

# ANALISIS STRUKTUR BENDUNG DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

**Moch. Fadhli Bargess, Cindrawaty Lesmana, Robby Yussac Tallar**  
Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha  
Jalan Prof. Drg. Suria Sumantri MPH. 65, Bandung, 40164  
Email: mf\_bargess@gmail.com

## ABSTRAK

Struktur bendung merupakan kebutuhan penting dalam bidang perairan. Masalah hancurnya struktur bendung dapat diakibatkan karena sudah tidak kuatnya struktur tersebut untuk menahan beban horisontal maupun beban vertikal di sekitar bendung. Metode elemen hingga telah digunakan dengan sangat berhasil dalam memecahkan persoalan – persoalan yang luas jangkauannya dalam hampir semua bidang keinsinyuran dan fisika matematis. Penerapan metode elemen hingga diterapkan untuk menghitung peninjauan tegangan, lendutan dan gaya reaksi dasar untuk struktur bendung. Studi kasus diambil dari bendung Cilemer, Jawa Barat. Struktur dianalisis dengan bantuan *software* SAP 2000. Analisis dibuat dengan pemodelan dua dimensi (elemen *shell*) dan tiga dimensi (elemen *solid*). Kedua model dimodelkan dengan perletakan pegas (*springs*) yang dianggap mewakili kondisi tanah di lapangan. Struktur bendung ditinjau terhadap berat sendiri bendung, beban lumpur, beban air normal dan beban banjir. Perbandingan tegangan arah lokal 1 dilakukan untuk kedua model untuk setiap kondisi pembebanan. Hasil tegangan maksimum untuk kedua model menghasilkan perbedaan sekitar 4%, sedangkan hasil tegangan minimum menghasilkan perbedaan yang cukup besar (~84%). Perbandingan struktur antara model dua dimensi dan tiga dimensi, menghasilkan nilai lendutan arah 1 dan arah 3 pada pemodelan dua dimensi lebih besar dibandingkan dengan pemodelan tiga dimensi. Pada struktur bendung dilakukan perbandingan hasil perhitungan gaya reaksi dasar antara manual dengan hasil perhitungan *software*. Verifikasi perhitungan tersebut menghasilkan perhitungan *software* mendekati hasil perhitungan manual. Hasil pemodelan struktur bendung menghasilkan bahwa struktur bendung dapat dihitung dengan menggunakan metode elemen hingga, baik untuk pemodelan dua dimensi (*shell*) maupun pemodelan tiga dimensi (*solid*). Pemodelan tiga dimensi disarankan untuk digunakan untuk menghasilkan analisis yang lebih akurat.

**Kata kunci:** struktur bendung, metode elemen hingga, analisis struktur.

## ABSTRACT

Dam is the important aspect in waterwork. Shattere of dam occurred when the structure not cappable to restrain horizontal loading and vertical loading. Finite element method has been used successfully for solving problems in the engineerring and physics-mathematics cases. Finite element method is used to calculate shear stress, displacement and base reactions of dam structure. Case study is taken from Cilemer dam, Jawa Barat. Structure is calculated by using SAP 2000. The analysis is modeled in 2 dimension model (shell element) and 3 dimension model (solid element). Both of them are using springs as the support system that represent soil condition in field. Dam structure observe toward self weight, siltation, normal water and flood. The shear stress in local 1 direction is compared for the two models in each load condition. The maximum stress for the two models has resulted 4% difference, while the minimum stress has resulted bigger difference (~84%). The comparison between 2 dimension model and 3 dimension model refer to horizontal displacement and vertical displacement in global 1 and 3 direction result that 2 dimension modelling have bigger displacement compare with 3 dimension model. The verification is also calculated for software analysis results in base reaction. The verification results that the software analysis for base reaction approached the manual analysis. The dam model results that finite element method can be used for analysis, which it can be modeled either

two dimension model (shell) or three dimension model (solid). For accuracy analysis results, the three dimension model is suggested to be used.

**Keywords:** dam structure, finite element method, structure analysis.

## 1. PENDAHULUAN

Struktur merupakan kebutuhan penting dalam pembangunan baik untuk pembangunan gedung, transportasi, dan perairan. Bangunan air di Indonesia dibangun mulai dari yang sederhana sampai yang cukup rumit. Salah satu bangunan air adalah bendung. Struktur bendung adalah struktur bangunan air yang dibangun melintang sungai untuk meninggikan taraf muka air sungai sehingga dapat dialirkan secara gravitasi ke daerah yang membutuhkan. Bendung yang telah dibangun, beroperasi dan telah berfungsi dengan baik tetapi sebagian diantaranya mengalami masalah-masalah gangguan hambatan aliran, gangguan angkutan sedimen dan sampah, penggerusan setempat di hilir bendung sampai dengan masalah hancurnya bangunan dan sebagainya.

Masalah hancurnya struktur bendung dapat diakibatkan karena sudah tidak kuatnya struktur tersebut untuk menahan beban horisontal maupun beban vertikal di sekitar bendung. Struktur bendung harus dianalisis sedemikian rupa agar mendapatkan desain yang optimal untuk menahan beban-beban yang bekerja pada elemen struktur.

Perhitungan beban-beban ini akan dihitung dengan metode numerik yaitu metode elemen hingga (*finite element method*). Metode elemen hingga, pada prinsipnya membagi sebuah kontinum menjadi bagian-bagian kecil yang disebut elemen, sehingga solusi dalam tiap bagian kecil dapat diselesaikan dengan lebih sederhana.

Tujuan dari penelitian adalah menganalisis struktur bendung Cilemer di daerah Jawa Barat, dengan metode elemen hingga. Analisis tersebut dilakukan untuk melihat perilaku struktur yang terjadi.

## 2. DASAR TEORI

### 2.1. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah suatu teknik umum untuk mendapatkan pendekatan pada persoalan harga batas. Metode ini telah digunakan dengan sangat berhasil dalam memecahkan persoalan-persoalan yang luas jangkauannya dalam hampir semua bidang keinsinyuran dan fisika matematis.

Konsep yang mendasari metode elemen hingga bukanlah hal yang baru. Prinsip "*discretization*" dipergunakan hampir pada semua usaha bentuk manusia. Barangkali kebutuhan untuk "*discretization*" atau membagi sesuatu menjadi bentuk yang lebih kecil dan

dapat dimengerti yang timbul dari keterbatasan manusia. Dengan perkataan lain membagi (*discretize*) alam atau suatu fenomena menjadi bagian-bagian kecil, dan penyatuan secara keseluruhan. Umumnya pada pandangan seperti ini akan terjadi suatu unsur penyimpangan atau kesalahan, tetapi prosedur metode elemen hingga tersebut merupakan pendekatan praktis dengan toleransi penyimpangan yang dapat diterima.

## **2.2. Program pada Metode Elemen Hingga**

Program pada metode elemen hingga akan memakai *software SAP 2000*. Disini akan ditinjau bagaimana *software* membuat suatu pendekatan yang dilakukan dengan metode elemen hingga.

### **2.2.1. Shell**

Elemen *shell* umumnya mempunyai empat titik nodal untuk persegi dan tiga titik nodal untuk segitiga. Pada persegi, elemen *shell* mempunyai enam permukaan dan untuk segitiga mempunyai lima permukaan dan tiap-tiap permukaan dihubungkan dengan titik nodal. Tegangan dan regangan didefinisikan sebagai gaya yang bekerja terhadap area permukaan benda tersebut, dimana arah tegangan bekerja sesuai dengan sumbu koordinat dari benda tersebut. Tegangan  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ , dan  $S_{33}$  mengakibatkan tegangan langsung dan mengalami perubahan terhadap panjang benda, sedangkan  $S_{12}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{23}$  akan mengakibatkan tegangan geser dan menyebabkan terjadinya perubahan sudut. Hubungan tegangan dan regangan material yang digunakan dan yang diwakili dalam bentuk modulus elastisitas.

### **2.2.2. Solid**

Elemen *solid* umumnya mempunyai delapan titik nodal, model *solid* merupakan tiga dimensi dan silinder merupakan enam titik nodal dimana titik nodal bertemu di pusat silinder sehingga enam nodal, dimana kondisi ini merupakan *isoparametric*. Elemen *solid* mempunyai enam permukaan, dimana tiap-tiap permukaan dihubungkan dengan titik nodal. Setiap bagian solid elemen mempunyai sumbu lokal, dimana jika diberikan beban akan mengalami deformasi terhadap tegangan pada setiap join. Tegangan dan regangan di dalam *SAP2000* didefinisikan gaya yang bekerja terhadap area permukaan benda tersebut, dimana arah tegangan bekerja sesuai dengan sumbu koordinat dari benda tersebut. Tegangan  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ , dan  $S_{33}$  mengakibatkan tegangan langsung dan mengalami perubahan terhadap panjang

benda, sedangkan  $S_{12}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{23}$  akan mengakibatkan tegangan geser dan menyebabkan terjadinya perubahan sudut. Hubungan tegangan dan regangan material yang digunakan dan yang diwakili dalam bentuk modulus elastisitas.

### 2.2.3. Tegangan Tiga Dimensi

Dalam praktek keteknikan biasanya intensitas gaya diuraikan menjadi tegak lurus dan sejajar dengan irisan yang diselidiki. Penguraian intensitas gaya ini pada luas kecil takberhingga. Intensitas gaya yang tegak lurus atau normal terhadap irisan disebut tegangan normal (*normal stress*) pada sebuah titik. Dari definisi tegangan normal, yang merupakan intensitas gaya pada sebuah luas, maka dapat dilihat bahwa tegangan diukur dalam satuan gaya dibagi dengan satuan luas. Gaya adalah vektor sedangkan luas adalah suatu skalar maka hasil baginya dinyatakan sebagai komponen – komponen gaya dalam arah tertentu, yang merupakan suatu besaran vektor.

Secara matematis hal tersebut tidak memenuhi hukum–hukum penjumlahan dan pengurangan vektor. Tegangan adalah vektor orde tinggi sebagai tambahan untuk memiliki besar dan arah, tegangan tersebut juga bersangkutan dengan satuan luas atas mana gaya-gaya tersebut bekerja.

### 2.3. Perencanaan Struktur Bendung

Tipe dan ukuran sedimen yang diangkut oleh sungai akan mempengaruhi pemilihan bahan yang akan dipakai untuk membuat permukaan bangunan yang langsung bersentuhan dengan aliran air. Biasanya bahan yang dipakai dalam struktur adalah material beton, yang jika direncana dengan baik dan dipakai di tempat yang benar, merupakan bahan lindungan yang baik pula. Beton yang dipakai untuk lindungi permukaan sebaiknya mengandung agregat berukuran kecil, bergradasi baik dan berkekuatan tinggi. Beban yang diperhitungkan dalam *software* ini adalah beban sendiri bendung, beban lumpur, beban air normal dan beban banjir. Pada perencanaan struktur bendung ini juga konstanta pegas diperhitungkan.

## 3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN STRUKTUR BENDUNG

### 3.1. Data Bendung

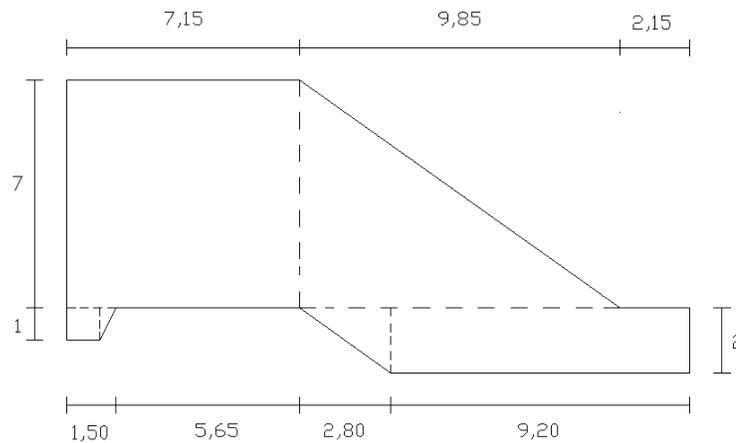
Adapun data umum struktur bendung sebagai berikut:

Nama	: Bendung Cilemer
Lokasi	: Jawa Barat
Tinggi	: 9 meter
Panjang	: 19,15 meter

Beton : Mutu beton K-225  $\rightarrow f'_c = 18,675 \text{ MPa}$

Berat jenis beton ( $\gamma_{beton}$ ) =  $23 \text{ KN/m}^3$

Jenis perletakan : Pegas (*springs*)



**Gambar 1. Model Bendung.**

Data – data pembebanan yang digunakan untuk menganalisa gaya – gaya yang bekerja pada elemen struktur bendung adalah sebagai berikut:

1. Beban Lumpur (*siltation*)

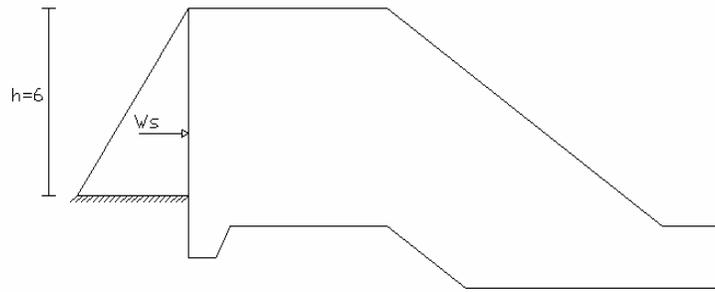
$$\gamma_s = 0,6 \text{ ton/m}^3$$

$$h = 6 \text{ m}$$

$$\phi = 20^\circ$$

Gambar 2 menggambarkan struktur bendung yang menerima beban lumpur, dimana beban lumpur dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_s &= \frac{1}{2} \times 0,6 \times 36 \times \frac{(1 - \sin 20)}{(1 + \sin 20)} \\ &= 10,8 \times \frac{0,658}{1,342} \\ &= 5,295 \text{ ton} \end{aligned}$$



**Gambar 2. Model Bendung dengan Beban Lumpur.**

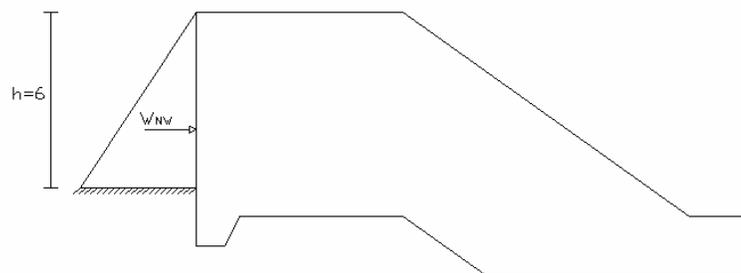
2. Beban Air Normal (*Normal water*)

$$\gamma = 1 \text{ ton/m}^3$$

$$h = 6 \text{ m}$$

Gambar 3 menggambarkan struktur bendung yang menerima beban air normal, dimana beban air dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_{NW} &= \frac{1}{2} \times 1 \times 36 \\ &= 18 \text{ ton} \end{aligned}$$

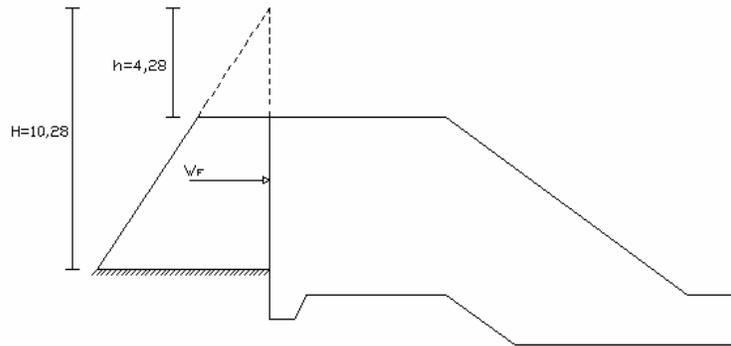


**Gambar 3. Model Bendung dengan Beban Air Normal.**

3. Beban Banjir (*Flood*)

Gambar 4 menggambarkan struktur bendung yang menerima beban banjir, dimana beban banjir dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W_F &= \frac{4,28 + 10,28}{2} \times 6 \\ &= 43,68 \text{ ton} \end{aligned}$$



**Gambar 4. Model Bendung dengan Beban Banjir.**

### 3.2. Pemodelan Struktur Bendung dengan Menggunakan *Software*

Pemodelan struktur bendung dilakukan dengan 2 cara, yaitu pemodelan 2 dimensi dan pemodelan 3 dimensi. Pada pemodelan 2 dimensi, struktur bendung dimodelkan sebagai elemen sengkang (*shell*). Pembebanan pada struktur 2 dimensi untuk beban lumpur, beban air normal dan beban banjir dimodelkan dengan beban terpusat di tempat titik tangkap segitiga, hal ini dikarenakan keterbatasan program SAP2000 yang tidak dapat memodelkan distribusi beban segitiga pada sisi tebal elemen *shell*. Sedangkan untuk pemodelan 3 dimensi, struktur bendung dimodelkan sebagai elemen *solid*. Pada pemodelan ini beban dimodelkan sesuai dengan asumsi beban yang biasa dipakai, yaitu beban merata segitiga untuk beban lumpur, beban air normal, dan beban merata trapesium untuk beban banjir. Perletakan untuk struktur bendung dimodelkan dengan pegas, dimana konstanta pegas<sup>[6]</sup> dihitung sebagai berikut:

$$K = \frac{0,65}{d} \left( \frac{E_s \cdot d^4}{E_p \cdot I_p} \right)^{\frac{1}{12}} \cdot \left( \frac{E_s}{1-\nu^2} \right) \quad (2.9)$$

dimana:

K = konstanta pegas, kg/cm<sup>2</sup>

d = tebal dinding, cm

E<sub>s</sub> = modulus elastisitas tanah, kg/cm<sup>2</sup>

E<sub>p</sub> = modulus elastisitas beton, kg/cm<sup>2</sup>

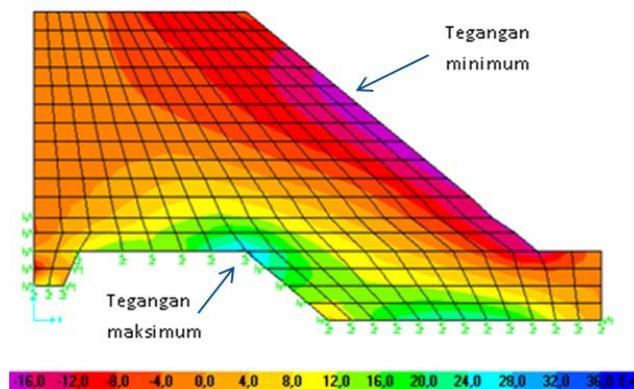
I<sub>p</sub> = momen inersia, cm<sup>4</sup>

ν = *Poison ratio*

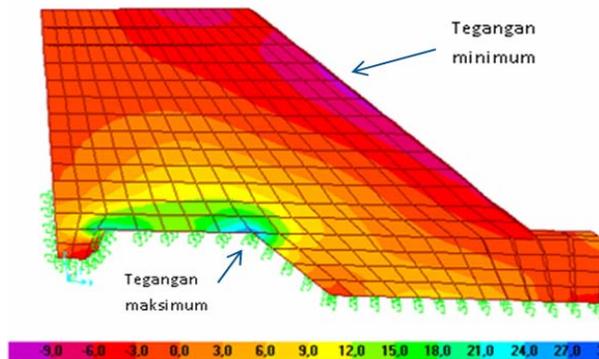
Hasil analisis struktur bendung ditinjau dengan cara melihat hasil tegangan S11, lendutan dan hasil reaksi dasar yang terjadi pada struktur bendung.

Hasil tegangan S11 untuk pemodelan struktur bendung akibat beban mati adalah pembebanan yang bekerja akibat berat sendiri struktur bendung. Tegangan untuk model bendung 2 dimensi akibat beban mati menghasilkan tegangan maksimum ( $33845,93 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di bawah sekitar tekukan bendung sedangkan tegangan minimum ( $-19523,6 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di sekitar wilayah terjunan bendung, seperti pada Gambar 5(a). Sedangkan tegangan untuk model bendung 3 dimensi akibat beban mati menghasilkan tegangan maksimum ( $32896,59 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi dibawah sekitar tekukan bendung sedangkan tegangan minimum ( $-10078,94 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi disekitar wilayah terjunan bendung, seperti pada Gambar 5.(b).

Posisi tegangan maksimum dan minimum untuk model 3 dimensi mendekati posisi tegangan maksimum dan minimum untuk model 2 dimensi, tetapi nilai tegangan yang dihasilkan berbeda. Perbedaan pemodelan asumsi elemen menyebabkan nilai tegangan maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh pemodelan dua dimensi lebih besar dibandingkan pemodelan tiga dimensi. Akibat beban mati posisi tegangan maksimum dan minimum untuk model 3 dimensi mendekati posisi tegangan maksimum dan minimum untuk model 2 dimensi, tetapi nilai tegangan yang dihasilkan berbeda. Perbedaan pemodelan dua dimensi (*shell*) dan tiga dimensi (*solid*) menyebabkan nilai tegangan maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh pemodelan dua dimensi lebih besar dibandingkan pemodelan tiga dimensi. Tegangan maksimum yang dihasilkan model 2 dimensi mendekati model 3 dimensi (% perbedaan = 2,80%), tetapi hasil tegangan minimum yang dihasilkan oleh kedua model berbeda cukup besar (% perbedaan = 48,38%). Hal ini menunjukkan model 3 dimensi lebih teliti dalam perhitungan tegangan karena elemen *solid* memodelkan 8 titik nodal, sedangkan elemen *shell* memodelkan 4 titik nodal.



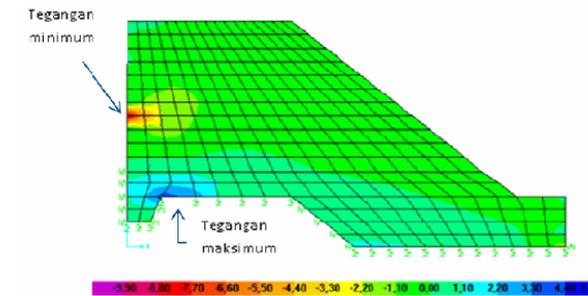
(a) Pemodelan 2 Dimensi (*Shell*)



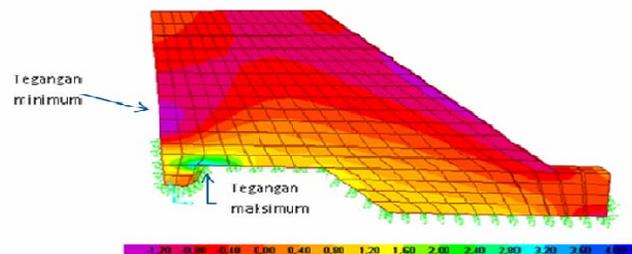
(b) Pemodelan 3 Dimensi (*Solid*)

**Gambar 5. Hasil Tegangan S11 Pemodelan Struktur Bendung Akibat Beban Mati.**

Beban lumpur (*siltation*) dimodelkan dengan jenis beban terpusat (*point load*) yang bekerja di atas tanah sebelah kiri bendung di tempat terjadinya lumpur sering terjadi apabila arah datangnya air dari sebelah kiri. Beban terpusat diletakan pada posisi titik tangkap beban segitiga ( $1/3$  dari tinggi asumsi lumpur). Hasil tegangan S11 untuk model 2 dimensi akibat beban lumpur dapat dilihat pada Gambar 6(a). Tegangan maksimum ( $4315,33 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di bawah bendung sekitar tekukan sebelah kiri, sedangkan tegangan minimum ( $-10139,65 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di sebelah kiri bendung dimana posisi beban terpusat dimodelkan. Gambar 6(b) menunjukkan hasil tegangan S11 untuk model 3 dimensi akibat beban lumpur dengan pemodelan beban terdistribusi segitiga. Tegangan maksimum untuk model 3 dimensi dihasilkan sebesar  $4136,83 \text{ kg/m}^2$  yang terjadi dibawah sekitar tekukan sebelah kiri bendung, sedangkan tegangan minimum ( $-1565,48 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di sebelah kiri bendung sama dengan arah datangnya air. Sama dengan halnya hasil tegangan akibat beban mati, posisi tegangan maksimum dan minimum untuk model 3 dimensi mendekati posisi tegangan maksimum dan minimum untuk model 2 dimensi, tetapi nilai tegangan yang dihasilkan berbeda. Perbedaan model 2 dimensi (*shell*) dengan *point load* dan model 3 dimensi (*solid*) dengan beban distribusi segitiga, menyebabkan nilai tegangan maksimum yang dihasilkan oleh pemodelan 2 dimensi lebih besar 4,13 % dibandingkan pemodelan 3 dimensi. Sedangkan perbedaan yang cukup besar (84,56%) terjadi pada tegangan minimum kedua model, hal ini dikarenakan distribusi beban yang kurang merata pada pemodelan 2 dimensi.



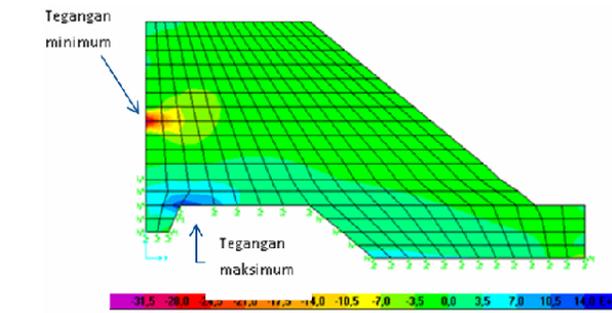
(a) Pemodelan 2 Dimensi (*Shell*)



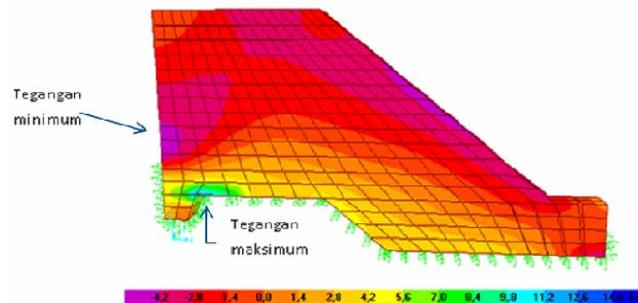
(b) Pemodelan 3 Dimensi (*Solid*)

**Gambar 6. Hasil Tegangan S11 Pemodelan Struktur Bendung Akibat Beban Lumpur.**

Sama dengan halnya beban lumpur, pada model 2 dimensi akibat beban air normal (*normal water*), beban dimodelkan sebagai beban terpusat (*point load*) yang bekerja di atas tanah sebelah kiri bendung, tempat dimana arah air mengalir. Tegangan S11 maksimum yang dihasilkan sebesar  $14699,68 \text{ kg/m}^2$  terjadi di bawah bendung sekitar tekukan sebelah kiri, sedangkan untuk tegangan minimum sebesar  $-34469,08 \text{ kg/m}^2$  terjadi di sebelah kiri bendung sama dengan posisi pemodelan beban air, seperti pada Gambar 7(a). Pada model 3 dimensi akibat beban air normal (*normal water*), beban dimodelkan dengan jenis pembebanan terdistribusi merata segitiga yang bekerja di atas tanah sebelah kiri bendung dimana arah air mengalir. Pemodelan menghasilkan tegangan maksimum ( $14062,51 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi dibawah sekitar tekukan sebelah kiri bendung sedangkan tegangan minimum ( $-5321,61 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di sebelah kiri bendung sama dengan arah datangnya air, seperti pada Gambar 7(b). Walaupun nilai tegangan yang dihasilkan berbeda, posisi tegangan maksimum dan minimum untuk model 3 dimensi mendekati posisi tegangan maksimum dan minimum untuk model 2 dimensi. Nilai tegangan maksimum yang dihasilkan oleh model 2 dimensi lebih besar 4,31 % dibandingkan pemodelan tiga dimensi. Sedangkan perbedaan yang cukup besar (84,56%) terjadi pada tegangan minimum kedua model, hal ini dikarenakan distribusi beban yang kurang merata pada pemodelan dua dimensi.



(a) Pemodelan 2 Dimensi (*Shell*)



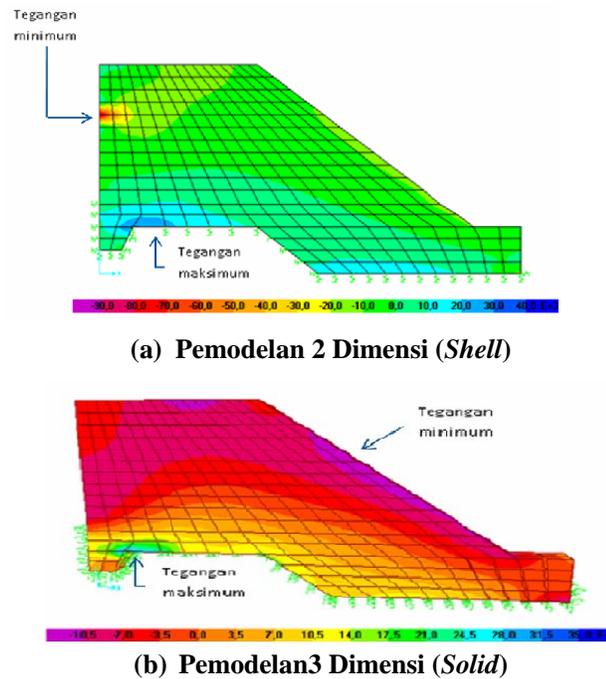
(b) Pemodelan 3 Dimensi (*Solid*)

**Gambar 7. Hasil Tegangan S11 Pemodelan Struktur Bendung Akibat Beban Air Normal.**

Beban banjir (*flood*) pada model 2 dimensi dimodelkan sebagai beban terpusat (*point load*) yang bekerja di atas tanah sebelah kiri bendung (arah datangnya air). Beban diletakan pada titik tangkap segitiga yaitu 1/3 dari tinggi muka air banjir. Gambar 8(a) menunjukkan tegangan maksimum ( $36472,82 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di bawah bendung sekitar tekukan sebelah kiri, sedangkan tegangan minimum ( $-92084,49 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di sebelah kiri bendung sama dengan posisi pemodelan beban air. Beban banjir pada model 3 dimensi dimodelkan sebagai beban terdistribusi merata segitiga terpancung atau trapesium yang bekerja di atas tanah sebelah kiri bendung, tempat dimana arah air mengalir.

Gambar 8(b) menunjukkan tegangan maksimum ( $35882,29 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di bawah sekitar tekukan sebelah kiri bendung sedangkan tegangan minimum ( $-13494,31 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di sekitar wilayah terjunan bendung. Berbeda dengan hasil tegangan akibat beban lainnya, posisi tegangan model 3 dimensi yang mendekati posisi tegangan model 2 dimensi hanya terjadi pada tegangan maksimum, dengan nilai tegangan maksimum model 2 dimensi lebih besar 1,62% dari model 3 dimensi. Lokasi terjadinya tegangan minimum pada

kedua model berbeda, pada model tiga dimensi beban banjir dari arah datangnya air mempengaruhi tegangan untuk tiga sisi bendung (sisi datangnya air, sisi atas dan sisi terjunan), sedangkan pada model dua dimensi tegangan minimum hanya terjadi pada satu sisi bendung (sisi datangnya air). Tegangan minimum yang dihasilkan model 2 dimensi lebih besar 85,34% dari model 3 dimensi.

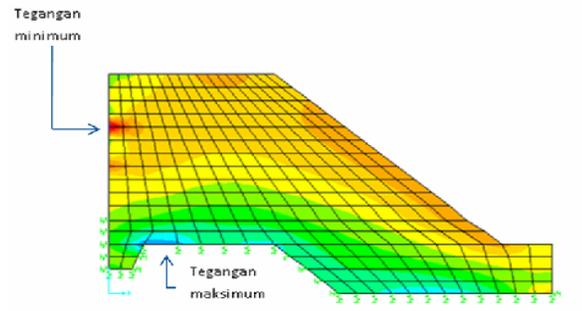


**Gambar 8. Hasil Tegangan S11 Pemodelan Struktur Bendung Akibat Beban Banjir.**

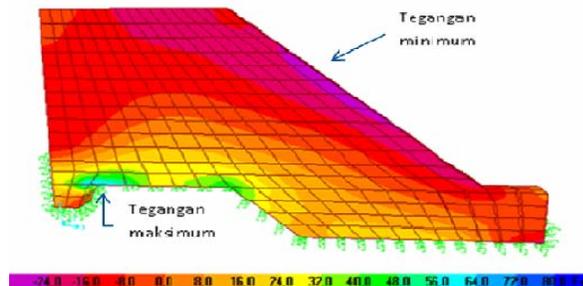
Kombinasi beban merupakan penjumlahan hasil analisis akibat dari beban sendiri, beban lumpur, beban air normal dan beban banjir. Seperti terlihat pada Gambar 9(a), tegangan maksimum ( $71186,85 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di bawah bendung sekitar tekukan sebelah kiri, sedangkan tegangan minimum ( $-92074 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di sebelah kiri bendung sama dengan posisi pemodelan beban air. Pada Gambar 9(b), tegangan maksimum ( $83071,28 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi dibawah bendung sekitar tekukan sebelah kiri, sedangkan tegangan minimum ( $-29568,46 \text{ kg/m}^2$ ) terjadi di sekitar wilayah terjunan bendung.

Perbedaan yang semakin signifikan terjadi pada tegangan maksimum akibat kombinasi pembebanan, hal ini terjadi akibat kumulatif perbedaan dari setiap hasil analisis beban yang terjadi. Sebagai contoh, akibat kombinasi beban tegangan maksimum model 2 dimensi berbeda 14,31% dengan model 3 dimensi, padahal apabila dilihat dari hasil

%perbedaan tegangan akibat kedua model yang terjadi akibat beban mati, beban lumpur, beban air normal dan beban banjir, tidak ada %perbedaan yang melampaui 5%.



(a) Pemodelan 2 Dimensi (*Shell*)



(b) Pemodelan 3 Dimensi (*Solid*)

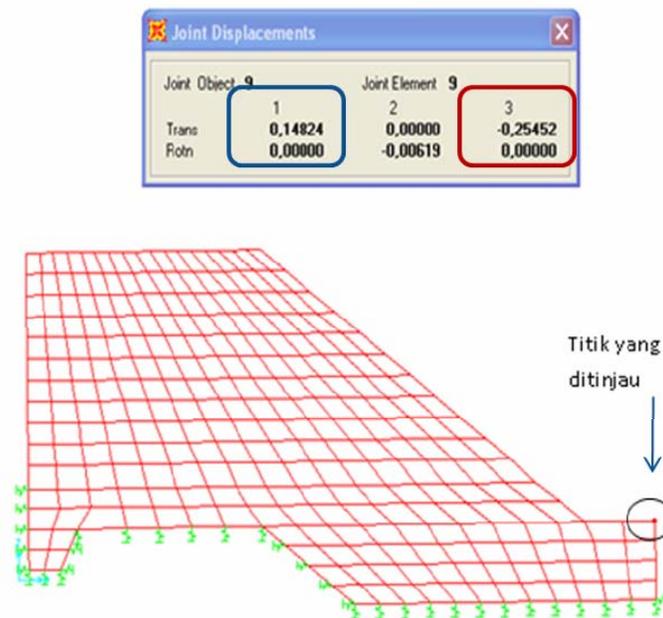
**Gambar 9. Hasil Tegangan S11 Pemodelan Struktur Bendung Akibat Beban Kombinasi.**

Tegangan maksimum pada kedua model selalu terjadi di daerah kaki bendung. Hal ini disebabkan tegangan maksimum ditentukan oleh gaya reaksi perletakan maksimum. Pada umumnya tegangan minimum untuk kedua pemodelan terjadi di tempat terjadinya beban. Perbedaan antara pemodelan dua dimensi dan tiga dimensi terjadi karena perbedaan asumsi model elemen *shell* (untuk model 2 dimensi) yang hanya memiliki 4 titik nodal dengan model elemen *solid* (untuk model 3 dimensi) yang memiliki 8 titik nodal. Hal ini sangat jelas ditunjukkan dari hasil kedua model akibat beban mati. Berat sendiri struktur yang dihitung secara otomatis oleh program mengakibatkan hampir tidak ada perbedaan untuk tegangan maksimum, tetapi perbedaan yang cukup signifikan terjadi pada tegangan minimum.

Hasil dari asumsi pembebanan, beban terpusat pada model 2 dimensi (*shell*) dan beban distribusi segitiga pada model 3 dimensi (*solid*) menghasilkan perbedaan sekitar 4%

untuk tegangan maksimum dan 84% untuk tegangan minimum. Hasil ini didapatkan dari pemodelan beban lumpur dan air normal dimana didapatkan % perbedaan yang hampir sama, sehingga dapat ditarik kesimpulan hasil tegangan minimum dari pemodelan 2 dimensi dapat direduksi sebesar 0,16 untuk mendapatkan hasil yang efisien.

*Joint Displacement* ditinjau hanya untuk 1 titik yang berada paling kanan bendung, dan untuk model 2 dimensi nilai *displacement* dalam satuan meter, seperti terlihat pada Gambar 10.

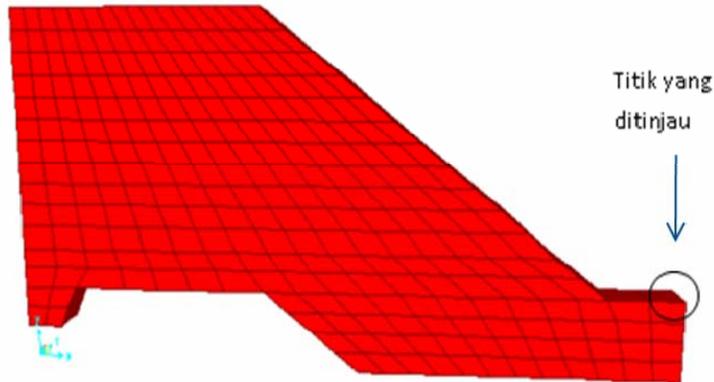


**Gambar 10. Pemodelan 2D dengan pegas.**

*Joint displacement* struktur bendung dimodelkan 3 dimensi dapat dilihat pada Gambar 11, peninjauan hanya untuk 1 titik yang berada paling kanan bendung, dan nilai yang dilihat dalam satuan meter.

Perbandingan struktur antara model 2 dimensi dengan 3 dimensi dilihat dari nilai lendutan arah 1 dan arah 3, pemodelan dua dimensi menghasilkan lendutan lebih besar dibandingkan pemodelan tiga dimensi. Hal ini dikarenakan pemodelan beban dua dimensi hanya dilakukan dengan model pendekatan sedangkan pemodelan beban pada model tiga dimensi lebih terdistribusi sehingga perhitungan akan mendapatkan ketelitian yang lebih akurat.

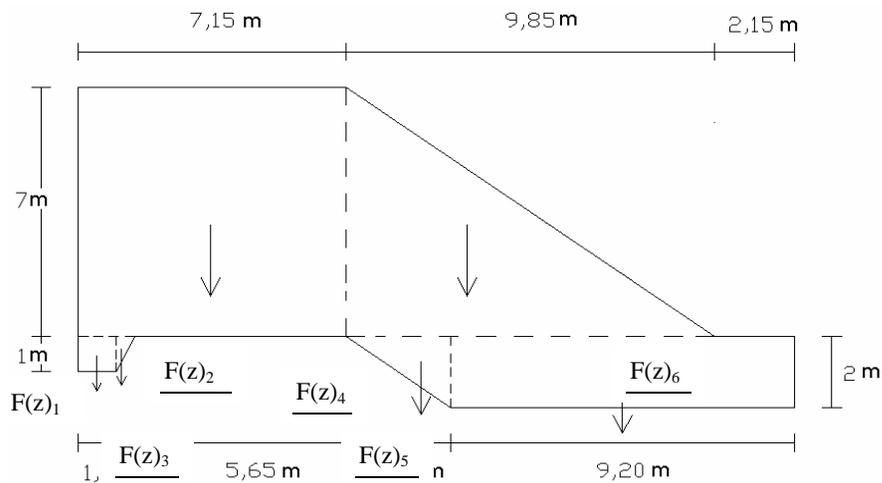
Joint Displacements			
Joint Object	Joint Element 9		
1	2	3	
Trans	0,00519	-0,00285	-0,00296
Rotn	0,00000	0,00000	0,00000



Gambar 11. Pemodelan 3D dengan pegas.

### Korelasi Antara Hasil Perhitungan Manual Dengan Model Software

Beban mati dapat dihitung dengan cara mengalikan berat jenis beton dengan area bendung. Beton Ilustrasi pembagian area bendung dapat dilihat pada Gambar 12. Adapun nilai dan perhitungan gaya reaksi dasar vertikal dan momen dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 12. Gambar pembebanan beban mati.

**Tabel 1. Tabel Perhitungan beban mati.**

No	Fz (Kg)	Jarak (m)	M (Kg.m)
1	2345,00	18,65	43734,25
2	586,25	17,98	10542,73
3	117367,25	15,58	1827994,92
4	6566,00	10,13	66535,47
5	80843,88	8,72	704689,11
6	43148,00	4,60	198480,80
Total	250856,38		2851977,28

Besarnya beban lumpur terhadap arah x (Fx) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \frac{1}{2} \times 0,6 \times 36 \times \frac{(1 - \sin 20)}{(1 + \sin 20)} \\
 &= 10,8 \times \frac{0,658}{1,342} \\
 &= 5,295 \text{ Ton} = 5295 \text{ kg} \\
 M &= 5,295 \times 5 \\
 &= 26,475 \text{ Ton.m} = 26475 \text{ kg.m}
 \end{aligned}$$

Besarnya beban air normal terhadap arah x (Fx) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \frac{1}{2} \times 1 \times 36 \\
 &= 18 \text{ Ton} = 18000 \text{ kg} \\
 M &= 18 \times 5 \\
 &= 90 \text{ Ton.m} = 90000 \text{ kg.m}
 \end{aligned}$$

Besarnya beban banjir terhadap arah x (Fx) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \frac{4,28 + 10,28}{2} \times 6 \\
 &= 43,68 \text{ Ton} = 43680 \text{ kg} \\
 M &= 43,68 \times 6,447 \\
 &= 281,5904 \text{ Ton.m} = 281590,4 \text{ kg.m}
 \end{aligned}$$

Hasil perbandingan perhitungan manual dengan perhitungan *software* dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

**Tabel 2. Perbandingan hasil manual dengan hasil *Software* 2D dalam satuan ton.m.**

Load	Fx		% Relatif	Fz		% Relatif	My		% Relatif
	Manual	2D		Manual	2D		Manual	2D	
Dead	0	0	0	250856,375	250756,82	0,040	-2851977,28	-1950094,65	31,623
Siltation	-5295	-5295	0	0	0	0	-26475	-27696,92	4,615
Normal Water	-18000	-18000	0	0	0	0	-90000	-94153,85	4,615
Flood	-43680	-43680	0	0	0	0	-281590,4	-299040	6,197
Combination	-66975	-66975	0	250856,375	250756,82	0,040	-3250042,68	-2370985,42	27,048

Berdasarkan Tabel 2 terlihat bahwa persen relatif hasil manual mendekati dengan hasil *software* 2D, kecuali untuk nilai momen (My) akibat berat sendiri, beban banjir, dan kombinasi.

**Tabel 3. Perbandingan hasil manual dengan hasil *Software* 3D dalam satuan ton.m.**

Load	Fx		% Relatif	Fz		% Relatif	My		% Relatif
	Manual	3D		Manual	3D		Manual	3D	
Dead	0	0	0	250856,375	250756,82	0,040	-2851977,28	-1950094,65	31,623
Siltation	-5295	-5295,13	0,002	0	0	0	-26475	-26475,66	0,002
Normal Water	-18000	-18000	0	0	0	0	-90000	-90000	0
Flood	-43680	-44040	0,817	0	0	0	-281590,4	-246240	12,554
Combination	-66975	-67335,13	0,535	250856,375	250756,82	0,040	-3250042,68	-2312810,31	28,838

Berdasarkan Tabel 3 terlihat bahwa persen relatif hasil manual mendekati dengan hasil *software* 3D, kecuali untuk nilai momen (My) akibat berat sendiri, beban banjir, dan kombinasi.

Berdasarkan Tabel 4 terlihat bahwa persen relatif hasil *software* 2D mendekati dengan hasil *software* 3D, kecuali untuk nilai momen (My) akibat beban banjir.

**Tabel 4. Perbandingan hasil *Software* 2D dengan hasil *Software* 3D dalam satuan ton.m.**

Load	Fx		% Relatif	Fz		% Relatif	My		% Relatif
	2D	3D		2D	3D		2D	3D	
Dead	0	0	0	250756,82	250756,82	0	-1950094,65	-1950094,65	0
Siltation	-5295	-5295,13	0,002	0	0	0	-27696,92	-26475,66	4,613
Normal Water	-18000	-18000	0	0	0	0	-94153,85	-90000	4,615
Flood	-43680	-44040	0,817	0	0	0	-299040	-246240	21,442
Combination	-66975	-67335,13	0,535	250756,82	250756,82	0	-2370985,42	-2312810,31	2,515

Perhitungan *software* untuk pemodelan dua dimensi dan pemodelan tiga dimensi menghasilkan hasil perhitungan yang mendekati hasil perhitungan manual. Hal ini dapat

dilihat dari Tabel 2 dan Tabel 3, dimana hasil persen relatif perbedaan gaya reaksi dasar untuk arah x dan z lebih kecil dari 1 %. Selain perhitungan manual, metode elemen hingga dengan bantuan program SAP 2000 dapat juga digunakan untuk menganalisis gaya dan tegangan struktur bendung.

Contoh aplikasi dalam hasil analisis gaya reaksi dasar dan momen terhadap pengontrolan stabilitas bendung terhadap banjir (*flood*):

$$H = 43,680 + 5,295 = 48,975 \text{ ton}$$

$$V = 250,856 \text{ ton}$$

$$MR = 2851,977 \text{ ton.m}$$

$$MOT = 26,475 + 281,590 = 308,065 \text{ ton.m}$$

#### 1. *Overtuning*

$$S.F = \frac{MR}{MOT} = \frac{2851,977}{308,065} = 9,258 > 1,5$$

$$a = \frac{\sum M}{V} = \frac{2851,977 - 308,065}{250,856} = 10,141 \text{ m}$$

$$e = \left| \frac{19,15}{2} - 10,141 \right| = 0,566 \text{ m} < \frac{19,15}{6} = 3,192 \text{ m}$$

#### 2. *Sliding*

$$S.F = \frac{f \times V}{H} = \frac{0,65 \times 250,856}{48,975} = 3,329 > 1,5 \rightarrow \text{memenuhi}$$

#### 3. *Bearing Capacity*

$$a = 10,141 \text{ m}$$

$$e = 0,566 \text{ m}$$

$$M_V = 250,856 \times 0,566 = 141,984 \text{ ton.m}$$

$$M_H = 26,475 + 281,59 = 308,065 \text{ ton.m}$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{V}{A} \pm \frac{M}{W} \\ &= \frac{250,856}{1 \times 19,15} \pm \frac{141,984}{\frac{1}{6} \times 1 \times (19,15)^2} \end{aligned}$$

$$\sigma_{\text{Maksimum}} = 15,422 \text{ ton/m}^2 = 1,542 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma_{\text{Minimum}} = 10,776 \text{ ton/m}^2 = 1,078 \text{ kg/m}^2$$

#### 4. KESIMPULAN

Nilai lendutan arah 1 dan arah 3 untuk pemodelan dua dimensi dan tiga dimensi menghasilkan lendutan pada pemodelan dua dimensi lebih besar (0,14 m untuk arah 1 dan 0,25 m untuk arah 3) dibandingkan dengan pemodelan tiga dimensi.

Hasil perhitungan software pemodelan tiga dimensi lebih teliti jika dibandingkan dengan hasil perhitungan pemodelan software dua dimensi, hal ini terlihat distribusi tegangan lebih merata pada pemodelan tiga dimensi dibandingkan dengan pemodelan dua dimensi.

Hasil perhitungan untuk gaya reaksi dasar pada software model dua dimensi dan tiga dimensi mendekati hasil perhitungan manual, tetapi karena kesamaan pendekatan beban pada model dua dimensi dengan manual, maka hasil gaya reaksi dasarnya lebih mendekati hasil perhitungan manual dibandingkan model tiga dimensi.

Perilaku struktur bendung yang merupakan salah satu bangunan hidroteknik, dapat dimodelkan dengan metode elemen hingga, secara model 2 dimensi (*shell*) maupun secara model 3 dimensi (*solid*). Hal ini terbukti dari hasil pada lendutan, gaya reaksi dasar dan tegangan. Khususnya untuk nilai tegangan S11 minimum balok, nilai tegangan dari model 2 dimensi dapat dikalikan dengan faktor pengali sebesar 0,14 untuk mendapatkan hasil yang optimal (mendekati pemodelan 3 dimensi)

Dibutuhkan kajian lebih dalam untuk menganalisis bangunan hidroteknik lainnya dengan menggunakan metode elemen hingga, jika menggunakan program *SAP 2000* dianjurkan menggunakan pemodelan tiga dimensi agar mendapatkan ketelitian yang lebih akurat. Perlunya penelitian lebih lanjut mengenai korelasi faktor pengali antar pemodelan sederhana dengan 2 dimensi dan pemodelan 3 dimensi.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Daniel, L.S., (1999). *Struktur*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
2. Hadipratomo, W., (2005). "*Dasar-dasar Metode Elemen Hingga*", PT. Danamartha Sejahtera Utama.
3. Hadipratomo, Winarni, R., Paulus P., (1996). *Pengenalan metode elemen hingga pada Teknik Sipil*, Nova, Bandung.
4. Wiryanto, D., (2004). *Aplikasi rekayasa kontruksi dengan SAP2000*, PT. Elex media komputindo, Jakarta.

5. Erman, M., Moch. Memed., (2002). *Desain Hidraulik Bendung Tetap Untuk Irigasi Teknik*, Alfabeta.
6. Joseph, E.B., *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill Book Company, USA.

**Lampiran 1. Peta Lokasi Bendung.**

