

ANALISIS SIFAT MEKANIK MODIFIKASI KEMIRINGAN MERCU *SPILLWAY* TIPE OGEE BENDUNGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA SOFTWARE ELMER

San Arnolus Kain, Ali Warsito, Minsyahril Bukit, Albert Zicko Johannes

*Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Jln. Adisucipto-
Penfui Email: sanarnolus@gmail.com*

Abstrak

Penelitian tentang analisis sifat mekanik modifikasi kemiringan mercu Spillway Tipe Ogee menggunakan metode elemen hingga software ELMER telah dilakukan. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis besar tegangan, regangan dan deformasi pada mercu spillway bendungan tipe ogee dengan metode elemen hingga. Struktur bendungan dimodelkan dengan bantuan software FreeCAD, kemudian perhitungan metode elemen hingga dengan software Elmer dan dilanjutkan analisis dengan software ParaView. Berdasarkan hasil analisis mercu Spillway tipe Ogee dengan modifikasi kemiringan 41.18°, 45° dan 48.36° menunjukkan tegangan maksimum pada kemiringan 41.18° terjadi pada bagian dinding mercu spillway pada arah sumbu z dengan nilai $2.2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, sedangkan tegangan maksimum pada kemiringan 45° dan 48.36° terjadi pada bagian segmen dasar mercu spillway pada arah sumbu xy dengan nilai secara berurutan $2.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ dan $3.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Regangan yang terjadi pada ketiga modifikasi kemiringan berurutan sebesar 35×10^{-8} , 47.5×10^{-8} , dan 65×10^{-8} . Deformasi yang terjadi pada ketiga modifikasi berurutan sebesar $1.4 \times 10^{-5} \text{ m}$, $1.9 \times 10^{-5} \text{ m}$ dan $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}$. Dari analisis sifat mekanik modifikasi kemiringan mercu Spillway Tipe Ogee dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai regangan dan deformasi semakin besar jika kemiringan mercu Spillway bertambah. Sedangkan nilai tegangan maksimum terjadi pada bagian dinding dan bagian segmen dasar mercu spillway.

Kata Kunci : *Metode Elemen Hingga, Spillway ogee, tegangan, regangan, deformasi.*

Abstract

Research on the mechanical properties of the modification of the ogee spillway dam with slope variations has been carried out using the finite element method ELMER software. The purposes of this study were to analyze the magnitude of stress, strain and deformation on the ogee spillway. The structure of the dam was modeled with a FreeCAD software, then the calculation of the finite element method with an Elmer software and the analysis used ParaView software. Based on the analysis of the ogee spillway type with slopes of 41.18°, 45° and 48.36°, the maximum stress at the slope of 41.18° occurs in the wall section of the crest spillway in the z axis direction with a value of $2.2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, while the maximum stress at the slope of 45° and 48.36° occurs in the base segment of the crest spillway in the xy axis direction with values of $2.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ and $3.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ respectively. The strains that occurs in the three sequential tilt modifications were 35×10^{-8} , 47.5×10^{-8} , and 65×10^{-8} . The deformation occurs in the three sequential modifications of $1.4 \times 10^{-5} \text{ m}$, $1.9 \times 10^{-5} \text{ m}$ and $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}$. From the analysis of the mechanical properties of the modification of the crest spillway ogee Type it can be concluded that the change in strain and deformation values is greater if the slopes of the crest spillway increases. While, the maximum stress value occurs in the wall and the base segment of the mercu spillway.

Keywords : *Finite element method, spillway ogee, stress, strain, deformation.*

PENDAHULUAN

Musim kemarau dan musim penghujan merupakan dua musim berbeda di Indonesia yang beriklim tropik basah yang dipengaruhi angin monsoon. Untuk berbagai kawasan - rata curah hujan tahunan ada yang mulai kurang dari 1000 mm/tahun untuk kawasan semi-arid tropik, 1780 s/d 3175 mm/tahun untuk kawasan dataran rendah, sampai dengan 6100 mm/tahun untuk kawasan pegunungan [1].

Iklim Nusa Tenggara Timur tergolong daerah tropis kering (semi-arid) dengan curah hujan rata-rata 1200 mm/tahun. Musim hujan biasanya memiliki periode curah hujan yang pendek dengan intensitas yang tinggi dari pertengahan Desember hingga Maret dan sering menyebabkan banjir. Selama 8 bulan lainnya adalah musim kemarau, debit air sangat berkurang, daerah pertanian mengalami kekeringan, pasokan sumber air baku tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan masyarakat perkotaan dan pedesaan [2]. Salah satu upaya untuk memenuhi kebutuhan air baku di wilayah Kupang NTT adalah membangun bendungan-bendungan salah satunya adalah bendungan Raknamo. Lokasi bendungan Raknamo terletak pada koordinat $10^{\circ} 07' 08''$ LS dan $123^{\circ} 55' 54''$ [3]. Bendungan Raknamo dibangun pada tanah seluas 147 Ha dan mempunyai kapasitas tampung sebanyak 14,09 juta m^3 air [4].

Bendungan sendiri harus memenuhi berbagai persyaratan, salah satunya adalah bendungan harus mampu menampung cukup air yang kemudian akan digunakan ketika musim kemarau datang. Saat musim hujan tiba, bendungan harus mampu mengalirkan kelebihan air luapan yang diserap oleh bendungan. Berlebihnya air yang ditampung oleh bendungan akan mengakibatkan tinggi muka air bendungan naik. Kenaikan tersebut dapat membahayakan bendungan bila tidak dilimpaskan untuk mengurangi tinggi muka air bendung [5].

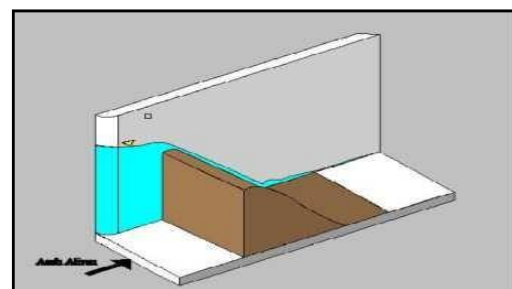
Kapasitas luapan yang tepat diperlukan untuk mencegah kerusakan pada struktur tubuh bendungan. *Spillway* adalah bangunan pelengkap bendungan yang digunakan untuk mengalihkan air luapan agar tidak merusak bendungan. Pada tahun 2015 Haslindar [5]

telah melakukan penelitian dengan memodifikasi mercu *spillway* bendungan tipe ogee menjadi tipe trapesoid. Modifikasi mercu *spillway* tersebut mempengaruhi perubahan tegangan pada segmen dasar mercu pada kedua model mercu dimana segmen tersebut berhubungan langsung dengan mercu *spillway* yaitu segmen dasar mercu. Dari referensi tersebut salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis suatu struktur bendungan ialah Metode Elemen Hingga. Metode Elemen Hingga merupakan metode pendekatan yang dapat digunakan pada banyak permasalahan berbagai bidang ilmu pengetahuan [5–10]. Metode ini dapat menghasilkan perhitungan yang lebih teliti karena dapat memodelkan dengan elemen kecil yang dapat menyesuaikan bentuk benda, dan bisa memberikan distribusi besarnya tegangan pada masing-masing titik dalam komponen.

MATERI DAN METODE

Spillway Mercu Ogee

Mercu Ogee *Spillway* adalah mercu jalan lintas yang berbentuk seperti tirai yang meluap dengan ambang yang tajam. Oleh karena itu, ketika bendungan mengalirkan air di saluran yang dirancang, punggungan ini tidak memberikan tekanan sub-atmosfer pada permukaan punggungan. Ketika laju aliran rendah, air memberikan tekanan ke bawah pada mercu [11].



Gambar 1: Mercu Ogee [12]

Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah suatu metode pendekatan yang digunakan untuk memecahkan permasalahan berupa persamaan dengan menggunakan rumus integral dalam sistem aljabar linear dan non linear dengan ketelitian yang cukup akurat. Metode ini sangat fleksibel karena bentuk struktur yang

rumit dan kompleks selalu di sederhanakan menjadi elemen–elemen kecil yang lebih sederhana. Penyederhanaan ini memungkinkan suatu permasalahan struktur yang kompleks dapat diselesaikan dengan hasil yang dapat dipertanggungjawabkan. Keunggulan dari penggunaan metode elemen hingga adalah elemen–elemen yang terbentuk akan mendekati nilai elemen sebenarnya.

Dalam perhitungannya dalam tiap elemen dimodelkan oleh matriks persamaan (1) dan (2).

$$k = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} k_{ii} & -k_{ij} \\ -k_{ji} & k_{jj} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\{F\} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & k_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ d_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dimana :

- k = konstanta pegas pada satu elemen (N/m),
- k_{ij} = konstanta pegas local antara nodal i dan j (N/m),
- E = Modulus Young (Pa)
- A = Luas elemen (m²),
- L = Panjang awal elemen (m)
- F = Vektor Gaya Global (N)
- d_i = Vektor pergeseran elemen ke-i (m),

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan beberapa Langkah yaitu : melakukan pengumpulan data parameter, pembentukan model CAD, proses perhitungan dengan metode elemen hingga, kemudian analisis hasil.

Data-data parameter yang dibutuhkan dalam memodelkan diambil dari data bendungan Raknamo, dapat dilihat pada tabel 1,2, dan 3.

Tabel 1. Data teknis mercu *Spillway* Tipe Ogee bendungan Raknamo

Jenis bangunan	<i>Mercu Spilway Tipe Ogee</i>
Tinggi mercu	4 m
Lebar	4 m
Panjang mercu	40 m
Massa jenis air	1000 kg/m ³
Elevasi muka air maksimum	8 m

Sumber : [13]

Tabel 2. Data standar parameter material beton

Side	Variable	value and coefficients
Young`s modulus	E ₀	42 Gpa
Modulus of elasticity	E	20 Gpa
Poisson`s coeffient	V	0.2
Density	P	2300 kg/m ³

Sumber : [14]

Tabel 3 Variasi modifikasi *spillway* mercu ogee

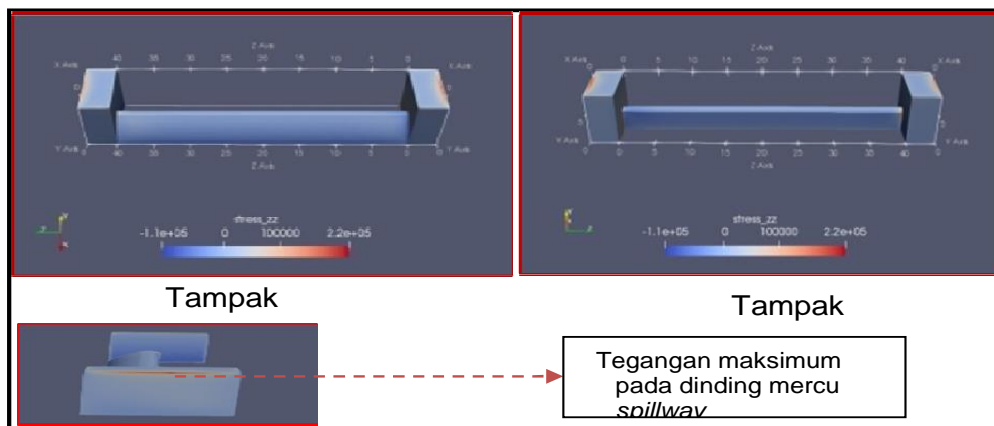
Kemiringan Mercu	lebar (m)	Tinggi (m)
4:3,4 (41.18°)	4,0	3,5
4:4,0 (45°)	4,0	4,0
4:4,5 (48.36°)	4,0	4,5

Sumber : dokumen pribadi

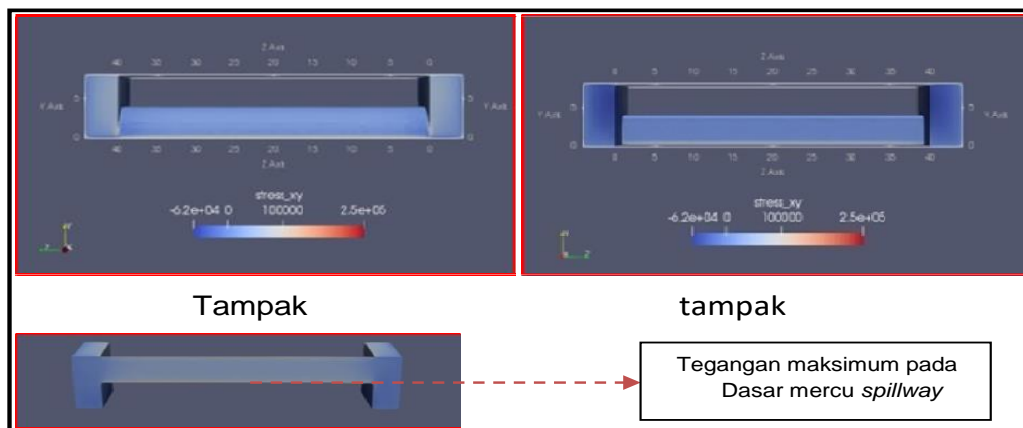
Pada proses pemodelan Mercu *Spillway* (pelimpah) digunakan perangkat lunak *FreeCAD*[15] yang kemudian akan diekspor ke software elemen hingga yaitu *Elmer*[16] (elemen volume yang digunakan berbentuk tetrahedral) dan dianalisis dengan software *ParaView*[17].

HASIL DAN PEMBAHASAN

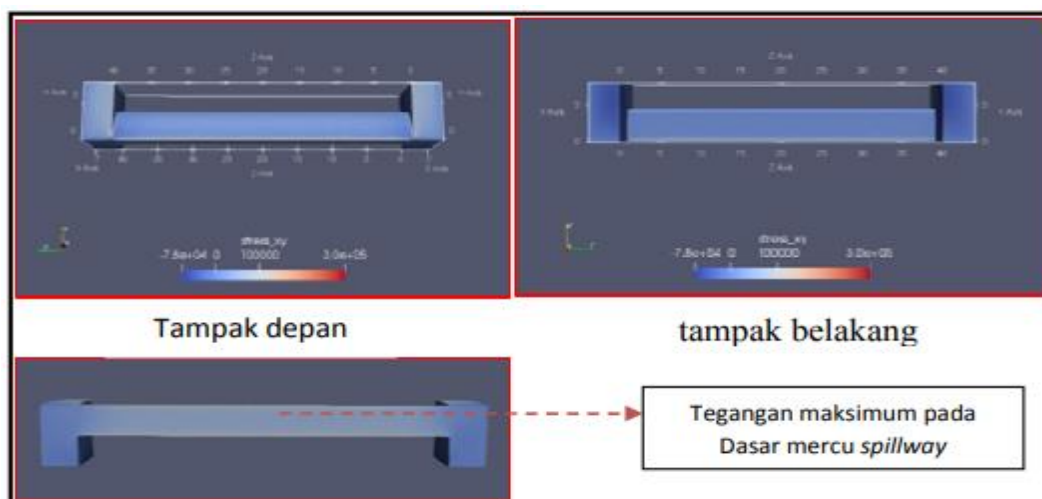
Software *ParaView* digunakan untuk melihat dan menganalisis hasil modifikasi kemiringan 41.18°, 45° dan 48.36° mercu *spillway* bendungan tipe ogee. Dari hasil analisis tersebut dapat diketahui bahwa mercu *spillway* dari ketiga modifikasi kemiringan tersebut mengalami tegangan pada arah sumbu tertentu.



Gambar 2. Tegangan mercu *spillway* pada arah sumbu z



Gambar 3. Tegangan mercu *spillway* pada arah sumbu xy



Gambar 4. Tegangan mercu *spillway* pada arah sumbu xy.

Berdasarkan Gambar 2,3, dan 4. maka data tegangan maksimum dari modifikasi mercu *spillway* dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4 Nilai tegangan terbesar pada modifikasi mercu *spillway*.

Modifikasi Mercu <i>spillway</i>	Tegangan (σ)	Arah vektor
4 : 3.5 (41.18°)	2.2 x 10 ⁵ N/m ²	zz
4 : 4.0 (45°)	2.5 x 10 ⁵ N/m ²	xy
4 : 4.5 (48.36°)	3.0 x 10 ⁵ N/m ²	xy

Berdasarkan gambar dan data hasil tegangan pada modifikasi mercu *spillway* tersebut diatas terlihat bahwa terjadi variasi data tegangan maksimum dari ketiga modifikasi mercu *spillway* tersebut. Pada modifikasi kemiringan mercu *spillway* 41.18° tegangan maksimum terjadi pada bagian dinding mercu *spillway* terhadap σ_{zz} Tegangan arah normal arah z (zz) dengan nilai 2.2 x 10⁵ N/m². Pada modifikasi kemiringan mercu *spillway* 45°, dimana tegangan maksimum terjadi pada segmen dasar mercu *spillway* terhadap σ_{xy} tegangan geser arah sumbu xy dengan nilai 2.5 x 10⁵ N/m². Pada modifikasi kemiringan mercu *spillway* 48.36°, tegangan maksimum terjadi pada segmen dasar mercu terhadap σ_{xy} tegangan geser arah sumbu xy sebesar 3.0 x 10⁵ N/m². Dari ketiga modifikasi terlihat tegangan maksimum terjadi pada dinding dan bagian bawah atau segmen dasar mercu *spillway*. Perubahan tegangan maksimum terjadi sesuai luasan dan ketinggian dari analisis modifikasi mercu *spillway*. Secara umum semakin tinggi mercu *spillway*, maka semakin besar nilai tegangan terhadap masa jenis air yang diberikan. Sesuai dengan teori tekanan hidrostatik, dimana tekanan berbanding lurus dengan ketinggian. Semakin tinggi struktur tersebut maka tekanannya semakin besar.

Pada variasi modifikasi kemiringan 41.18° 45° dan 48.36° dapat dilihat bahwa terjadi juga deformasi pada mercu *spillway* tersebut.

Dari hasil yang diperoleh pada modifikasi kemiringan 41.18° , 45° dan 48.36° mercu *spillway* tipe ogee terhadap deformasi yang ditunjukkan pada tabel 5 berikut.

Tabel 5. Nilai deformasi pada modifikasi mercu *spillway*

Modifikasi struktur	Deformasi
4 : 3.5 (41.18°)	1.4 x 10 ⁻⁵ m
4 : 4.0 (45°)	1.9 x 10 ⁻⁵ m
4 : 4.5 (48.36°)	2.6 x 10 ⁻⁵ m

Pada tabel diatas dapat dijelaskan bahwa perubahan struktur (deformasi) tergantung pada ketinggian struktur mercu *spillway*. Semakin tinggi mercu *spillway*, maka semakin besar deformasi yang terjadi.

Untuk menentukan nilai regangan digunakan nilai deformasi pada tabel 5 untuk ketiga modifikasi tersebut dan diperoleh nilai pada tabel 6.

Tabel 6. Nilai regangan pada modifikasi mercu *spillway*

Modifikasi struktur	Regangan (ϵ)
4 : 3.5 (41.18°)	35 x 10 ⁻⁸
4 : 4.0 (45°)	47.5 x 10 ⁻⁸
4 : 4.5 (48.36°)	65 x 10 ⁻⁸

Berdasarkan tabel 6. hasil analisis perhitungan nilai regangan pada tabel diatas dapat dijelaskan bahwa terjadi perubahan pada regangan yang terjadi pada ketiga modifikasi mercu *spillway* tersebut. Dimana semakin tinggi mercu *spillway*, maka regangan terhadap struktur tersebut semakin besar.

KESIMPULAN

Dengan menggunakan bantuan perangkat lunak dalam memodelkan, mensimulasikan dan menganalisis, khususnya *software FreeCAD, Elmer* dan *ParaView* mempermudah dan menghemat waktu dalam menganalisis permasalahan suatu struktur. Berdasarkan Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi tegangan, regangan dan deformasi pada modifikasi mercu *spillway*, dimana hasil yang diperoleh adalah sebagai berikut: Tegangan yang terjadi pada ketiga modifikasi kemiringan mercu *spillway* tersebut, yaitu pada modifikasi kemiringan 41.18° tegangan maksimum terjadi pada tegangan normal arah z dengan nilai 2.2 x 10⁵ N/m², pada modifikasi terhadap kemiringan 45° tegangan maksimum terjadi pada segmen dasar mercu *spillway* pada tegangan geser

arah xy dengan nilai $2.5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, pada modifikasi kemiringan 48.36° tegangan maksimum terjadi pada segmen dasar mercu *spillway* tegangan geser arah xy dengan nilai $3.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Regangan yang terjadi pada modifikasi 41.18° , 45° dan 48.36° secara berurutan, yaitu sebesar 35×10^{-8} , 47.5×10^{-8} dan 65×10^{-8} . Deformasi yang terjadi pada modifikasi kemiringan mercu *spillway* 41.18° , 45° dan 48.36° secara berurutan, yaitu sebesar $1.4 \times 10^{-5} \text{ m}$, $1.9 \times 10^{-5} \text{ m}$ dan $2.6 \times 10^{-5} \text{ m}$ yang terjadi pada puncak mercu pada ketiga modifikasi mercu *spillway* tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. Suciantini, Impran, dan Rizaldi Boer. 2008. Penilaian Risiko Iklim Pada Sistem Pertanian Ekosistem Lahan Rawa Pasang Surut (Studi kasus di Delta Telang I, Delta Telang II dan Delta Air Saleh, Banyuasin, Sumatera Selatan). *J. Agromet.* **22**(2): 118.
2. Epu H. 2019. Progres Pembangunan Bendungan Napun Gete Mengalami Kemajuan Luar Biasa. <https://rri.co.id/ende/daerah/691557/progres-pembangunan-bendungan-napun-gete-mengalami-kemajuan-luar-biasa>.
3. Google. 2021. Bendungan Raknamo. Google Maps. <https://www.google.com/maps/place/Bendungan+Raknamo/@-10.1192817,123.9318357,15z/data=!4m5!3m4!1s0x0:0x20e2ef9965844d93!8m2!3d-10.1192817!4d123.9318357>.
4. Tempo. 2014. Bendungan Raknamo Hasilkan 0,216 MW Listrik. Tempo. <https://nasional.tempo.co/read/630192/bendungan-raknamo-hasilkan-0216-mw-listrik/full&view=ok>.
5. Haslindar YS, Supriyadi A, Muttaqien AY. 2015. Analisis Tegangan dengan Metode Elemen Hingga pada Spillway Bendungan Dengan Penggantian Bentuk Mercu. *e-Jurnal MATRIKS TEKNIK SIPIL.* 224.
6. Isworo H, Ansyah PR. 2018. Metode Elemen Hingga, Buku Ajar, Program Studi Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat.
7. Arief TM. 2014. Analisis Kekuatan Struktur Pallet Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Energi dan Manufaktur Vol.7, No.1, April 2014:* 1-118. **7**(1): 63.
8. Sutrasno,. 2004. Aplikasi Metode Elemen Hingga Pada Masalah Gelombang Elektromagnet. *Widyanuklida.* **5**(2): 34.
9. Dapas S. 2011. Aplikasi Metode Elemen Hingga Pada Analisis Struktur Rangka Batang. *Jurnal Ilmiah Media Engineering.* **1**(2): 98491.
10. J, Rahardjo AP. 2012. Penyusunan Model Elemen Hingga Interaksi Persamaan Aliran dengan Persamaan Sebaran Udara. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika.* **15**(1): 14.
11. Nurhabibah. Studi Perencanaan Bangunan Pelimpah (Spillway) Bendungan Bendo, Kabupaten Ponorogo, Jawa Timur. Skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang, Malang.
12. Nisaiyah. Peningkatan Kapasitas Spillway Dengan perubahan Bentuk Puncak Tipe Deret Sinusoida. Skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
13. Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara II. Data teknis Bendungan Raknamo. Bws ntt2, Kupang, 2019.
14. Goldgruber M, Lampert R. 2017. Thermal Cracking of a Concrete Arch Dam. dynardo.de. www.dynardo.de/en/library.
15. FreeCAD: Your own 3D parametric modeler <https://www.freecadweb.org/>.
16. CSC IT CENTER FOR SCIENCE LTD. Elmer - Elmer - CSC Company Site. <https://www.csc.fi/web/elmer>.
17. Kitware.ParaView. <https://www.paraview.org/>.