

Analisis konstruksi *dogging device* pada *tailrace gate* dengan menggunakan metode elemen hingga

Nazaruddin^{a,1}, Syafri^b, Rizki Rahman^c, Kaspul Anuar^d, Feblil Huda^e
^{a,b,c,d,e}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Riau, Pekanbaru

nazaruddin@eng.unri.ac.id

ABSTRACT

Stress and strain analysis is important in understanding beam behaviour. The finite element method (FEM) offers a powerful tool for achieving accurate and efficient results. This study provides a comprehensive overview of the analysis of nodal displacements in beams using the finite element method, explaining the basic principles, numerical techniques, and practical implications. By exploring this topic, engineers can increase their understanding of beam deformation and make informed design decisions. At the Koto Panjang hydropower plant, there is a problem with the tailrace gate mechanical system; namely, the sluice itself must be supported by four supporting devices (2 storage frames and 2 dogging devices). However, the two previously used storage frames are inoperable and will affect other devices. The Tailrace Gate weighs 11.6 tf, which will be distributed between the two dogging sets, and each dogging set will take half of that weight. Using finite element method (FEM) manual calculations, we found that the maximum nodal displacement is located at the dogging end of the device and has a displacement of 192.846 μm in the y-axis. Compared with the simulation analysis of CAD Software, we found that the maximum nodal displacement is at the same place (nodal) and 234.8 μm in the same direction. Then, we found that the error that occurred was 17.87%. From the same software, we find that the maximum working stress of the dogging device is 174.1 MPa, and the factor of safety is 1.19. Moreover, compared with the reference material properties and safety factor, we found that 2 dogging devices can be used to support the weight of the tailrace gate without 2 storage frames, but it will lower the safety factor and increase the risk of failure. In case of failure, the gate will be forced to close while the turbine is operating, which will damage the turbine. Then, we recommend that other supporting devices be repaired and maintained to increase safety and reduce the risk of failure.

Keywords: Stress, Strain, failure, safety factor, dogging device

Received 30 September 2023; **Presented** 5 October 2023; **Publication** 27 May 2024

PENDAHULUAN

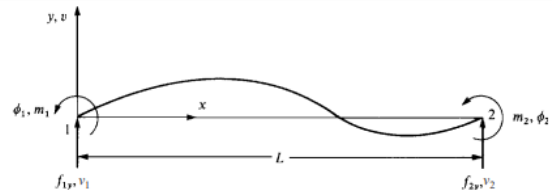
Analisis struktur merupakan hal yang penting di bidang teknik, terutama teknik mesin dan teknik sipil. Perilaku struktur akibat pembebanan luar dapat diramalkan melalui analisis ini. Selain itu juga dapat diketahui reaksi tumpuan dan gaya-gaya dalam yang bekerja diseluruh bagian struktur tersebut. Hal lain yang merupakan hasil dari analisis struktur berupa tegangan dan regangan, defleksi dan factor keamanan dari struktur.

Untuk struktur yang kompleks, dibutuhkan suatu metode analisis yang salah satunya adalah metode numerik. Metode ini dapat memecahkan permasalahan teknik yang seolah mustahil diselesaikan secara analitik. Terdapat banyak jenis metode numerik yang salah satunya adalah Metode Elemen Hingga (MEH). Proses inti dari MEH adalah membagi problem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil atau elemen-elemen dimana solusi yang lebih sederhana dapat diperoleh dengan mudah.

Pada Unit Layanan Pembangkit Listrik Tenaga Air (ULPLTA) Koto Panjang terdapat bagian-bagian penting berupa bendungan (dam), pipa pesat (*penstock*), turbin, generator, trafo, *spillway gate*, dan *tailrace gate*. Secara aktual, alat-alat yang bekerja pada sistem pembangkit kebanyakan mengalami pembebanan eksternal. Contohnya pada sepasang struktur *dogging device* yang bekerja menahan beban dari *tailrace gate* dimana seharusnya beban oleh *tailrace gate* juga ditahan atau ditopang oleh sepasang (2 buah) *frame* yang posisinya terletak dibawah *tailrace gate* yang sekarang tidak dapat beroperasi. Dan apabila terjadi kegagalan pada struktur *dogging device* tersebut yang mengakibatkan jatuhnya *gate* sehingga menutup secara paksa keluaran air dari turbin yang dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan besar (*massive*) pada turbin yang sedang beroperasi. Oleh sebab itu, dilakukanlah analisis konstruksi pada *dogging device* yang diberikan pembebanan oleh *tailrace gate* dengan menggunakan MEH.



Gambar 1. *Spillway Gate* (Kiri) dan *Tailrace Gate* (Kanan)



Gambar 2. Struktur Beam [4]

TINJAUAN PUSTAKA

Metode Kekakuan

Dengan metode kekakuan ini sebenarnya yang dicari adalah hubungan gaya dengan lendutan, atau dinyatakan secara matematis:

$$\{F\} = [K]\{D\} \quad (1)$$

Dimana $\{F\}$ menyatakan gaya-gaya yang timbul pada titik-titik diskrit akibat diberikannya lendutan $\{D\}$ pada titik-titik tersebut. Tentu saja gaya $\{F\}$ adalah gaya yang koresponding dengan lendutan $\{D\}$. Sedangkan $[K]$ menyatakan kekakuan dari struktur. Metode kekakuan ini juga disebut metode lendutan (*displacement method*).

Kekakuan elemen lokal $[k]$ dan global $[K]$ pada MEH dinyatakan dalam bentuk matriks sebagai berikut [4].

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \dots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \dots & K_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Struktur Beam

Beam adalah batang lurus ditumpu di dua atau lebih titik, mendapatkan pembebanan tunggal, merata maupun beban kombinasi (termasuk beban momen) dimana defleksi yang terjadi terdiri atas defleksi linier berarah tegak lurus sumbu aksial dan puntiran [7].

Pada batang dimaksud, sumbu longitudinal terletak pada sumbu x sedangkan sumbu transversal adalah sumbu y . Batang memiliki konstanta momen inersia I , modulus elastisitas E dan panjang L . Batang dianggap memiliki 2 derajat kebebasan pada setiap titik nodal yaitu defleksi transversal v akibat gaya transversal y dan slope (sudut rotasi) ϕ yang merupakan turunan v terhadap x ($\partial v / \partial x$) akibat momen *bending* M tidak terjadi pergeseran pada arah x . Berdasarkan analisis statika struktur, defleksi yang terjadi pada *beam* untuk daerah tanpa pembebanan dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = 0 \quad (4)$$

yang menghasilkan penyelesaian:

$$v(x) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3 \quad (5)$$

Dalam bentuk matriks dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & L & L^2 & L^3 \\ 0 & 1 & 2L & 3L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

atau

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} = \frac{1}{L^3} \begin{bmatrix} L^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L^2 & 0 & 0 \\ -3L & -2L^2 & 3L & -L^2 \\ 2 & L & -2 & L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

jika nilai matriks a pada persamaan (11) dikembalikan pada persamaan (5) maka akan didapat:

$$v(x) = f_1(x)v_1 + f_2(x)\theta_1 + f_3(x)v_2 + f_4(x)\theta_2 \quad (12)$$

Untuk menemukan matriks kekakuan, diketahui bahwa dari Teorema Castigliano untuk *beam* berlaku persamaan:

$$U = \frac{EI}{2} \int_0^L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx ; Y_i = \frac{\partial U}{\partial v_i} \quad (17)$$

maka dengan mengikuti prosedur akan diperoleh persamaan berikut:

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ M_1 \\ Y_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} 12/L^2 & 6/L & -12/L^2 & 6/L \\ 6/L & 4/1 & -6/L & 2/1 \\ -12/L^2 & -2L^2/1 & 12/L^2 & -L^2/1 \\ 6/L & 2/1 & -6/L & 4/1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \theta_1 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (18)$$



Gambar 3. Dogging Device

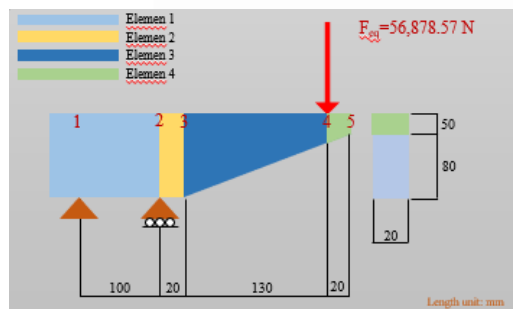
METODOLOGI

Tailrace gate merupakan salah satu dari jenis gate yang beroperasi pada PLTA. Dimana fungsi dari gate ini adalah sebagai tempat laluan air bekas pemakaian turbin yang ingin dibuang kembali ke sungai. Kondisi gate dibiarkan tetap terbuka saat unit turbin sedang beroperasi dan akan ditutup apabila ingin dilakukan perawatan (*maintenance*) secara keseluruhan.

Gate dioperasikan menggunakan crane sebagai alat bantu angkat gate. Pada kondisi tertutup, gate ditahan oleh beberapa support device yakni sepasang dogging device dan sepasang storage frame.

Analisis dilakukan dengan beberapa tahapan seperti pengambilan data berupa dimensi dogging device menggunakan alat ukur seperti tape measure yang memiliki ketelitian 1 cm. Data lainnya seperti massa dari tailrace gate didapatkan melalui arsip perusahaan. Pengambilan data dimensi dogging device dilakukan dengan hati-hati dan menggunakan perlengkapan K3 dikarenakan medan untuk pengambilan data tersebut cukup berbahaya. Dan tentu saja pengambilan data harus didampingi oleh karyawan perusahaan.

Untuk melakukan perhitungan manual MEH, diperlukan Diagram Benda Bebas (DBB) benda yang akan dianalisis yang dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. DBB Struktur

Struktur beam (dogging device) dibagi menjadi 4 (empat) elemen dan memiliki 5 (lima) jumlah nodal. Dimana pada nodal 1 diberikan tumpuan engsel, pada nodal 2 diberikan tumpuan rol, dan pada nodal 4 diberikan pembebanan eksternal statis oleh tailrace gate dimana besar beban dibagi 2 karena terdapat 2 dogging device yang menahan beban tersebut yang bentuknya dianggap simetris sehingga nilai beban terdistribusi merata.

Berikut dimensi-dimensi yang diperlukan untuk melakukan perhitungan manual berupa tabel.

Tabel 1. Data yang Diperoleh dari Arsip Perusahaan

Dogging Device	
Material	: JIS SM490YA
Tegangan luluh	: 325-365 N/mm ²
Modulus Elastisitas	: 200 GPa
Jenis struktur	: Beam
Jumlah	: 2 buah
Tailrace Gate	
Berat gate	: 11,6 tf

Tabel 2. Dimensi Dogging Device

Elemen 1		
Besaran	Simbol	Nilai
Panjang	L	0.08 m
Modulus Elastisitas	E	200 GPa
Inersia Planar	I	(366.17) (10) ⁴ mm ⁴
Elemen 2		
Besaran	Simbol	Nilai

Panjang	L	0.02 m
Modulus Elastisitas	E	200 GPa
Inersia Planar	I	(366.17) (10) ⁴ mm ⁴
Elemen 3		
Besaran	Simbol	Nilai
Panjang	L	0.13 m
Modulus Elastisitas	E	200 GPa
Inersia Planar	I	(216.52) (10) ⁴ mm ⁴
Elemen 4		
Besaran	Simbol	Nilai
Panjang	L	0.02 m
Modulus Elastisitas	E	200 GPa
Inersia Planar	I	(43.85) (10) ⁴ mm ⁴

Nilai matriks kekakuan elemen dapat diperoleh menggunakan persamaan (18) dengan menggunakan data-data yang telah diperoleh sebelumnya.

$$= 10^8 \begin{bmatrix} 171.642 & 6.866 & -171.642 & 6.866 & 0 & 0 \\ 6.866 & 0.366 & -6.866 & 0.183 & 0 & 0 \\ -171.642 & -6.866 & 11156.742 & 102.985 & -10985.1 & 109.851 \\ 6.866 & 0.183 & 102.985 & 1.831 & -109.851 & 732.34 \\ 0 & 0 & -10985.1 & -109.851 & 11008.752 & -108.314 \\ 0 & 0 & 109.851 & 0.732 & -108.314 & 1.598 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -23.652 & -1.537 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.537 & 0.067 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{1y} \\ M_1 \\ F_{2y} \\ M_2 \\ F_{3y} \\ M_3 \\ F_{4y} \\ M_4 \\ F_{5y} \\ M_5 \end{Bmatrix}$$

Dengan menyelesaikan pengoperasian matriks tersebut, maka didapatkan hasil akhir berupa pergeseran nodal secara vertikal dan pergeseran sudut.

$$\begin{Bmatrix} \phi_2 \\ v_3 \\ \phi_3 \\ v_4 \\ \phi_4 \\ v_5 \\ \phi_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.000233001 \\ 0.000006886 \\ 0.000450468 \\ 0.000161639 \\ 0.001560367 \\ 0.000192846 \\ 0.001560367 \end{Bmatrix}$$

$$[k^{(1)}]_{*} = \begin{bmatrix} 1716.422 & 68.657 & -1716.422 & 68.657 \\ 68.657 & 3.662 & -68.657 & 1.831 \\ -1716.422 & -68.657 & 1716.422 & 68.657 \\ 68.657 & 1.831 & 68.657 & 3.662 \end{bmatrix}$$

$$[k^{(2)}]_{*} = \begin{bmatrix} 1,098.510 & 10.985 & -1,098.510 & 10.985 \\ 10.985 & 0.146 & -10.985 & 0.073 \\ -1,098.510 & -10.985 & 1,098.510 & -10.985 \\ 10.985 & 0.073 & -10.985 & 0.146 \end{bmatrix}$$

$$[k^{(3)}]_{*} = 10^7 \begin{bmatrix} 236.523 & 15.374 & -236.523 & 15.374 \\ 15.374 & 1.534 & -15.374 & 0.766 \\ 236.523 & -15.374 & 236.523 & -15.374 \\ 15.374 & 0.766 & -15.374 & 1.534 \end{bmatrix}$$

$$[k^{(4)}]_{*} = 10^8 \begin{bmatrix} 1315.350 & 13.153 & -1315.350 & 13.153 \\ 13.153 & 0.175 & -13.153 & 0.088 \\ -1315.350 & -13.153 & 1315.350 & -13.153 \\ 13.153 & 0.088 & -13.153 & 0.175 \end{bmatrix}$$

Matriks kekakuan global total dapat diperoleh dengan menggabungkan seluruh matriks kekakuan elemen yang didapatkan sebelumnya, sehingga

$$v_1 = \phi_1 = v_2 = F_{1y} = M_1 = F_{2y} = M_2 = F_{3y} = M_3 = M_4 = F_{5y} = M_5 = 0 \text{ dan}$$

$$F_{4y} = 56878.57 \text{ N}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ v_2 \\ \phi_2 \\ v_3 \\ \phi_3 \\ v_4 \\ \phi_4 \\ v_5 \\ \phi_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 56878.57 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

atau

$$\phi_2 = 0.000233001 \text{ rad}$$

$$v_3 = 6.886 \mu\text{m}$$

$$\phi_3 = 0.000450468 \text{ rad}$$

$$v_4 = 161.639 \mu\text{m}$$

$$\phi_4 = 0.001560367 \text{ rad}$$

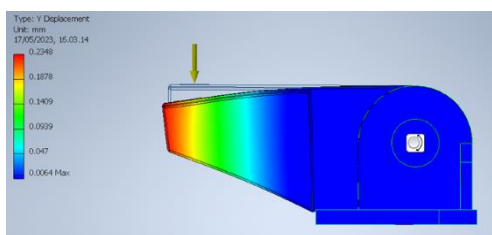
$$v_5 = 192.846 \mu\text{m}$$

$$\phi_5 = 0.001560367 \text{ rad}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil dari perhitungan manual yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa nilai perpindahan nodal y maksimum yang terjadi pada dogging device akibat pembebanan statis yang diberikan oleh gate adalah sebesar 192.846 μm kearah bawah yang terletak pada posisi nodal 5.

Hasil tersebut dibandingkan dengan hasil analisis yang diperoleh dari simulasi aplikasi software CAD.



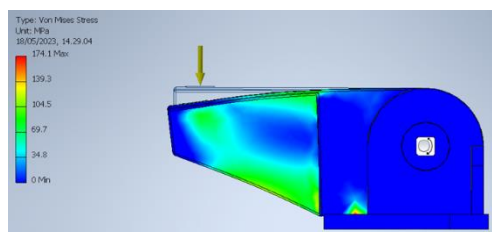
Gambar 5. Hasil Simulasi pada Software CAD Berupa Perpindahan Nodal Sumbu y

Pada aplikasi ditemukan bahwa perpindahan nodal sumbu y maksimum juga terjadi pada ujung struktur (*beam*) dengan nilai defleksi sebesar 234.8 μm .

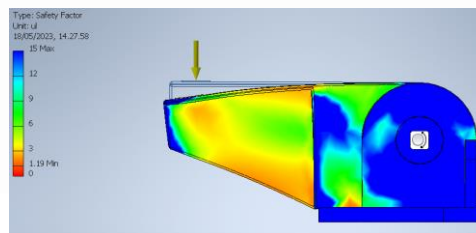
Dengan melakukan perbandingan hasil perhitungan manual terhadap hasil simulasi aplikasi software CAD, maka ditemukanlah *error* sebesar

$$\% \text{ error} = \left| \frac{234.8 \mu\text{m} - 192.846 \mu\text{m}}{234.8 \mu\text{m}} \right| \times 100 \% = 17.87 \%$$

Pada aplikasi juga diperoleh nilai tegangan von mises maksimum sebesar 174.1 MPa dan *safety factor* sebesar 1.19



Gambar 6. Hasil Simulasi Analisis Software CAD Berupa Tegangan Von Mises



Gambar 7. Hasil Simulasi Analisis Software CAD Berupa *Safety Factor*

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat diberikan adalah nilai pergeseran nodal maksimum pada *dogging device* yang mengalami pembebanan akibat *gate* adalah sebesar 192.846 μm kearah bawah untuk metode perhitungan manual dan 234.8 μm untuk hasil simulasi analisis aplikasi software CAD dengan *error* sebesar 17.87%. Dimana apabila ditinjau dari dimensi *dogging device* ataupun *gate*, dapat dikatakan bahwa perbedaan atau selisih defleksi yang dihasilkan melalui dua metode analisis tersebut masih cukup kecil (41.954 μm) apabila diobservasi secara langsung. Nilai *error* yang cukup besar dapat disebabkan oleh bentuk geometris pada elemen 3 dan 4 dimana disepanjang dimensi panjangnya terdapat perbedaan penampang yang berakibat kurang akuratnya nilai inersia pada titik terjadinya pembebanan atau defleksi maksimum apabila dilakukan perhitungan secara manual.

Sedangkan untuk nilai *safety factor* yang dihasilkan cukup rendah yakni sebesar 1.19 sehingga penulis menyimpulkan bahwa hal ini cukup berbahaya apabila terdapat gangguan eksternal dan perlu dilakukan tindakan pencegahan seperti perancangan ulang *dogging device* atau penambahan struktur lain sehingga pembebanan yang terjadi dapat terdistribusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Supartono, F.X., & Boen, T. Analisa Struktur Dengan Metode Matriks. Jakarta: Universitas Indonesia. 1980.
- [2] Wang, C. K. Pengantar Analisa Struktur Dengan Cara Matriks. (Ir. Ismoyo P.h., Penerjemaah). Jakarta: Erlangga. 1985.
- [3] Cook, R. D., Malkus, D.S., & Plesha, M.E. *Cincepts And Application of Finite Element Analysis Third Edition*. New York: Jhon Wiley & Sons. 1988

- [4] Logan, D. L. *A First Course in The Finite Element Method Fourth Edition*. New York: Cengage Learning. 2011
- [5] Kassimali, A. *Matrix Analysis of Structures*. New York: Cengage Learning. 2012.
- [6] Pratomo, W. H. *Dasar-Dasara Metode Elemen Hingga*. Bandung: Danamartha Sejahtera Utama. 2005.
- [7] Reddy, J. N. *Introduction to The Finite Element Method*. Texas. 2019.

NOMENKLATUR

E	Modulus elastisitas (N/m ²)
L	Panjang elemen (m)
I	Inersia planar (m ⁴)
ϕ	Pergeseran sudut (rad)
v	Perpindahan vertikal (m)
[k]	Matrik kekakuan lokal (N/m)
[K]	Matrik kekakuan global (N/m)
[F]	Matriks gaya (N)
[D]	Matrik perpindahan (m)