan (40) ke dalam kondisi batas pers. (41), persamaan dapat dituliskan dalam bentuk matriks. Untuk mencari solusi nontrivial $C1$ sampai $C4$, determinan matiks harus nol. Dengan mathematica wolfram persamaan tersebut dapat diselesaikan.

3. METODE ESTIMASI LENDUTAN DARI DATA PERCEPATAN

Studi terdahulu

Respon perpindahan dapat diperoleh dengan integrasi ganda sinyal percepatan. Namun dalam banyak kasus mengubah sinyal percepatan menjadi perpindahan melalui integrasi ganda tidak selalu memberikan solusi yang andal karena kondisi awal yang tidak diketahui dan *noise* yang tidak dapat dihindari dalam sinyal percepatan. Selain itu, proses koreksi yang diterapkan pada perkiraan perpindahan dari percepatan kemungkinan akan menghilangkan beberapa informasi penting, yang menyebabkan hilangnya beberapa data perpindahan, umumnya komponen frekuensi rendah dari gerakan struktur [5].

Salah satu pendekatan adalah estimasi pengukuran sebagai pusat orde kedua dari beda hingga (*second-order central finite difference*). Lendutan direkonstruksi dengan meminimalkan kesalahan kuadrat terkecil antara percepatan yang

diperkirakan dan percepatan yang diukur. Metode yang diusulkan adalah metode *filter Finite Impulse Response (FIR)* yang diformulasikan dalam domain waktu. Jendela pergerakan-waktu menyebabkan hilangnya bagian dari perpindahan yang direkonstruksi pada kondisi batas (*boundary*) rekaman perpindahan (awal dan akhir). Bagian yang hilang bisa jadi penting, terutama bagian awal karena dalam beberapa peristiwa perpindahan puncak terjadi di awal [6].

Berg dan Housner (1961) menerbitkan sebuah penelitian membahas tentang mendapatkan kecepatan dan lendutan dari integrasi data percepatan gerakan tanah yang kuat. Integrasi percepatan dengan asumsi kecepatan dan lendutan awal nol. Berg dan Housner membandingkan lendutan hasil integrasi dengan data lendutan, dan melihat hubungan yang realistis keduanya, dan berpendapat bahwa penyimpangan yang ada karena keterbatasan instrumen [7].

Trifunac (1971) mengusulkan pendekatan koreksi *baseline* dengan *high pass filtering* untuk data percepatan digital yang tidak terkoreksi. Dengan pendekatan barunya *classical parabolic baseline correction*. Berkesimpulann bahwa metode baru yang diusulkan lebih akurat tidak tergantung dari catatan panjangnya. Sedangkan akurasi koreksi parabola klasik dipengaruhi oleh panjang rekaman data [8].

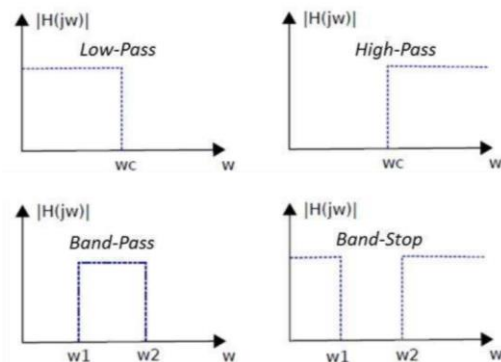
Yang (2006) mengusulkan melakukan koreksi *baseline* dalam domain waktu untuk pengukuran percepatan sebelum integrasi dengan *the least-square curve*, kemudian melakukan pemrosesan lebih lanjut dalam domain frekuensi dengan *window filtering* untuk menghapus sumber komponen frekuensi rendah dalam integrasi. Yang dkk. membandingkan pendekatan mereka dengan Trifunac (1971) dan lainnya. Pendekatannya memberikan hasil yang lebih baik dalam studi kasus mereka [9].

Filtering umumnya digunakan untuk menghilangkan komponen frekuensi tinggi (*low-pass filter*) atau komponen

frekuensi rendah (*high-pass filter*). *Filtering* telah banyak digunakan baik yang dikombinasi dengan koreksi *baseline* atau hanya *filtering* saja dan memberikan peningkatan dalam akurasi perkiraan lendutan [10].

Filter pada sinyal

Dikenal dua jenis filter yaitu analog dan digital. Dari cara kerjanya dalam domain frekuensi, diklasifikasikan menjadi: *Low-Pass*, *High-Pass*, *Band-Pass* dan *Band-Stop*.



Gambar 2. Respon ideal *Low-Pass*, *High-Pass*, *Band-Pass* dan *Band-Stop*

Dalam aplikasinya sulit mewujudkan filter sempurna seperti Gambar 2, semakin tinggi kompleksitas filter akan mendekati ideal.

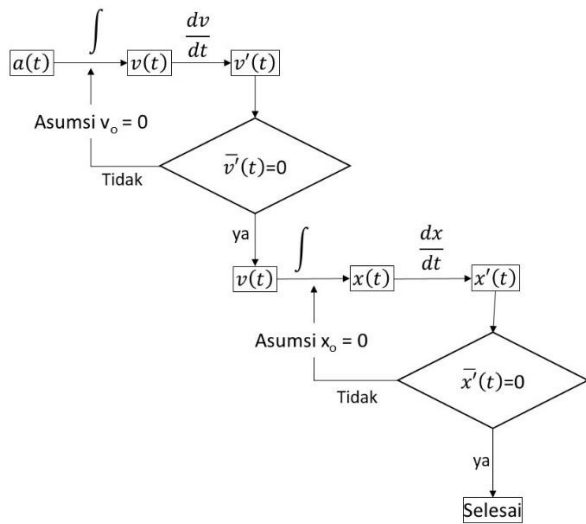
Menurut respon *impulsenya* filter digital dibagi dua, yaitu *Infinite Impulse Filter (IIR)* dan *Finite Impulse Response (FIR)*. Fungsi transfer dari FIR dan IIR disajikan berturut-turut pada pers. (42) dan (43).

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^N b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^M a_k z^{-k}} \quad (42)$$

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) z^{-k} \quad (43)$$

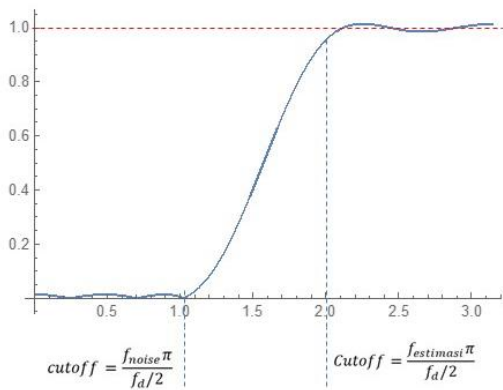
Algoritma Pemrosesan Sinyal Percepatan

Dalam penelitian ini diusulkan filtering data dua kali untuk memperoleh lendutan dari integrasi percepatan yang mendekati hasil pengukuran, dengan alur sebagai berikut:



Gambar 3. Algoritma usulan estimasi lendutan

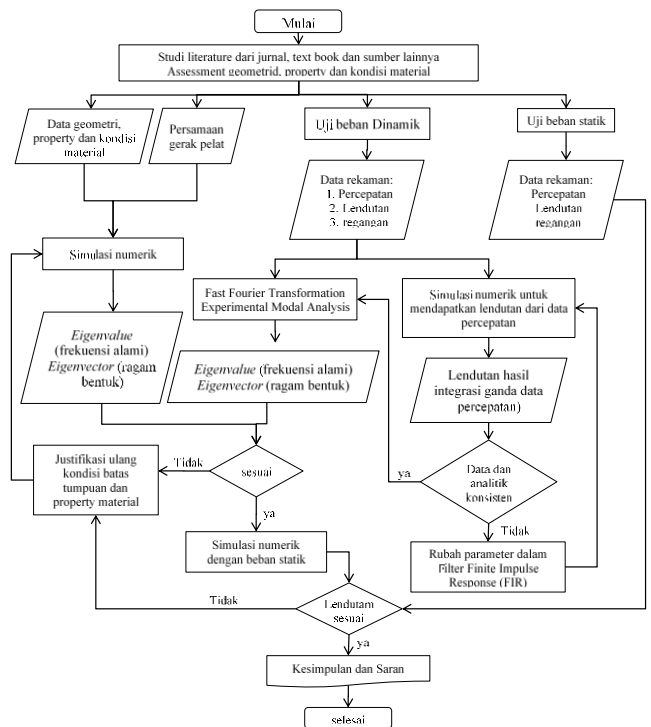
Highpass FIR dengan Equiripple Filter
 FIR dengan Equiripple Filter dirancang untuk memberikan respons amplitudo merata di rentang frekuensi tertentu.



Gambar 4. Disain highpass FIR Equiripple

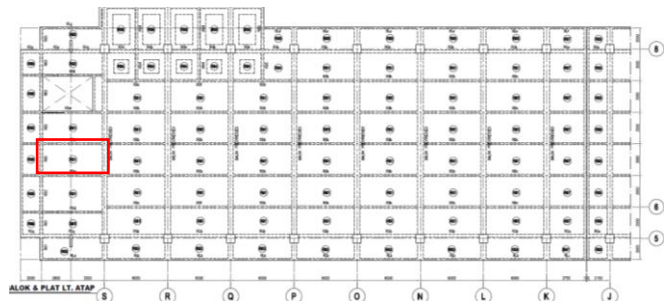
4. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan untuk mendapatkan metode koreksi baseline yang dapat memperbaiki estimasi lendutan dari data percepatan yang dapat diaplikasikan secara konsisten pada pelat 1 arah, hasilnya digunakan untuk memperbaiki asumsi kondisi batas tumpuan sehingga respon lendutan analitik mendekati hasil uji.

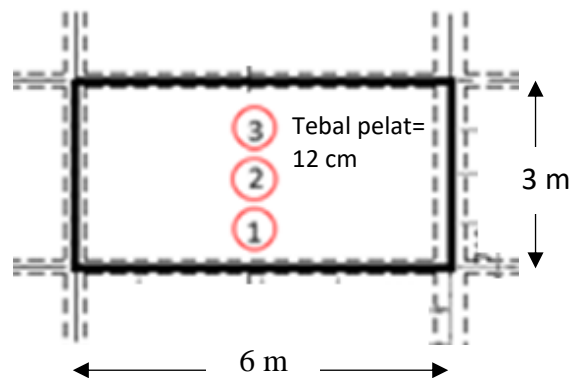


Gambar 5. Alur Penelitian

Uji statik dan uji dinamik dilakukan di lokasi yang dengan denah lokasi pengujian statik seperti pada gambar berikut:



Gambar 6. Lokasi Uji Beban



Gambar 7. Lokasi accelerometer dan LVDT

Pada uji statik, digunakan beban air dengan rencana maksimum 300 kg/m². Pembebanan dilakukan bertahap, 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Selanjutnya dilakukan *unloading* dengan tahapan yang sama. Sementara beban dinamik menggunakan orang yang melompat dari ketinggian 30 cm.

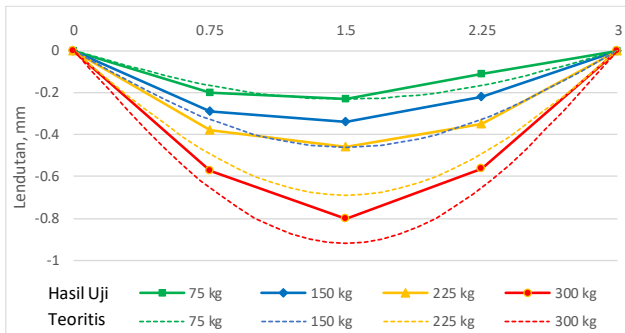


Gambar 8. Pembebanan uji statik dengan air

5. HASIL PENELITIAN

Uji Beban Statik

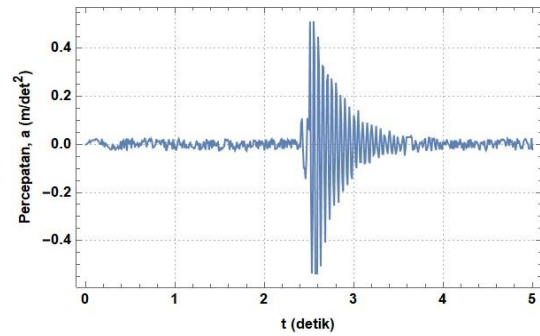
Hasil uji beban statik diperlihatkan pada Gambar 9, menunjukkan perbedaan jika dibandingkan dengan solusi exact dengan asumsi tumpuan sederhana.



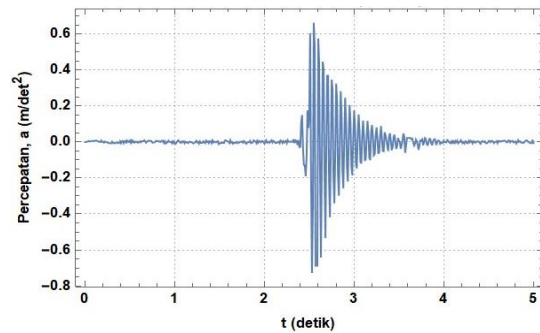
Gambar 9. Lendutan hasil uji dan teoritik

Rekaman Data Percepatan

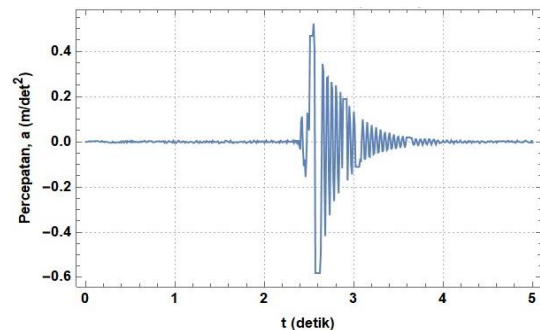
Percepatan direkam selama 60 detik dengan sampling rate 100 Hz, selanjutnya untuk mempercepat proses running data. Data yang digunakan 5 detik (Gambar 10):



Gambar 10. Data Percepatan arah z sensor-1



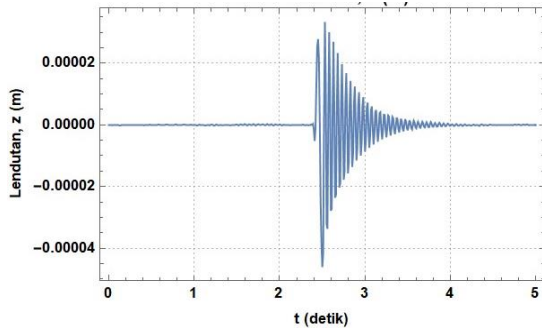
Gambar 11. Data Percepatan arah z sensor-2



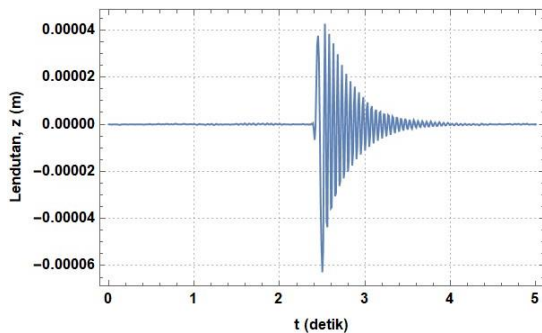
Gambar 12. Data Percepatan arah z sensor-3

Rekaman Data Lendutan

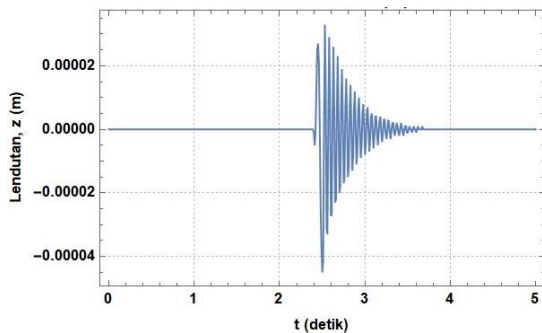
Perekaman dan pemotongan data dilakukan sama dengan data percepatan. Rekaman data lendutan seperti diberikan pada gambar-gambar berikut:



Gambar 13. Data Lendutan arah z sensor-1



Gambar 14. Data Lendutan arah z sensor-2

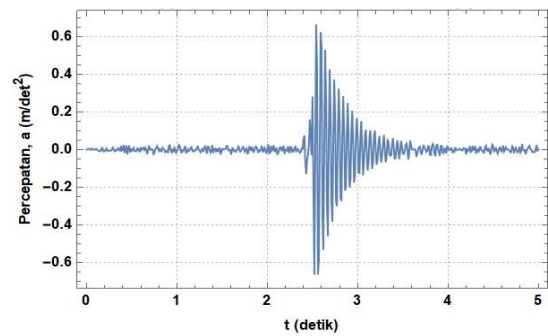


Gambar 15. Data Lendutan arah z sensor-3

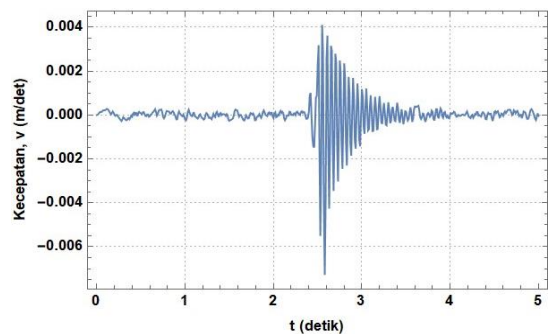
Penerapan Usulan Metode Filtering

FIR dilakukan dengan *Equiripple Filter*. *Equiripple* adalah filter FIR yang dirancang untuk memberikan respons amplitudo merata dengan gelombang ganda pada rentang frekuensi tertentu. *Highpass filter*, akan melewatkan frekuensi di atas titik potong (*cutoff frequency*) yang ditentukan, secara signifikan mengurangi frekuensi di bawah *cutoff frequency*. Respons amplitudo akan memiliki serangkaian puncak dan lembah yang sama di rentang frekuensi, sehingga mencapai keseragaman yang diinginkan.

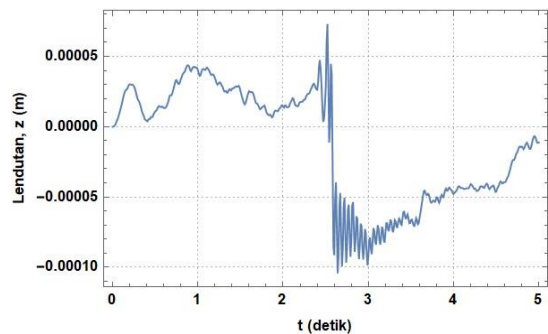
Penerapan Filtering untuk Estimasi Lendutan



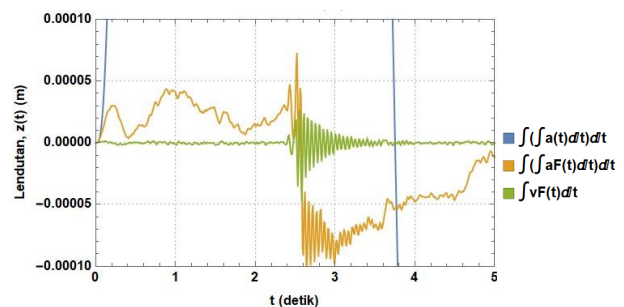
Gambar 16. Percepatan sensor-1 yang difilter



Gambar 17. Kecepatan dari integrasi Gambar 16

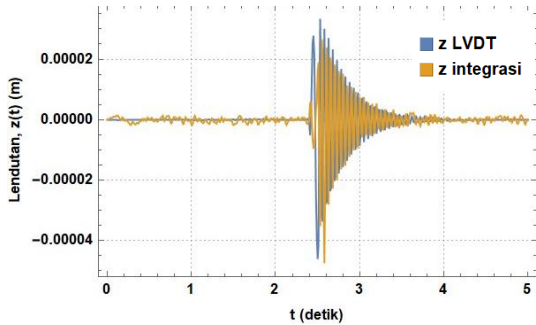


Gambar 18. Lendutan dari integrasi Gambar 17

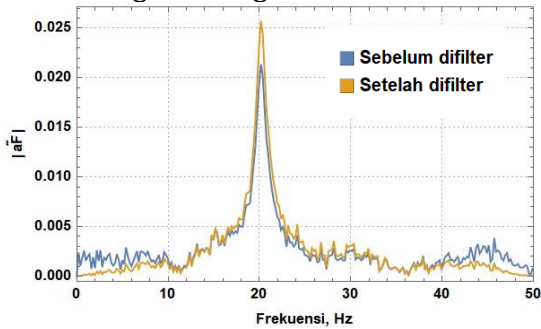


Gambar 19. Lendutan dari integrasi langsung data sensor-1 dibanding yang difilter 1 tahap dan 2 tahap

Perbandingan lendutan hasil integrasi dan hasil uji sensor-1 dan frekuensi alaminya diberikan pada Gambar 20 dan Gambar 21.

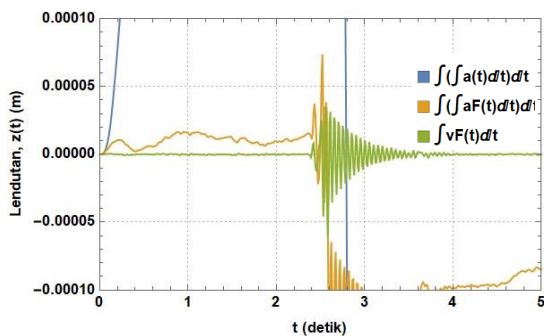


Gambar 20. Perbandingan lendutan dari integrasi dengan data LVDT-1

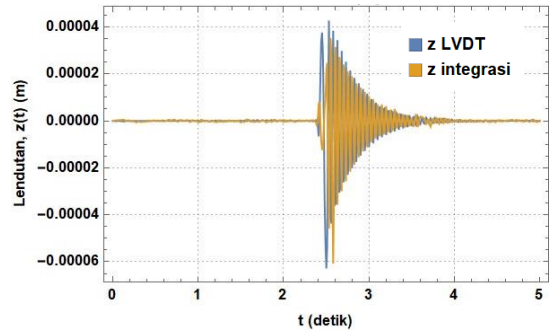


Gambar 21. Frekuensi data percepatan sensor-1 sebelum dan sesudah difilter

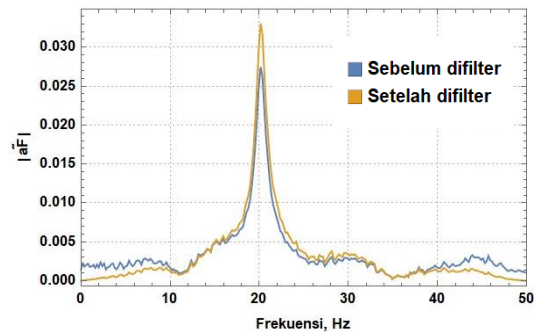
Dengan cara yang sama dilakukan pada data percepatan sensor-2 dan sensor-3, diperoleh



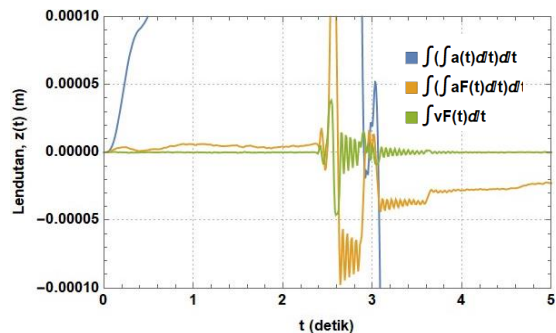
Gambar 22. Lendutan dari integrasi langsung data sensor-2 dibanding yang difilter 1 tahap dan 2 tahap



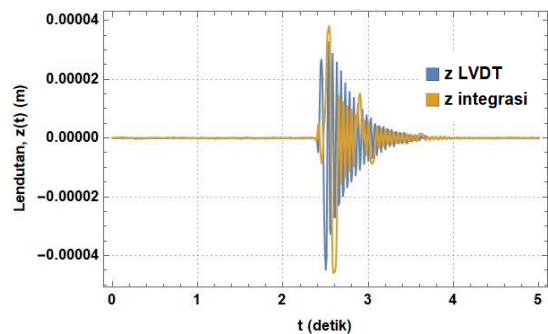
Gambar 23. Perbandingan lendutan hasil integrasi dengan data LVDT-2



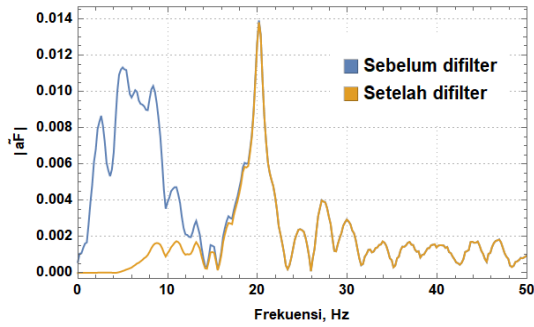
Gambar 24. Frekuensi data percepatan sensor-2 sebelum dan sesudah difilter Pemrosesan Data



Gambar 25. Lendutan dari integrasi langsung data sensor-3, difilter 1 tahap dan 2 tahap



Gambar 26. Perbandingan lendutan hasil integrasi dengan data LVDT-3



Gambar 27. Frekuensi data percepatan sensor-3 sebelum dan sesudah difilter

Tabel 1. Lendutan Max/ Min dari Hasil Integrasi Ganda dibanding data (LVDT)

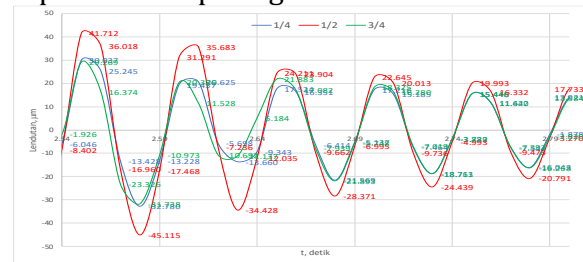
Sensor	Max/Min	Lendutan dinamik (mm)		Rasio Estimasi terhadap LVDT
		Estimasi dari integrasi	LVDT	
S1 (L/4)	Max	32.04	33	97.09%
	Min	-38.78	-39.3	98.68%
S2 (L/2)	Max	41.71	42.7	97.68%
	Min	-60.72	-62.8	96.69%
S3 (3L/4)	Max	32.93	33	99.79%
	Min	-43.11	-45	95.80%
		Rata-rata deviasi	97.62%	1.43%

Rasio lendutan estimasi dari integrasi ganda data percepatan menggunakan algoritma yang diusulkan rata-rata 97.62% dari data LVDT dengan standar deviasi 1.43%, nilai yang lebih kecil dibandingkan hasil LVDT disebabkan oleh filtering dengan *FIR equiripple highpass* dimana respons amplitudo filter ini akan membuat serangkaian puncak dan lembah gelombang yang sama pada rentang frekuensi tersebut, sehingga mencapai keseragaman yang diinginkan dalam mereduksi frekuensi rendah. Namun dengan perbedaan kurang dari 5% dengan standar deviasi cukup kecil 1.43%, dapat dianggap akurat untuk memprediksi parameter estimasi lendutan statik dengan perbaikan pada kondisi batas tumpuan.

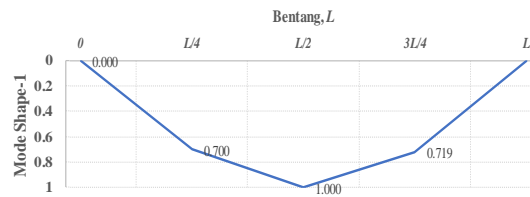
Perbaikan Kondisi Batas Tumpuan Berdasar Hasil Uji Dinamik

Adanya perbedaan solusi teoritik dengan data uji, perlu dilakukan perbaikan pada kondisi batas tumpuan. Mengingat fokusnya untuk memperoleh metode estimasi lendutan dari uji getar, maka perbaikan dilakukan mengacu pada hasil uji getar. Acuan untuk merubah adalah dari frekuensi dan mode shape.

Superimposed data lendutan hasil integrasi data sensor-1, 2 dan 3 seperti diperlihatkan pada gambar berikut:

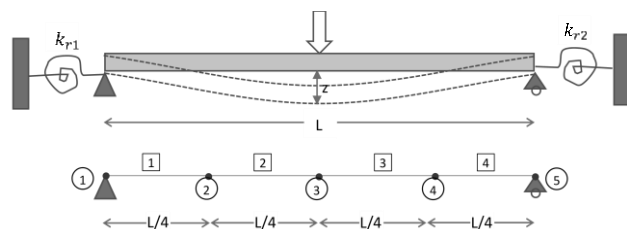


Gambar 28. Superimposed data lendutan hasil integrasi data sensor-1, 2 dan 3



Gambar 29. Mode Shape lendutan dari percepatan

Dengan mengodealisasikan tumpuan balok sebagai sendi dengan pegas rotasi, yang nilainya akan dicari dari *mode shape* yang sudah diketahui (Gambar 29). Model FEM seperti pada Gambar 30.



Gambar 30. Diskritisasi Elemen balok

$L_e = L/4$, dan konstanta *spring* k_{r1} pada tumpuan kiri dan k_{r2} kanan, dengan hubungan:

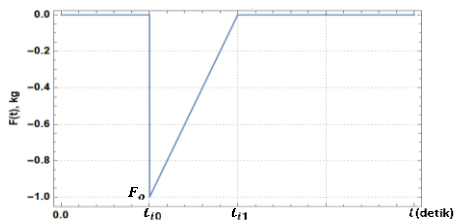
$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\}_i = 0 \quad (44)$$

Konstanta pegas rotasi tumpuan kiri dan kanan, $k_{r1} = 5,03 \times 10^4$ kg.m/rad dan $k_{r2} = 9.2 \times 10^4$ kg.m/rad.

Perhitungan Lentutan Dinamik dengan Penambahan Pegas Rotasi Tumpuan

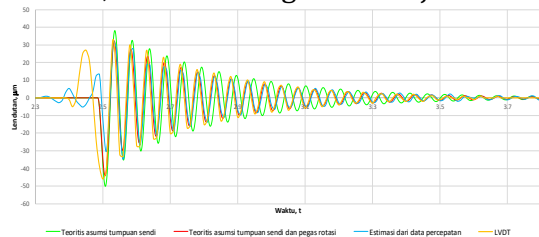
Pengecekan lendutan dinamik secara analitik dengan memasukkan konstanta pegas, pada persamaan getaram. Impulse dimodelkan sebagai beban segitiga:

$$F(t) = \begin{cases} 0 & t < t_{i0} \\ F_0 \frac{(t - t_{i0})}{t_{i1} - t_{i0}} & t_{i0} \leq t \leq t_{i1} \\ 0 & t > t_{i1} \end{cases} \quad (45)$$

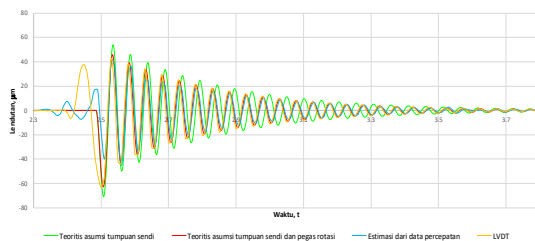


Gambar 31. Beban impulse

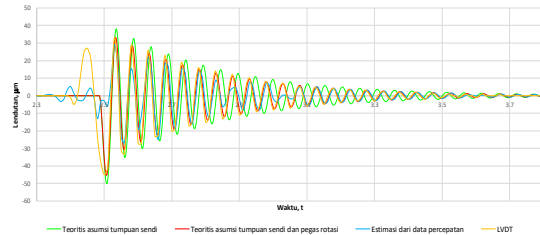
Berikut dapat dilihat perbandingan solusi analitik, estimasi dengan hasil uji.



Gambar 32. Lentutan dinamik di 1/4 bentang



Gambar 33. Lentutan dinamik di 1/2 bentang



Gambar 34. Lentutan dinamik di 3/4 bentang

Perbandingan lendutan teoritik terhadap data LVDT disajikan dalam tabel berikut:

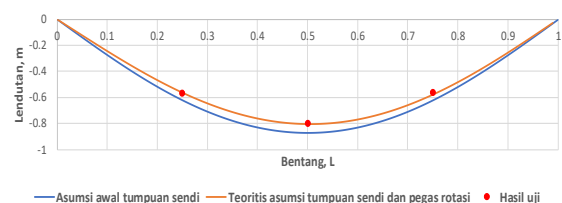
Tabel 2. Lentutan teoritik dengan modifikasi kondisi tumpuan dibandingkan data LVDT

Sensor	Max / Min	Lentutan dinamik (mm)		Rasio Solusi Teoritik terhadap LVDT
		Teoritik dengan modifikasi tumpuan	LVDT	
S1 (L/4)	Max	32.190	33.00	97.5%
	Min	-44.054	-39.28	112.1%
S2 (L/2)	Max	45.799	42.70	107.3%
	Min	-62.680	-62.80	99.8%
S3 (3L/4)	Max	33.131	33.00	100.4%
	Min	-45.342	-45.00	100.8%
Rata-rata				102.99%
deviasi				5.54%

Tabel 2 menunjukkan perbedaan antara solusi exact dibandingkan data LVDT menunjukkan nilai lebih besar 2.99% dengan standar deviasi 5.54%.

Lentutan Estimasi dibanding Hasil Uji

Dengan memasukkan konstanta pegas rotasi pada tumpuan sesuai estimasi dari uji dinamik pers. (7), diperoleh lendutan statik pada beban 100% sebagai berikut:



Gambar 35. Perbandingan lendutan statik asumsi awal, setelah perbaikan kondisi tumpuan dan hasil uji statik

Lendutan hasil estimasi dengan perbaikan kondisi batas tumpuan menggunakan hasil uji dinamik dibanding dengan lendutan hasil uji statis seperti pada Tabel 3:

Tabel 3. Lendutan estimasi dibanding hasil uji

Posisi	Lendutan Statik (mm)		Rasio lendutan estimasi terhadap LVDT
	Estimasi dengan modifikasi tumpuan	LVDT	
S1 (L/4)	-0.56	-0.57	98.8%
S2 (L/2)	-0.81	-0.80	100.7%
S3 (3L/4)	-0.58	-0.56	102.5%
Rata-rata deviasi		100.67%	1.85%

Rasio rata-rata lendutan estimasi terhadap hasil uji 100.67% ± 1.86%. Dengan rasio tersebut, metode estimasi lendutan dari data percepatan yang diusulkan dapat diterapkan.

6. KESIMPULAN

1. Dengan FIR Equiripple Highpass Filter, yang dioptimasi pada Panjang filter yang dilakukan pada dua tahap integrasi simpson 3/8 menghasilkan nilai lendutan dinamik 97.62% + 1.43% data LVDT.
2. Dari kesimpulan 1, mode shape lendutan cukup konfiden digunakan memprediksi pegas rotasi tumpuan. Dari frekuensi alami dan mode shape-1 diperoleh, $k_{r1}=5,03 \times 10^4$ kg.m/rad dan $k_{r2}=9.2 \times 10^4$ kg.m/rad..
3. Dengan mensubstitusi konstanta pegas ke persamaan lendutan dinamik diperoleh lendutan teoritis 102.99% + 5.54% terhadap data LVDT.

4. Dengan mensubstitusi konstanta pegas ke persamaan lendutan statik diperoleh lendutan teoritis 100.67% + 1.86% lendutan hasil uji. Selanjutnya kapasitas beban diketahui dengan memasukkan lendutan ijin pada persamaan lendutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SNI 2847:2019, "Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan", Pasal 27 Evaluasi Kekuatan Struktur Eksisting, 27.2.3.
- [2] S. C. Stiros. (2008). "Errors in velocities and displacements deduced from accelerographs: An approach based on the theory of error propagation", Soil Dyn. Earthq. Eng., vol. 28, no. 5, pp. 415-420.
- [3] Gere, J. M., Timoshenko, S. P., (1997). "Mechanics of Materials". HPB-Emerald, Dallas, TX, U.S.A.
- [4] Weaver Jr, William, Stephen P. Timoshenko, and Donovan Harold Young. (1990). "Vibration problems in engineering". John Wiley & Sons, New York City
- [5] Lee, H.S., Y.H. Hong, and H.W. Park. (2010). "Design of an FIR filter for the displacement reconstruction using measured acceleration in low-frequency dominant structures". International Journal for Numerical Methods in Engineering. 82(4), pp. 403-434.
- [6] F. Moschas, D. Mouzoulas, and S. Stiros, (2015). "Phase errors in accelerometer arrays: An analysis based on collocated sensors and FEM". Soil Dyn. Earthq. Eng., vol. 78, pp. 32-45.
- [7] Berg, G.V., and G.W., Housner. (1961). "Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion". Bulletin of the Seismological Society of America 51.2. pp. 175-189.
- [8] Trifunac, M.D. (1971). "Zero baseline correction of strong-motion accelerograms". Bulletin of the Seismological Society of America. 61(5): pp. 1201-1211.

- [⁹] Yang, J., J.B. Li, dan G. Lin (2006). “*A simple approach to integration of acceleration data for dynamic soil-structure interaction analysis*”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(8): pp. 725-734.
- [¹⁰] Park, J.W., S.H. Sim, and H.J. Jung. (1013). “*Displacement Estimation Using Multimetric Data Fusion*”. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(6): pp. 1675-168.