



STUDI VARIASI PENAMPANG PADA STRUKTUR SUBMERGED FLOATING TUNNEL

Ery Budiman¹, Farida Afifah Meilani Cyntia Annisa¹, Fachriza Noor Abdi¹

¹Teknik Sipil Universitas Mulawarman Samarinda

Jl. Sambaliung No.9 Kampus Gunung Kelua, Samarinda 75119. Telp. 0541-736834, Fax : 0541-749315

Email: ery_budi@yahoo.com

Abstrak

Submerged Floating Tunnel (SFT) atau Jembatan *under water* adalah sebuah konsep baru di bidang infrastruktur transportasi. Konsep dari SFT adalah meletakkan sebuah struktur berbentuk tubular pada kedalaman tertentu dibawah permukaan air dengan menggunakan gaya apung Archimedes sebagai daya dukungnya (Mazzolani et al 2009). Konsep SFT didasarkan pada teknologi yang biasa diterapkan pada jembatan mengambang dan struktur lepas pantai, tetapi konstruksinya sebagian besar mirip dengan terowongan terendam (*immersed tunnel*). SFT juga sering disebut dengan jembatan *Archimedes*, SFT merupakan solusi teknis untuk jalur penyebrangan bawah air. Prinsip struktural SFT secara umum adalah menggunakan gaya apung pada badan penampang SFT untuk menahan beban vertikal (beban mati dan beban tambahan) yang bekerja pada SFT. Keunggulan SFT dibandingkan struktur jembatan konvensional adalah berkurang / tidak adanya pekerjaan pilar jembatan dan pondasi, sehingga pelaksanaan konstruksi SFT lebih ramah lingkungan, lebih ekonomis dan lebih murah. Pekerjaan pilar jembatan, terutama pada jembatan yang melintasi perairan lebar dan dalam seperti selat, membutuhkan waktu yang lama serta material dengan jumlah yang besar. Pada SFT, ruang bebas bagi lalu lintas kapal diberikan dengan menempatkan SFT di bawah kedalaman minimum yang dibutuhkan bagi kapal agar dapat berlayar dengan aman. Pada paper ini dilakukan studi variasi penampang SFT dengan beberapa macam bentuk penampang yaitu bentuk penampang lingkaran dan oval. Penampang oval dibuat menjadi 3 variasi dengan dimensi yang berbeda tetapi setiap penampang memiliki luasan dan volume yang sama besar yaitu 28,26 m² dan 8473 m³. Pada penelitian ini dilakukan beberapa variasi pada badan SFT yaitu variasi buoyancy weight ratio (BWR) dan variasi perletakan ujung. Dari hasil penelitian ini diperoleh suatu kesimpulan bahwa kemiringan bidang badan tunnel berpengaruh dalam mereduksi respon struktur SFT. Respon struktur berupa tegangan pada badan tunnel, gaya yang bekerja pada kabel struktur, dan perpindahan badan tunnel pada SFT berpenampang oval lebih kecil dibandingkan dengan SFT berpenampang lingkaran. Selain itu hasil penelitian juga memperlihatkan semakin besar radius mayor pada oval semakin kecil respon struktur terhadap hidrodinamik.

Kata kunci: SFT, cross-section, oval, circle, bwr

1. PENDAHULUAN

SFT atau Jembatan *under water* adalah sebuah konsep baru di bidang infrastruktur transportasi. Konsep dari SFT adalah meletakkan sebuah struktur berbentuk tubular pada kedalaman tertentu dibawah permukaan air dengan menggunakan gaya apung Archimedes sebagai daya dukungnya (Mazzolani et al 2009). Konsep SFT didasarkan pada teknologi yang biasa diterapkan pada jembatan mengambang dan struktur lepas pantai, tetapi konstruksinya sebagian besar mirip dengan terowongan terendam (*immersed tunnel*). SFT juga sering disebut dengan jembatan *Archimedes*, SFT merupakan solusi teknis untuk jalur penyebrangan bawah air.

SFT menggunakan hubungan antara gaya apung dan berat sendirinya untuk mengatur keseimbangan dan posisi di dalam air. Berat sendiri dan gaya apung pada SFT dipengaruhi oleh desain dan material penampang. Para peneliti telah mengkaji beberapa desain penampang SFT dengan variasi material dan bentuk penampang yang berbeda. Diantaranya adalah penampang berbentuk lingkaran dengan bahan dari beton (Tveit 2000), penampang berbentuk lingkaran dengan bahan komposit baja-beton yang dilapisi aluminium pada sisi luarnya (Long 2009) dan penampang berbentuk oval dengan bahan baja yang dianalisa oleh Mazzolani dkk (2000). Hasil dari analisa-analisa tersebut menunjukkan bahwa setiap penampang memiliki perilaku yang berbeda terhadap

beban yang diberikan, yang mana beban yang diberikan tersebut sesuai dengan kondisi perairan tempat SFT tersebut dimodelkan (Ahrens 1997).

Prinsip struktural SFT secara umum adalah menggunakan gaya apung pada badan penampang SFT untuk menahan beban vertikal (beban mati dan beban tambahan) yang bekerja pada SFT. Beban tambahan tersebut antara lain adalah beban lalu lintas maupun beban utilitas dan sebagainya. Rasio gaya apung terhadap beban mati dan tambahan dapat dicari dengan menggunakan dengan rumus sebagai berikut :

$$BWR = \frac{U}{W}$$

Dimana U adalah gaya apung per satuan panjang SFT dan W adalah berat sendiri dan berat tambahan seperti kolom dan utilitas. Penampang SFT adalah elemen struktur SFT yang berfungsi sebagai tempat diletakkannya jalur kendaraan, sekaligus berfungsi sebagai penahan beban mati struktur dan beban tambahan melalui gaya apung yang dihasilkan.

Pembebanan pada SFT secara umum hampir sama dibandingkan dengan jembatan pada umumnya. Yang membedakan dengan pembebanan pada jembatan konvensional adalah beban akibat pengaruh kondisi lingkungan dimana SFT berada. Ahrens (1997) menyatakan beberapa macam pembebanan pada struktur SFT, yaitu:

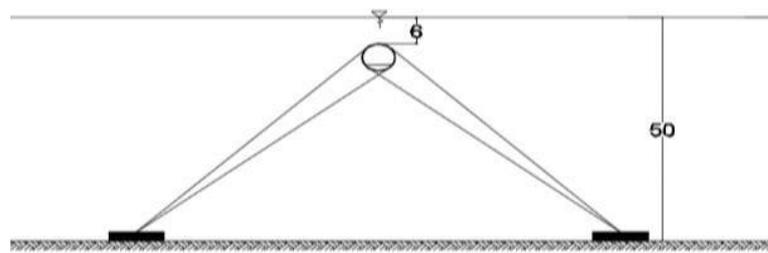
1. Beban Permanen. Beban permanen yang bekerja pada SFT adalah bobot dari berbagai hal komponen struktural dan non-struktural, daya apung air dan tekanan hidrostatik.
2. Beban kerja adalah beban yang terjadi akibat penggunaan struktur Beban Lingkungan. Beban lingkungan adalah beban – beban yang diakibatkan kondisi dari lingkungan lokal SFT berada atau beban yang mengenai struktur dikarenakan fenomena alam.

Dari fakta bahwa komponen gaya gelombang didominasi oleh komponen gaya arah horizontal maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh kemiringan bidang tunnel dalam menerima aksi beban hidrodinamika terhadap respon struktur yang terjadi.

2. METODE PENELITIAN

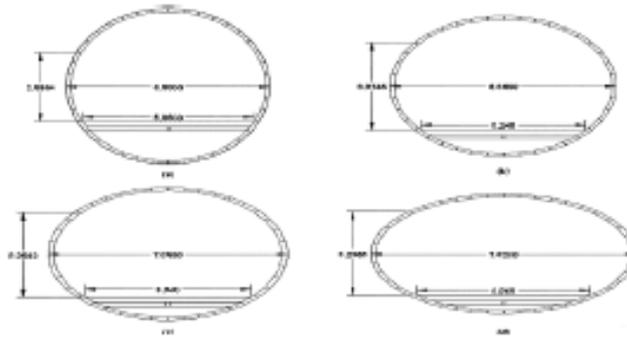
2.1 Preliminary desain

Studi literatur dalam penelitian kali ini bertujuan untuk mengumpulkan teori dan data penunjang yang akan digunakan dalam penelitian. Standar atau peraturann pada penelitian ini bersumber pada API 2 RA – WSD (Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design). *Preliminary* desain adalah perencanaan desain dalam hal ini SFT dibuat perencanaan desain mulai dari lokasi diletakan SFT hingga bentuk penampang SFT. Lokasi SFT dibuat general atau tidak spesifik lokasinya, Sketsa SFT dibawah permukaan laut dengan kedalaman air laut kurang lebih 50 meter yang pada Gambar 1.



Gambar 1. Sketsa penampang SFT

SFT dibuat menjadi 2 variasi bentuk yaitu penampang berbentuk lingkaran dan oval seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Sketsa penampang SFT (a) Lingkaran (b) Oval 1 (c) Oval 2 (d) Oval 3

Pembebanan

Beban mati sendiri (*Self Weight*), yaitu beban yang elemen pokok strukturnya akan dihitung oleh SAP 2000 secara otomatis. Nilai beban mati pada struktur SFT akan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai beban mati setiap penampang

| No | Bentuk Penampang | Beban mati penampang (ton) |
|----|------------------|----------------------------|
| 1 | Lingkaran | 2486,7 |
| 2 | Oval 1 | 2559,2 |
| 3 | Oval 2 | 2642,4 |
| 4 | Oval 3 | 2809,5 |

Beban hidup pada struktur SFT yaitu beban lalu lintas. Beban lalu lintas di bagi menjadi dua yaitu beban tersebar merata (UDL) dan beban garis (KEL).

Beban tersebar merata akan input pada badan jalan secara keseluruhan atau merata pada seluruh badan jalan. UDL diinput dengan menggunakan menu *area load*. Perhitungan UDL berdasarkan pada RSNI-T-02-2005 dengan menggunakan acuan dasar panjang jalan (L) dalam menentukan rumus. Karena L jalan pada SFT lebih dari 30 m maka rumus UDL atau q yang digunakan yaitu :

$$L > 30 \text{ m: } q = 9,0 (0,5 + 15/L) \text{ kPa}$$

Beban tersebar merata jalan yang di input pada SAP yaitu 4,95 kN/m². Beban garis akan diinput pada bagian tengah bentang jalan. Berdasarkan RSNI-T-02-2005 besarnya intensitas beban terpusat atau P adalah 49,0 kN/m.

Beban gaya apung dihitung otomatis oleh SAP 2000 namun dalam hal ini harus ada factor pengali yang dimasukkan yaitu berat jenis air laut dan kedalaman struktur SFT yang dihitung pada setiap *meshing* yang dibuat. Perhitungan kedalaman SFT pada setiap *meshing* dihitung dengan menggunakan menu *joint pattern* pada SAP 2000.

Setelah di-input beban hidrostatis maka didapat nilai beban *buoyancy* yang berbeda beda di setiap penampang. Nilai beban *buoyancy* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Beban *buoyancy* setiap penampang

| No | Bentuk Penampang | Beban <i>buoyancy</i> (tonf) |
|----|------------------|------------------------------|
| 1 | Lingkaran | 8701 |
| 2 | Oval 1 | 8703,12 |
| 3 | Oval 2 | 8699 |
| 4 | Oval 3 | 8699,5 |

Buoyancy weight ratio (BWR) dihitung dengan cara membandingkan antara beban *buoyancy* yang terjadi pada penampang dengan beban sendiri SFT. Berikut akan disajikan perhitungan BWR pada penampang lingkaran dengan menggunakan rumus 2.1.

Dalam paper ini BWR di desain dengan berbagai variasi yaitu BWR 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9. Untuk memenuhi nilai BWR yang telah ditentukan maka struktur SFT membutuhkan ballast atau pemberat agar berat struktur memenuhi nilai BWR yang diinginkan. Pemberat/Ballast diletakkan diseluruh badan Struktur SFT dengan tujuan agar stabilitas struktur tetap terjaga. Nilai BWR dan tebal ballast yang dibutuhkan untuk setiap nilai BWR pada masing masing penampang dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4, Table 5 dan Tabel 6. Nilai *buoyancy* dipertahankan bernilai kurang lebih sama antara ke empat model uji.

Tabel 3. Nilai BWR dan *ballast* untuk penampang lingkaran

| <i>buoyancy</i> | Beban mati | Tebal <i>Ballast</i> | Beban mati + <i>ballast</i> | BWR |
|-----------------|------------|----------------------|-----------------------------|-----|
| ton | ton | cm | ton | |
| 8701 | 2486,7 | 40 | 7916,1 | 1.1 |
| 8701 | 2486,7 | 31 | 6694,6 | 1.3 |
| 8701 | 2486,7 | 24 | 5798,6 | 1.5 |
| 8701 | 2486,7 | 19 | 5065,7 | 1.7 |
| 8701 | 2486,7 | 15 | 4522,7 | 1.9 |

Tabel 4. Nilai BWR dan *ballast* untuk penampang oval 1

| <i>buoyancy</i> | Beban mati | Tebal <i>Ballast</i> | Beban mati + <i>ballast</i> | BWR |
|-----------------|------------|----------------------|-----------------------------|-----|
| ton | ton | cm | ton | |
| 8703,2 | 2559,2 | 39 | 7916,04 | 1.1 |
| 8703,2 | 2559,2 | 30 | 6695,16 | 1.3 |
| 8703,2 | 2559,2 | 23 | 5798,2 | 1.5 |
| 8703,2 | 2559,2 | 18 | 5064,6 | 1.7 |
| 8703,2 | 2559,2 | 14 | 4522 | 1.9 |

Tabel 5. Nilai BWR dan *ballast* untuk penampang oval 2

| <i>buoyancy</i> | Beban mati | Tebal <i>Ballast</i> | Beban mati + <i>ballast</i> | BWR |
|-----------------|------------|----------------------|-----------------------------|-----|
| ton | ton | Cm | ton | |
| 8699,48 | 2809,48 | 35.75 | 7916,88 | 1.1 |
| 8699,48 | 2809,48 | 26.00 | 6695,4 | 1.3 |
| 8699,48 | 2809,48 | 20.92 | 5798,2 | 1.5 |
| 8699,48 | 2809,48 | 15.80 | 5066,72 | 1.7 |
| 8699,48 | 2809,48 | 11.99 | 4522,4 | 1.9 |

Tabel 6. Nilai BWR dan *ballast* untuk penampang oval 3

| <i>buoyancy</i> | Beban mati | Tebal <i>Ballast</i> | Beban mati + <i>ballast</i> | BWR |
|-----------------|------------|----------------------|-----------------------------|-----|
| ton | ton | cm | ton | |
| 8699,44 | 2642,4 | 39 | 7916,56 | 1.1 |
| 8699,44 | 2642,4 | 30 | 6695,88 | 1.3 |
| 8699,44 | 2642,4 | 23 | 5798,12 | 1.5 |
| 8699,44 | 2642,4 | 18 | 5064,6 | 1.7 |
| 8699,44 | 2642,4 | 13 | 4522,68 | 1.9 |

Beban Gelombang

Data-data perhitungan beban gelombang akan disajikan pada Tabel 2.7 dibawah ini:

Tabel 7. Data pendukung beban gelombang

| Input | Simbol (satuan) | Data |
|----------------------|-----------------------|------|
| Gravity | g (m/s ²) | 9.81 |
| Wave height | H(m) | 3 |
| Spectral Peak period | T(s) | 10 |
| Mean water depth | d(m) | 50 |
| Outer diameter pipe | D(m) | 6 |
| Density of seawater | r(kg/m ³) | 1030 |

Perhitungan panjang gelombang menggunakan metode *try and error* dengan contoh perhitungan sebagai berikut :

$$151,3 = \frac{10 \times 10^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi \times 50}{151,3}$$

Maka nilai panjang gelombang yang didapat yaitu 151.3 m.

Pada perhitungan beban gelombang harus dilakukan penentuan teori gelombang yang akan digunakan. Dalam penelitian ini penentuan teori gelombang mengacu pada grafik API RP-2A WSD-2000. Menentukan teori gelombang menggunakan grafik API RP- 2A WSD-2000 yaitu dengan menggunakan parameter perbandingan antara perhitungan dimensi kecuraman gelombang dan perhitungan dimesi kedalaman relative gelombang.

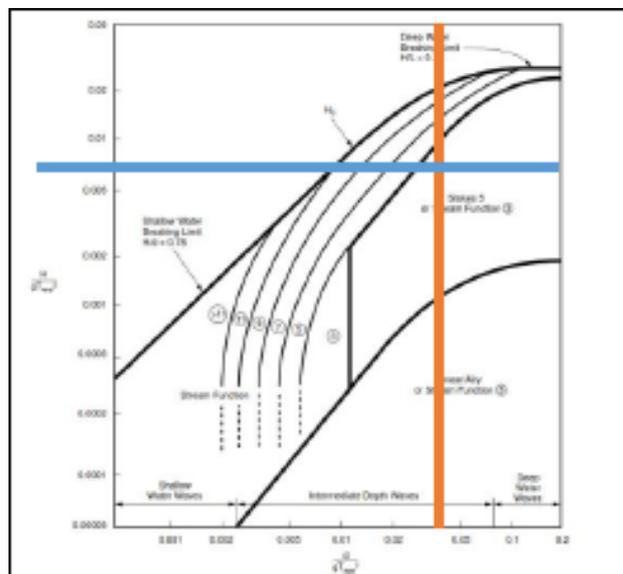
Contoh Perhitungan dimensi kecuraman gelombang dengan ketinggian gelombang 3 m dan periode gelombang 10 s :

$$\frac{H}{gT^2} = \frac{3}{10 \times 10^2} = 0,003$$

Contoh Perhitungan dimensi kedalaman relatif gelombang dengan ketinggian gelombang 3 m dan periode gelombang 10s:

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{50}{10 \times 10^2} = 0,05$$

nilai tersebut kemudian diplot pada Gambar 3 dibawah :



Gambar 3. Penentuan penggunaan teori gelombang

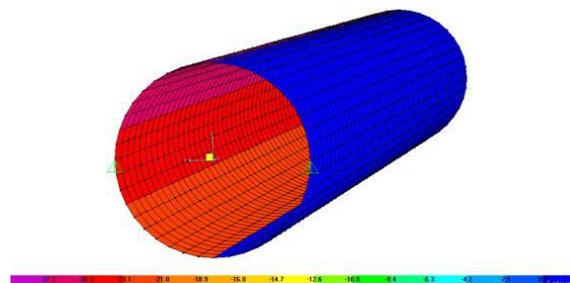
(Sumber : Errata and supplement 1, 2002 ; API recommended practice 2A-WSD)

Berikut nilai gaya total gelombang pada contoh perhitungan SFT penampang lingkaran yang dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Gaya total gelombang pada penampang Lingkaran

| ELEVASI | H 3 |
|-----------|----------|
| -6.0185 | -27272.1 |
| -6.0919 | -27191.1 |
| -6.2369 | -27031.7 |
| -6.45 | -26799.4 |
| -6.7258 | -26502.1 |
| -7.0577 | -26149.3 |
| -7.4373 | -25752.2 |
| -7.8555 | -25322.8 |
| -8.3018 | -24873.5 |
| -8.7653 | -24416.5 |
| -9.2347 | -23963.6 |
| -9.6982 | -23525.9 |
| -10.1445 | -23113.2 |
| -10.5627 | -22734.2 |
| -10.9423 | -22396.4 |
| -11.2742 | -22106 |
| -11.55 | -21868 |
| -11.57631 | -21845.5 |
| -11.9081 | -21563.6 |
| -11.9815 | -21501.8 |

Beban gelombang dimasukkan ke program SAP secara manual sesuai dengan kedalaman SFT dari permukaan laut dapat dilihat pada Gambar 4 berikut:



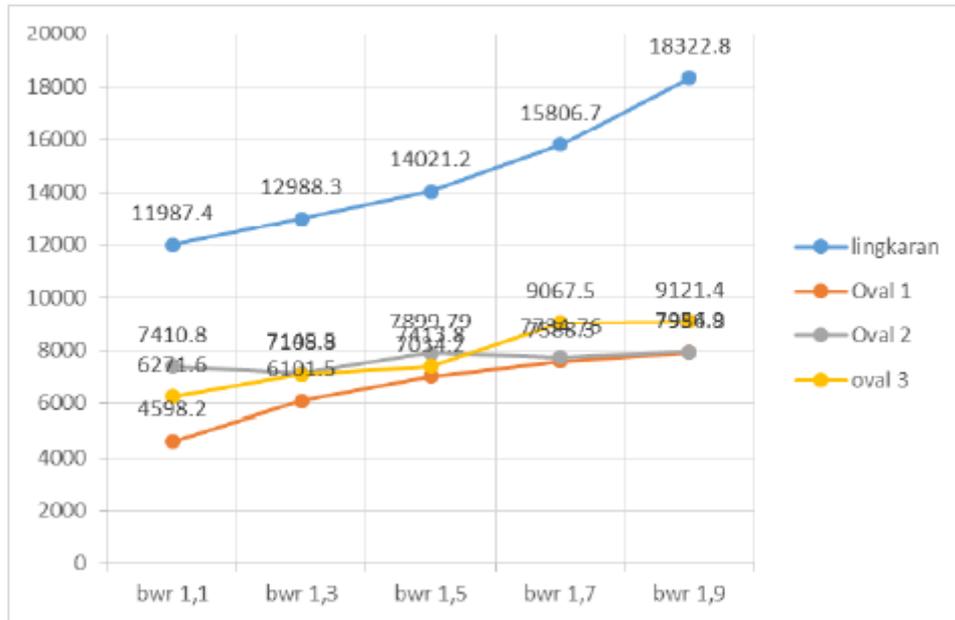
Gambar 4. Input beban gelombang pada aplikasi SAP 2000

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa numerik yang dilakukan oleh program bantu SAP 2000 adalah *displacement* struktur, gaya kabel, dan tegangan pada pelat. Berikut hasil-hasil yang diperoleh tersebut tersebut:

3.1 Gaya pada Kabel Struktur

Hasil analisa numerik gaya dapat dilihat dengan cara membuat grafik perbandingan nilai gaya kabel dan variasi BWR pada setiap variasi penampang dan dapat dilihat pada Gambar 5

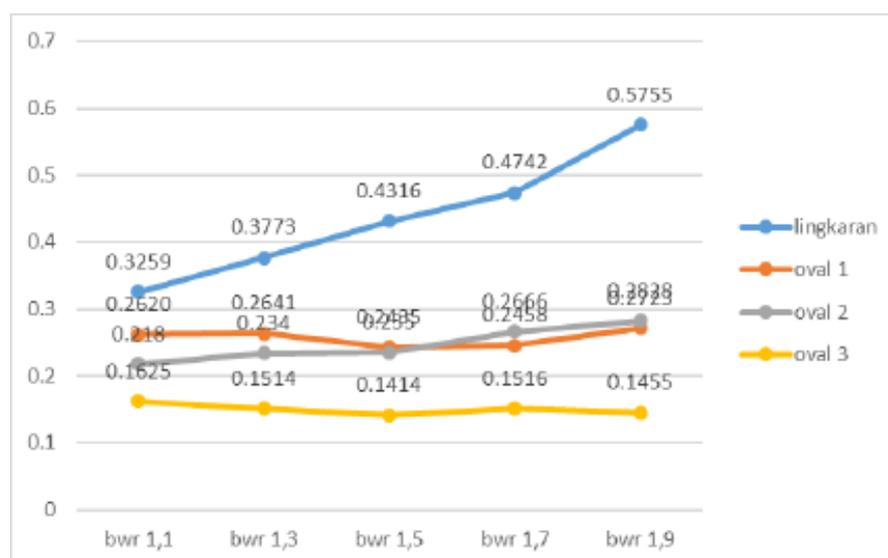


Gambar 5. Perubahan gaya kabel terhadap variasi BWR pada setiap penampang

Hasil ini menunjukkan bahwa pada penampang berbentuk lingkaran gaya kabel menerima gaya yang paling besar dibandingkan dengan betu oval. Bentuk penampang oval 1 menerima gaya paling kecil dibandingkan penampang oval lainnya.

3.2 Perpindahan Badan SFT

Hasil analisa numerik perpindahan badan SFT akan disajikan dalam bentuk grafik. Perubahan perpindahan pada badan SFT terhadap variasi BWR di setiap variasi penampang dapat dilihat pada Gambar 6:

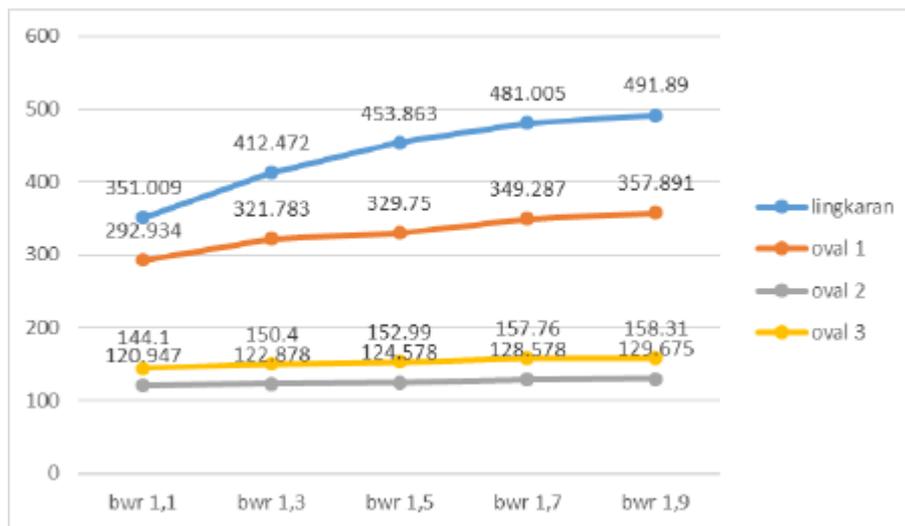


Gambar 6. Perpindahan badan SFT terhadap variasi BWR pada setiap penampang

Dari Gambar 6. dapat dilihat bahwa semakin besar BWR maka perpindahan yang terjadi semakin besar. Dari grafik dilihat bahwa nilai perpindahan badan SFT terkecil terdapat pada penampang oval 3.

3.3 Tegangan Badan SFT

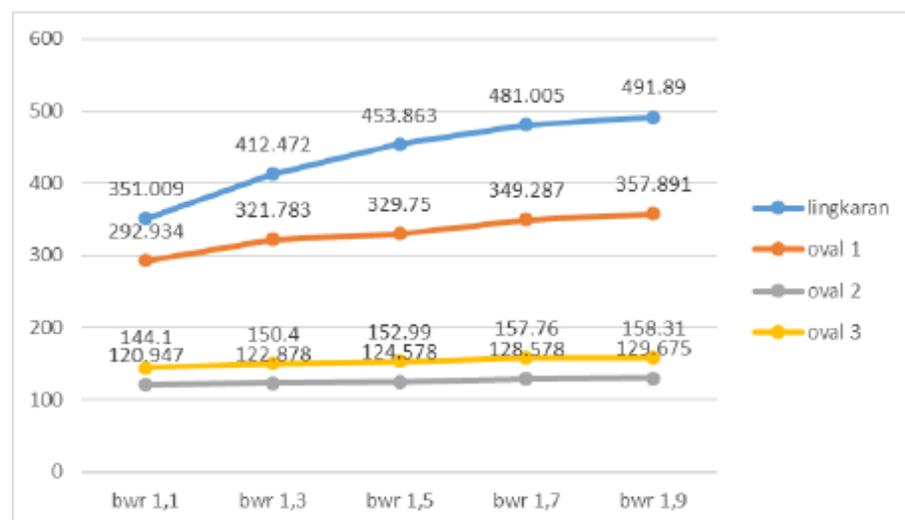
Hasil analisa numerik perpindahan tegangan badan SFT akan disajikan dalam bentuk grafik Perubahan tegangan S11 pada badan SFT terhadap variasi BWR di setiap variasi penampang dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Tegangan S11 pada badan SFT terhadap variasi BWR pada setiap penampang

Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa nilai tegangan S11 penampang terkecil terjadi pada penampang oval 3.

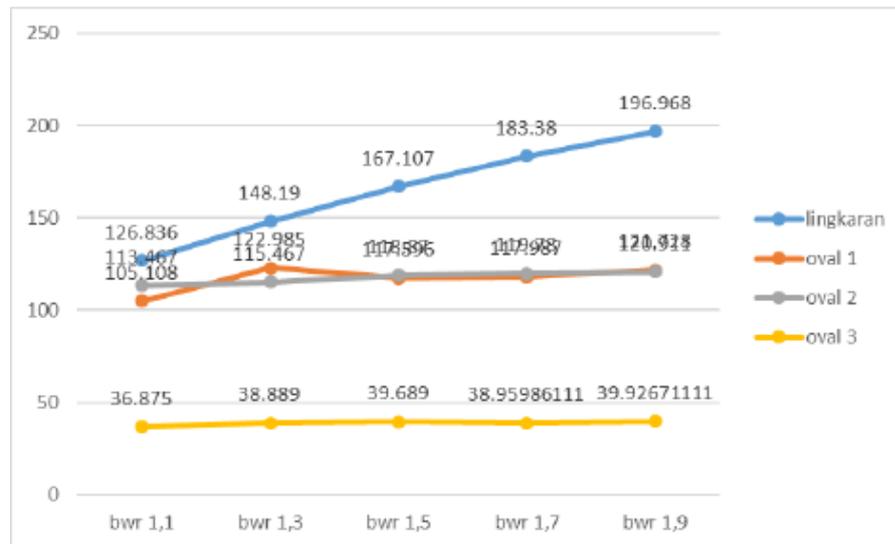
Hasil analisa numerik perpindahan tegangan badan SFT akan disajikan dalam bentuk grafik Perubahan tegangan S22 pada badan SFT terhadap variasi BWR di setiap variasi penampang dapat dilihat pada Gambar 8



Gambar 8 tegangan S22 pada badan SFT terhadap variasi BWR pada setiap penampang

Dari Gambar 8. dapat dilihat bahwa nilai tegangan penampang terkecil terjadi pada penampang oval 2.

Hasil analisa numerik perpindahan tegangan badan SFT akan disajikan dalam bentuk grafik Perubahan tegangan S12 pada badan SFT terhadap variasi BWR di setiap variasi penampang dapat dilihat pada Gambar 9



Gambar 9 Tegangan S12 pada badan SFT terhadap variasi BWR pada setiap penampang

Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa nilai BWR berpengaruh terhadap nilai tegangan S12 badan SFT, semakin besar nilai BWR maka semakin besar pula nilai tegangan yang terjadi pada badan SFT. Dilihat dari bentuk penampang dan nilai tegangan dapat dilihat bahwa bentuk penampang oval 3 memiliki nilai tegangan yang lebih kecil disbanding dengan bentuk penampang lain.

4. Kesimpulan

Dari hasil analisa struktur menggunakan aplikasi SAP 2000 versi 14 maka diperoleh hasil gaya kabel, tegangan pada selimut SFT, dan perpindahan pada badan tunnel. maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Perubahan gaya kabel dipengaruhi oleh variasi BWR, semakin besar nilai BWR maka akan lurus dengan nilai gaya kabel. Sehingga semakin besar nilai BWR maka semakin besar pula nilai gaya kabel yang terjadi. Gaya kabel terbesar terjadi pada penampang berbentuk lingkaran dengan BWR 1,9 dan gaya kabel terkecil terjadi pada penampang Oval 3 dengan nilai BWR 1,1.
2. Perubahan tegangan pada badan SFT dipengaruhi oleh nilai BWR, semakin besar nilai BWR maka semakin besar pula nilai tegangan. Untuk tegangan S11 nilai tegangan terkecil terjadi pada penampang oval 3 nilai BWR 1,1. Untuk nilai tegangan S22 nilai tegangan terkecil terjadi pada penampang Oval 2 dengan nilai BWR 1,1. Dan untuk nilai tegangan S12 nilai tegangan terkecil terjadi pada penampang oval 3 dengan nilai BWR 1,1.
3. Perubahan perpindahan badan tunnel terhadap variasi BWR pada setiap penampang dipengaruhi oleh nilai BWR. Semakin besar nilai BWR maka nilai perpindahan semakin besar. Untuk perpindahan arah x didapat perpindahan terkecil pada penampang oval 3 dengan nilai BWR 1,1. Dan untuk perpindahan arah y didapat perpindahan terkecil pada penampang oval 3 dengan nilai BWR 1,1.



4. Perubahan nilai gaya maksimum kabel dipengaruhi oleh nilai BWR semakin kecil nilai BWR maka nilai gaya kabel semakin kecil juga, nilai gaya kabel terbesar terjadi pada penampang dengan perletakan disetiap sisi. Sehingga kekangan ujung berpengaruh terhadap nilai gaya kabel yang terjadi pada SFT.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahrens, Donna. 1997. SUBMERGE FLOATING TUNNEL : a concept whose time arrived. Tunneling And Underground Space Technology, Vol.12, American Petroleum Institute. 2000. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design (API RP 2A-WSD). Washington, D.C : API.
- Fei,G.,Lu,w.,Wu,X.,Hong,Y. 2010. Fluidstructure interaction of submerged floating tunnel in wave field. Procedia Engineering 4..
- Nallayarasu.S 2009. Offshore Structures Analysis and Design. Madras : Department of Ocean Engineering, Indian Institute of Technology Madras.
- Triatmojo, Bambang. 1999. Teknik Pantai. Yogyakarta : Beta Offset.
- Desn, Robert G. 2000. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists (ced series on ocean – Vol 2). Singapore : world scientific publishing. Dirjen Bina Marga. 1999. Tata Cara Pelaksanaan Pondasi Tiang pancang Kayu Di Atas Tanah Lembek Dan Tanah Gambut. Pedoman Teknis. Direktorat Jenderal Bina Marga-Departemen Pekerjaan Umum. Yayasan Badan Penerbit Pekerjaan Umum. Jakarta.