



Tesis - RC142501

**Penggunaan *Sandwich Plate System* (SPS)
dengan *Polyurethane Elastomer* pada
Submerged Floating Tunnel (SFT)**

AHMAD HERNADI
3114202011

DOSEN PEMBIMING
Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D.
Endah Wahyuni, S.T., M.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah *alamin*, segala puja dan sukur penulis ucapkan kepada Allah Sang Pemilik Ilmu. Atas berkat rahmat-Nyalah Tesis dengan judul **Penggunaan *Sandwich Plate System* (SPS) dengan *Polyurethane Elastomer* pada *Submerged Floating Tunnel* (SFT)** ini dapat diselesaikan. Tak lupa penulis kirimkan *shalawat* dan salam kepada Nabi Muhammad *Shalallahu ‘alaihi wasallam*, manusia yang menjadi pencerah bagi umat manusia hingga akhir zaman kelak.

Tesis merupakan salah satu bagian paling penting dari mata kuliah pada jenjang Magister. Pada tesis inilah ide atau konsep –penelitian- dari seorang Magister untuk mengemukakan pemikirannya akan dunia keilmuan yang digelutinya. Maka tak heran bobot dari SKS tesis adalah yang paling besar diantara semua mata kuliah pada jenjang Magister. Tesis ini terdiri dari 6 bab, dimana tiap bab saling berkaitan satu dengan lainnya. Dimulai dengan latar belakang pemilihan judul dan penelitian ini, dilanjutkan kajian pustaka dan metodologi yang berkaitan dengan penelitian ini. Kemudian analisis-analisis terkait penelitian lalu ditutup dengan kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini.

Tentu tesis ini tidak akan dapat diselesaikan tanpa bantuan orang-orang yang membantu penulis dalam pengerjaan dan penyusunannya, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D. dan Ibu Endah Wahyuni, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku pembimbing pada penelitian tesis ini.
2. Bapak Data Iranata, S.T, M.T., Ph.D. dan Bapak Harun Al Rasyid, S.T., M.T., Ph.D. selaku penguji yang memberikan saran dan kritik pada penelitian ini.
3. Para dosen dan staf di Program Pasca Sarjana Teknik Sipil ITS Surabaya.
4. Teman-teman angkatan 2014 dan angkatan 2015 Pasca Sarjana, baik dibidang keahlian Teknik Struktur, MRT, MRSA maupun MK.

5. Teman-teman Pra S2-3T dari Aceh sampai Papua yang memiliki integritas tinggi dalam mewujudkan Indonesia yang lebih baik.
6. Para dosen dan staf di lingkungan Universitas Borneo Tarakan, terutama di Fakultas Teknik dan di Jurusan Teknik Sipil.
7. Keluarga tercinta, H. Darwin Sanusi, S.E., Hj. Icha H., Abd. Thalib, Haminah, Evy Susanti, S.H., Alesha Khairunnisa Hernavi, Iwan Darmawan, S.Kom, M. Fauzi dan keluarga besar penulis.
8. Direktur dan staf Bahana Citra Consultant, tempat penulis menimba ilmu dalam dunia nyata.
9. Semua pihak yang turut membantu yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Walaupun tesis ini telah melalui proses revisi, tidak dipungkiri pasti terdapat kesalahan di dalamnya. Untuk itu penulis memohon maaf bila terdapat kehilafan pada tesis ini, begitu pula apabila ada saran dan/atau kritik terkait tesis ini akan dengan senang hati penulis untuk terima.

Surabaya, Januari 2017

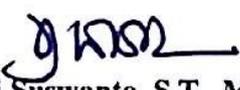
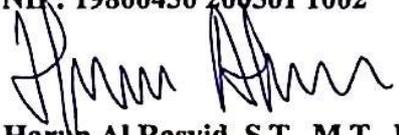
Penulis

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh
gelar
Magister Teknik (M.T.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:
Ahmad Hernadi
NRP. 3114202011

Tanggal Ujian: 11 Januari 2017
Periode Wisuda: Maret 2017

Disetujui oleh:

- 
1. Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing I)
NIP: 19730128 199802 1002
- 
2. Endah Wahyuni, S.T., M.Sc., Ph.D. (Pembimbing II)
NIP: 19700201 199512 2001
- 
3. Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji)
NIP: 19800430 200501 1002
- 
4. Harun Al Rasyid, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji)
NIP: 19830808 200812 1005

a.n. Direktur Program Pascasarjana,
Asisten Direktur



PENGGUNAAN SANDWICH PLATE SYSTEM (SPS) DENGAN POLYURETHANE ELASTOMER PADA SUBMERGED FLOATING TUNNEL (SFT)

Nama Mahasiswa : Ahmad Hernadi
NRP : 3114202011
Pembimbing : 1. Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D.
2. Endah Wahyuni, S.T., M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Submerged Floating Tunnel (SFT) adalah struktur tubular yang mengambang pada kedalaman tertentu di bawah permukaan air yang mengeksplorasi daya dukung yang berasal dari gaya angkat Archimedes. Berbagai studi telah dilakukan terhadap SFT namun hingga saat ini belum ada SFT yang dibangun. Salah satu parameter penting pada SFT adalah penampang/tubularnya.

SFT yang identik dengan kapal sehingga sangat cocok bila diterapkan material yang digunakan pada kapal. Salah satu material yang dikembangkan pada kapal adalah *Sandwich Plate System* (SPS). SPS merupakan material ringan yang terdiri dari dua pelat baja yang dipisahkan oleh bagian inti (*core*) berupa elastomer. Elastomer yang mulai banyak dikaji pada SPS adalah *polyurethane*. Keuntungan SPS dengan *polyurethane* sebagai inti memiliki banyak kelebihan seperti tahan terhadap reaksi kimia air laut, getaran dan kebisingan serta kuat terhadap ledakan.

Pada penelitian ini, SFT yang akan dianalisis memiliki panjang bentang 150 m dengan sisi datar 60 m serta sisi miring 45 m. Penampang yang digunakan pada penelitian ini memiliki bentuk lingkaran dan oval dengan spesifikasi 4-20-4. Dimensi penampang adalah tinggi/diameter 5 m dan lebar 8 m pada penampang oval. Data diperoleh dari penelitian sebelumnya yaitu dasar laut (d) 20 m di bawah permukaan laut, Sudut Inklinasi Kable (SIK) sebesar 54° , BWR sebesar 1,3, perletakan ujung dimodelkan sebagai Sendi-Sendi tinggi gelombang (H) sebesar 5,08 m dan periode gelombang (T) sebesar 9,08 detik. Permodelan pada penelitian ini terdiri dari 4 Model dengan Model A1 berbentuk Lingkaran dan Model A2 dengan bentuk Oval dengan beban hidrodinamis serta Model B1 berbentuk Lingkaran dan Model B2 berbentuk Oval dengan beban *displacement*. Beban *displacement* ini untuk mendapatkan kegagalan pada SFT yang diberikan pada badan penampang sejauh 500 mm.

Proses analisis dilakukan secara numerik menggunakan program bantu *Abaqus 6.14* yang berbasis metode elemen hingga. Pada penelitian ini diperoleh hasil bahwa Model A1 dan Model A2 masih dalam kategori aman dengan tegangan terbesar terjadi pada *Step 2*. Sementara pada Model B1 kegagalan penampang terjadi pada *displacement* 215 mm dan pada Model B2 penampang mengalami kegagalan pada *displacement* 217 mm. Pada elastomer *polyurethane*

tidak mengalami kegagalan hingga *Step* 10 dengan *displacement* arah y sebesar 500 mm.

Kata kunci: *Abaqus, Displacement, Polyurethane, Sandwich Plate System, SPS, Submerged Floating Tunnel, SFT*

THE USE OF SANDWICH PLATE SYSTEM (SPS) WITH POLYURETHANE ELASTOMER FOR SUBMERGED FLOATING TUNNEL (SFT)

By : Ahmad Hernadi
Student Identity Number : 3114202011
Supervisor : 1. Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D.
2. Endah Wahyuni, S.T., M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Submerged Floating Tunnel (SFT) as known as Archimedes Bridge is a tubular structure that floats at a certain depth below the surface of the water carrying capacity exploiting derived from Archimedes lift. Various studies have been conducted on SFT but but no SFT has been constructed yet. The most important for design and build for SFT is the section.

The section of SFT, which is identical to the vessel so that it is suitable when applied methods used on ships. One method that was developed in the vessel is Sandwich Plate System (SPS). SPS is a lightweight material that consists of two steel plates separated by a core in the form of elastomer. Elastomers which began much studied at the SPS is polyurethane. SPS advantage with polyurethane as the core has many advantages such as resistance to chemical reactions seawater, vibration and noise as well as strong against explosions.

Analysis in this research, the SFT has length 150 m with 60 m for flat side and 45 m for the aslant side. The tube that using this research are circle and oval with spesification 4-20-4, diamter/high is 5 m and width is 8 m in oval section. The oldest reserach found that seabed (d) is 20 m, angle of cable inclination is 54° , BWR is 1,3, support in the tip is hinge-hinge, wave heigh (H) is 5,08 m and wave period (T) is 9,08 second. Modeling using in this research are 4 type they are circle section as Model A1 and oval section as Model A2 where this section (A1 and A2) given hidrodynamic load, circle section as Model B1 and oval section as Model B2 given displacement load. Displacement load that given to the model to got fail of SFT, this displacement load given until 500 mm.

Analysis using software Abaqus 6.14 that based on FEM. Acording this research, Model A1 and Model A2 are in safe category with the maximum stress in Step 2. Section failed are occur to the Model B1 in displacement 215 mm and in displacement 217 mm for Model B2. For polyurethane elastomer does not fail until the maksimum displacement in 500 mm for the Step 10.

Keyword: *Abaqus, Displacement, Polyurethane, Sandwich Plate System, SPS, Submerged Floating Tunnel, SFT*

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| JUDUL PENELITIAN | i |
| KATA PENGANTAR | iii |
| LEMBAR PENGESAHAN | v |
| ABSTRAK..... | vii |
| DAFTAR ISI..... | xi |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR TABEL..... | xv |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2. Perumusan Masalah | 4 |
| 1.3. Tujuan dan Manfaat | 5 |
| 1.3.1. Tujuan..... | 5 |
| 1.3.2. Manfaat | 5 |
| 1.4. Batasan Masalah | 6 |
| BAB 2 KAJIAN PUSTAKA..... | 7 |
| 2.1. Submerged Floating Tunnel (SFT)..... | 7 |
| 2.2. Penampang SFT..... | 8 |
| 2.3. Sandwich Plate Sistem (SPS) | 10 |
| 2.4. Gelombang..... | 13 |
| 2.4.1. Gelombang Linier..... | 14 |
| 2.4.2. Gelombang Non Linier..... | 15 |
| 2.4.2.a. Teori Gelombang Stokes | 15 |
| 2.4.2.b. Teori Cnoidal..... | 15 |
| 2.5. Penelitian Sebelumnya..... | 16 |
| BAB 3 METODA PENELITIAN | 23 |
| 3.1. Diagram Alir Penelitian..... | 23 |
| 3.2. Studi Literatur | 24 |
| 3.3. Data..... | 25 |
| 3.4. Preliminary Design | 27 |
| 3.4.1. Design SPS | 27 |
| 3.4.2. Pembebanan..... | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 3.5. Beban Hidrodinamik | 33 |
| 3.5.1. Gelombang Stokes Orde 5 | 34 |
| 3.5.2. Beban Aksi Gelombang | 36 |
| 3.6. Analisis..... | 39 |
| BAB 4 PRELIMINARY DESIGN | 41 |
| 4.1. Pelat Lantai Kendaraan | 41 |
| 4.2. Perhitungan Balok Memanjang..... | 45 |
| 4.3. Perhitungan Balok Melintang | 47 |
| 4.4. Perhitungan Penampang SFT | 49 |
| 4.5. Perhitungan BWR | 50 |
| BAB 5 ANALISIS DAN PEMBAHASAN | 53 |
| 5.1. Menentukan Tipe Gelombang..... | 53 |
| 5.2. Menentukan Panjang Gelombang | 54 |
| 5.3. Menentukan Kecepatan dan Percepatan Partikel Air..... | 55 |
| 5.4. Menentukan Tekanan Gelombang | 56 |
| 5.5. Hal yang Harus Diperhatikan Pada Analisis <i>Abaqus</i> | 59 |
| 5.6. Interpretasi <i>Output</i> Model A1 | 69 |
| 5.7. Interpretasi <i>Output</i> Model A2 | 72 |
| 5.8. Interpretasi <i>Output</i> Model B1 | 76 |
| 5.9. Interpretasi <i>Output</i> Model B2 | 83 |
| 5.10. Perbandingan Model A1, Model A2, Model C1 dan Model C2 | 89 |
| BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN | 93 |
| 6.1. Kesimpulan | 93 |
| 6.2. Saran..... | 94 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 95 |
| BIOGRAFI PENULIS | 99 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.1 Ilustrasi SFT Daikokujima: “ <i>Muroran Submarine Tunnel</i> ” oleh Sachiko Asai | 9 |
| Gambar 2.2 Contoh dari SPS | 10 |
| Gambar 2.3 Penggunaan SPS pada Penghalang Kendaraan | 11 |
| Gambar 2.4 Penggunaan SPS pada Jembatan | 12 |
| Gambar 2.5 Penggunaan SPS pada Kapal..... | 12 |
| Gambar 2.6 Pengujian SPS terhadap Ketahan Api | 12 |
| Gambar 2.7 Bentuk Dasar Gelombang Progesif Sinusoidal | 13 |
| Gambar 2.8 Sketsa Penampang Penelitian oleh Reka Indrwan | 16 |
| Gambar 2.9 Konfigurasi Kabel Transversal SFT | 18 |
| Gambar 2.10 Defleksi Akbiat Kombinasi Maksimum; (a) Tampak 3D, (b) Sudut 54°, (c) Sudut 45°, (d) Sudut 36°, (e) Sudut 27°, (f) Sudut 18°, (g) Sudut 9°, (h) Sudut 0° | 19 |
| Gambar 2.11 Grafik Hubungan <i>Strees – Strain</i> Material Elastomer | 21 |
| Gambar 2.12 Pengujian terhadap (a) Ledakan, (b) Ketahanan Api, (c) Impak pada Baja dan (d) Impak pada SPS | 22 |
| Gambar 3.1 Flow Chart: (a) Penelitian SPS pada Penampang SFT dan (b) Prelimniary Design | 24 |
| Gambar 3.2 Geometri SFT | 26 |
| Gambar 3.3 Parameter perhitungan SPS | 29 |
| Gambar 3.4 Asumsi Permodelan..... | 30 |
| Gambar 3.5 Bentuk Panampang Lingkaran (A1 dan B1) dan Oval (A2 dan B2). 31 | |
| Gambar 3.6 Tekanan Gelombang | 34 |
| Gambar 3.7 <i>Marine Growth Profil</i> | 38 |
| Gambar 3.8 Detail Penampang Efektif | 38 |
| Gambar 3.9 Grafik Penentuan Model Gelombang..... | 39 |
| Gambar 4.1 Geser Pons Pada Pelat Lantai Kendaraan | 43 |
| Gambar 5.1 Penentuan Tipe Gelombang | 54 |
| Gambar 5.2 Kecepatan Gelombang | 56 |
| Gambar 5.3 Gaya Gelombang Model A1 | 57 |
| Gambar 5.4 Gaya Gelombang Model A2 | 58 |
| Gambar 5.5 Profil gelombang dengan berbagai variasi t..... | 58 |
| Gambar 5.6 Permodelan SFT Pada <i>Abaqus</i> | 60 |
| Gambar 5.7 Permodelan <i>Polyurethane</i> | 61 |
| Gambar 5.8 Pilihan <i>Module</i> pada <i>Abaqus</i> | 62 |
| Gambar 5.9 Penggabungan <i>Part</i> | 62 |

| | |
|--|----|
| Gambar 5.10 Pemberian Material SPS | 63 |
| Gambar 5.11 Input Beban Hidrostatik..... | 64 |
| Gambar 5.12 <i>Screen Shoot Subrotine Aqua</i> | 65 |
| Gambar 5.13 Cara Pemberian Beban <i>Aqua</i> dan Tipe Gelombang | 66 |
| Gambar 5.14 Beban <i>Displcament</i> Model B2..... | 66 |
| Gambar 5.15 Penampang SPS yang Belum Dipartisi | 67 |
| Gambar 5.16 Penampang SPS yang Telah Dipartisi | 68 |
| Gambar 5.17 Penampang SPS Setelah Diberikan <i>Mesh</i> | 68 |
| Gambar 5.18 <i>Displacement</i> Penampang dan Tegangan Pada Kabel Model A1 ... | 70 |
| Gambar 5.19 <i>Output</i> Tegangan S Model A1 | 71 |
| Gambar 5.20 <i>Output Displacement</i> Model A1 | 72 |
| Gambar 5.21 Tegangan S Model A2 | 74 |
| Gambar 5.22 Spektrum <i>Displacement</i> Model A2 | 75 |
| Gambar 5.23 <i>Displacement</i> Penampang Model A2 | 75 |
| Gambar 5.24 Tegangan Penampang dan <i>Displacement</i> Model B1 | 77 |
| Gambar 5.25 Gambar Hubungan Tegangan Kabel dan <i>Displacement</i> | 79 |
| Gambar 5.26 Tegangan Pada SFT Model B1 | 81 |
| Gambar 5.27 <i>Displacement</i> Model B1 | 82 |
| Gambar 5.28 Hubungan Tegangan Penampang dan <i>Displacement</i> Model B2 | 86 |
| Gambar 5.29 Tegangan Pada Penampang Model B2 | 87 |
| Gambar 5.30 <i>Displacement</i> Model B2 | 88 |
| Gambar 5.31 Perbandingan Tegangan t_1 Model A1 dan Model A2..... | 91 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 Perbandingan antara Penampang Beton dan Beton-Baja..... | 10 |
| Tabel 2.2 Karakteristik Mekanikal Properties Material <i>Polyurethane</i> | 21 |
| | |
| Tabel 3.1 Spesifikasi Material Penelitian..... | 26 |
| Tabel 3.2 Parameter Ketebalan Minimum | 27 |
| Tabel 3.3 Nilai Faktor Material Baja | 28 |
| Tabel 3.4 Konfigurasi Permodelan SPS..... | 31 |
| Tabel 3.5 Hasil penelitian Reka Indrawan Penampang Baja | 31 |
| Tabel 3.6. Koefisien Drag dan Inersia | 37 |
| | |
| Tabel 4.1 Propertis penampang WF 250x175x7x11 | 45 |
| Tabel 4.2 Beban Pada Balok Memanjang..... | 46 |
| Tabel 4.3 Kontrol Balok memanjang..... | 46 |
| Tabel 4.4 Propertis Penampang WF 600x300x14x23..... | 47 |
| Tabel 4.5 Tabel Beban Mati Balok Melintang..... | 48 |
| Tabel 4.6 Tabel Beban Hidup Balok Melintang | 48 |
| Tabel 4.7. Tabel Kontrol pada Balok Melintang..... | 49 |
| Tabel 4.8 Tabel Perhitungan Tebal SPS | 50 |
| Tabel 4.9 Tabel BWR | 50 |
| | |
| Tabel 5.1 Tegangan Model A1..... | 69 |
| Tabel 5.2 Tegangan Penampang dan Kabel Model A2..... | 72 |
| Tabel 5.3 <i>Output</i> Tegangan Kabel Hingga Putus dan <i>Displacement</i> | 78 |
| Tabel 5.4 Tegangan Penampang Model B2 | 84 |
| Tabel 5.5 Perbandingan Model A1 dan Model C1 | 89 |
| Tabel 5.6 Perbandingan Model A2 dan Model C2 | 89 |
| Tabel 5.7 Perbandingan Model A1 dan Model A2 | 91 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sebagai negara yang terdiri dari berbagai pulau, Negara Kesatuan Republik Indonesia (NKRI) sangat perlu untuk menghubungkan pulau-pulau yang ada demi peningkatan pertumbuhan ekonomi, politik, sosial dan budaya. Untuk kepentingan tersebut diperlukan infrastruktur yang dapat menjadi alat penghubung antar pulau. Selain penggunaan alat transportasi kapal laut sebagai penghubung antar pulau, saat ini infrastruktur yang berkembang di dunia adalah jembatan yang berada di atas permukaan air dan terowongan dasar laut (*immersed tunnel* dan *underground tunnel*)-konvensional. Keduanya, baik dari segi pengerjaan maupun biaya, membutuhkan waktu pengerjaan yang lama dan biaya yang tidak murah (Hakkart dkk, 1993).

Konsep baru hadir yaitu teknologi jembatan penyebrangan antar pulau dengan sistem *Submerged Floating Tunnel* (SFT) atau terowongan layang bawah air. Secara garis besar, SFT adalah struktur tubular yang mengambang pada kedalaman tertentu dibawah permukaan air yang mengeksplorasi daya dukung yang berasal dari gaya angkat Archimedes, memiliki posisi yang tetap melalui suatu sistem ankur yang terbuat dari kabel yang dihubungkan dengan dasar laut. Dengan sistem ini, adanya bantuan kekuatan dari pengaruh gaya angkat struktur akibat berada dalam air (pengaruh gaya apung) merupakan kelebihan dan keunggulan tersendiri dibandingkan dengan jembatan konvensional dan tunnel underground (Faggiano dkk, 2005).

Menurut Jakobsen (2010), beberapa keuntungan dari SFT adalah dari segi volume pekerjaan, SFT tidak memiliki volume terlalu besar karena tidak perlu membuat tiang-tiang pier dan pondasi tiang seperti halnya pada jembatan konvensional dan jika dibandingkan dengan *immersed tunnel* dan *underground tunnel* (konvensional) maka SFT mempunyai panjang terowongan yang paling kecil sehingga dapat menghemat biaya konstruksi dan konsumsi energi kendaraan

maupun kereta penumpang. Struktur SFT pada dasarnya terdiri dari tiga bagian utama yaitu :

1. Struktur tunnel yang terdiri dari sejumlah segmen-segmen tunnel dan merupakan tempat lalu lintas.
2. Struktur penghubung antara pantai dan tunnel.
3. Sistem kabel yang diangkur pada dasar laut beserta pondasinya.

Berdasarkan *Forum of European Highway Research Laboratory* (FEHRL) *Report No.1996/2a* estimasi kuantitatif perbandingan panjang terowongan antara SFT dan terowongan tradisional untuk 1000 m panjang penyebrangan air dan 100 meter kedalaman air adalah 4 km untuk SFT dan 14 km untuk terowongan konvensional. Keuntungan lain adalah jika dilihat dari segi pelaksanaan waktu konstruksi relatif lebih pendek, dampak lingkungan yang berkaitan dengan *landscape* dan polusi sangat rendah serta tidak mengganggu lalu lintas perkapalan (Hakkart dkk, 1992).

Markey (2010) mengatakan walaupun belum ada struktur SFT aktual yang dibangun sampai saat ini di dunia dikarenakan untuk membangun struktur ini akan ditemui berbagai macam kesulitan teknik seperti desain arsitektur tunnel, konfigurasi sistem kabel, struktur penghubung antara tabung *tunnel* dengan pantai dan instalasi *tunnel* itu sendiri. Beberapa isu penting yang berhubungan dengan material, keamanan, stabilitas dan realibilitas dari SFT ketika dikenai beban hidrodinamik, beban gempa dan beban tubrukan telah menjadi objek penelitian yang sedang berjalan sampai saat ini (Zang dkk, 2010).

Indrawan (2011) melakukan penelitian terhadap penampang beton dan baja pada SFT dengan model berbentuk lingkaran dan oval. Hasil analisa numerik menunjukkan bahwa penampang beton memiliki rasio perbandingan tegangan aktual terhadap tegangan ijin yang lebih besar dibandingkan penampang baja yaitu sebesar 97,8% berbanding 91,3% . Hasil analisa numerik juga menunjukkan bahwa lendutan penampang beton lebih besar daripada penampang baja, yaitu 127,55 mm berbanding 22,4 mm. Untuk bentuk penampang oval memiliki lendutan tepi yang lebih besar daripada penampang lingkaran yaitu 28 mm dibandingkan 22,4 mm.

Penampang pada penelitian Indrawan (2011) hanya melakukan permodelan dengan 1 (satu) material saja. Perkembangan teknologi yang semakin maju memberikan alternatif-alternatif yang sangat berperan guna menyempurnakan berbagai macam bentuk sistem yang digunakan oleh manusia, salah satunya adalah hadirnya material *Sandwich Plate System* (SPS). SPS sendiri telah mulai digunakan pada pembangunan kapal yang sangat identik dengan konstruksi SFT –yang membutuhkan material yang kuat namun ringan agar dapat mengapung.

IE (*Intelligent Engineering*) yang merupakan pemilik hak paten SPS telah melakukan pengujian karakteristik dari material SPS sebagai bahan pada konstruksi kapal dan juga bangunan sipil seperti pelat jembatan, gedung dan stadion. IE sendiri telah memberikan nilai-nilai material properties dari keunggulan-keunggulan material SPS ini. Brooking dan Kennedy (2004) menyebutkan bahwa SPS ini selain ringan juga mampu mereduksi akibat ledakan, yang sangat berguna ketika terjadi kecelakaan/ledakan pada jalur SFT.

Momcilovic dan Motok (2009) menyatakan SPS merupakan material ringan yang terdiri dari dua pelat baja yang dipisahkan oleh bagian inti (*core*) berupa elastomer. Pelat biasanya terbuat dari baja yang disatukan melalui parameter bar dibagian tepi pelat, *polyurethane* elastomer berada diantara kedua pelat tersebut dengan proses injeksi.

Brooking dan Kennedy (2004) melakukan eksperimen dan simulasi numerik pada performa, keselamatan dan keunggulan produksi pada SPS yang diterapkan pada struktur *double hull* pada kapal tanker. Hasil dari penelitian tersebut menyatakan perbandingan berat penggunaan SPS jauh lebih ringan dari penggunaan material baja konvensional, hal ini dikarenakan penggunaan konstruksi SPS mampu menghilangkan penggunaan penegar pada konstruksi baja konvensional dan mengurangi setidaknya 20% biaya produksi dalam hal volume pekerjaan pengecatan dan kemudahan dalam pekerjaan.

Polyurethane adalah jenis material polimer yang unik dan luas dalam pemakaiannya. Material ini ditemukan oleh Prof. Otto Bayer, kimiawan berkebangsaan Jerman pada tahun 1937. SPS sendiri telah dikenal penggunaannya sebagai material komposit sejak perang dunia kedua, dimana digunakan sebagai

bentuk material pesawat tempur berbahan dasar *plywood* (Welch D., 2005 dalam Momcilovic dan Motok, 2009). Awal pembentukan material ini dibentuk menyerupai serat yang didesain untuk menandingi serat nilon. Akan tetapi penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa *polyurethane* bukan hanya dapat digunakan sebagai serat, tapi dapat juga digunakan untuk membuat busa (*foam*), bahan elastomer (karet/plastik), lem, pelapis (*coating*) dan lain-lain (Welch D., 2005 dalam Momcilovic dan Motok, 2009).

Pemodelan secara numerik dilakukan dengan menerapkan pembebanan struktur SFT ini menggunakan studi kasus pada salah satu lintasan penyebrangan antar pulau di kepulauan Seribu, yaitu antara pulau Panggang dan pulau Karya di Jakarta. Prototipe SFT yang akan dibangun direncanakan menggunakan struktur baja pada badan dan rangka terowongan dan struktur beton pada lantai jembatan terowongan. Objek penelitian ini menitikberatkan pada penampang SFT dengan SPS berbentuk lingkaran dan oval yang dibebani beban hidrodinamik serta beban *displacement*.

Analisis dan permodelan SPS pada SFT ini dilakukan dengan menggunakan bantuan software berbasis *Finite Element Method* (FEM). Diantara software yang sangat familiar dikalangan teknik sipil berbasis FEM adalah *Abaqus*. Berbeda dengan *SAP 2000* yang sangat familiar, *Abaqus* tidak satuan sehingga perlu menyamakan semua satuan pada saat proses input. *Abaqus* sangat baik dalam menganalisis elemen-elemen yang lebih kecil dari suatu struktur. Pada penelitian ini akan menganalisis perilaku dari tegangan dan *displacement* dari penampang SFT dengan SPS. Software yang digunakan untuk menganalisis menggunakan *Abaqus 6.14*. Diharapkan perilaku dari tegangan dan *displacement* dengan SPS ini lebih baik dari pada tanpa SPS dan berada di bawah dari batas yang diijinkan.

1.2. Perumusan Masalah

Penampang dengan material yang kuat namun ringan pada struktur SFT telah menjadi isu utama karena berhubungan erat dengan masalah keamanan, stabilitas dan realibilitas struktur. Studi kali ini dimaksudkan untuk menginvestigasi penggunaan SPS pada penampang SFT. Studi ini merupakan

studi kasus pada lintasan penyebrangan antara Pulau Panggang dan Pulau Karya sehingga data lingkungan dan pembebanan diperoleh dari daerah sekitar ke dua pulau tersebut yang diambil dari penelitian sebelumnya. Beberapa permasalahan yang akan coba diselesaikan adalah:

1. Bagaimana memodelkan SPS dan memberikan beban gelombang dinamis pada SFT?
2. Bagaimana perilaku *displacement* dan tegangan yang terjadi pada SFT dengan SPS?
3. Bagaimana perilaku *displacement* dan tegangan SFT dengan SPS pada kondisi ekstrim?
4. Bagaimana perbandingan SFT dengan SPS dan SFT dengan penampang baja?

1.3. Tujuan dan Manfaat

1.3.1. Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Mengetahui cara memodelkan SPS dan memberikan beban gelombang dinamis pada SFT.
2. Mengetahui hubungan *displacement* dan tegangan yang terjadi pada SFT dengan SPS.
3. Mengetahui hubungan *displacement* dan tegangan SFT dengan SPS pada kondisi ekstrim.
4. Mengetahui perbandingan SFT dengan SPS dan SFT dengan penampang baja

1.3.2. Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Sebagai bahan referensi dalam perencanaan SFT dengan material yang berbeda sehingga memberikan alternatif yang lebih banyak kepada *stake holder* dan perencana dalam pembangunan SFT kelak.
2. Memperlihatkan perilaku SPS pada SFT yang berguna bagi praktisi dan akademisi, khususnya dibidang teknik sipil.

1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini membatasi permasalahan pada:

1. *Software* berbasis FEM menggunakan *Abaqus 6.14*
2. Tidak memperhitungkan biaya
3. Tidak memberikan metode kerja
4. Tidak menghitung sambungan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1. Submerged Floating Tunnel (SFT)

Submerged Floating Tunnel (SFT) atau juga disebut *Archimedes Bridges* (AB) merupakan konsep yang telah digagas sejak tahun 1886 oleh Sir James Reed (Inggris) dan dikembangkan oleh Trygve Olsen Dale (Norwegia) pada tahun 1924. Pada tahun 1960 dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai SFT ini di beberapa negara seperti Italia, Jepang dan Norwegia SFT merupakan salah satu konsep yang baik untuk melakukan penyeberangan antar pulau yang dipisahkan oleh air -sungai/laut (Østlid, 2010).

Konsep SFT adalah meletakkan suatu struktur berbentuk tubular pada kedalaman tertentu di bawah permukaan air dan ditahan oleh suatu sistem ankur untuk membuatnya tetap berada pada tempatnya. SFT merupakan salah satu solusi transportasi penyeberangan antar sungai yang paling efisien. Walaupun begitu, belum ada SFT yang dibangun hingga kini. Kemungkinannya adalah belum ada data yang pasti mengenai perilaku SFT terhadap lalu lintas dan kondisi alam, seperti gelombang dan gempa (Faggiano dkk, 2010) serta kesulitan teknis seperti desain arsitektur tunnel, konfigurasi sistem kabel dan struktur penghubung tabung tunnel dengan pantai dan instalasi tunnel itu sendiri (Markey, 2010).

Hakkart dkk (1993) menyebutkan bahwa tahun 1989, pada pertemuan *International Tunneling Association* (ITA), asosiasi/organisasi ini memberikan tugas kepada anggotanya untuk memberikan perhatian khusus terhadap *Immersed Tunnel* dan *Submerged Floating Tunnel* (SFT). Instruksi diberikan agar anggota asosiasi tersebut menitikberatkan penelitian dan desain terhadap:

1. *Immersed* atau *Submersed Tunnel*, struktur ini dapat dibangun baik di sungai maupun terusan selama memungkinkan untuk dibangun. Tipe ini sudah lama digunakan –konvensional.
2. *Submerged Floating Tunnel* (SFT), merupakan konsep baru dalam melakukan penyeberangan antar pulau dengan kondisi laut/sungai dalam. Pada konsep

ini, terowongan (*tunnel*) tidak berada di dasar laut/sungai tetapi menggantung (*suspended*).

Zang dkk (2010) dan Hakkart dkk (1993), menyebutkan bahwa SFT memiliki beberapa kelebihan bila dibandingkan dengan jembatan konvensional dan *immersed tunnel*, diantaranya adalah:

1. Pengaruhnya sangat kecil terhadap lingkungan di sekitarnya, tidak mengganggu pelayaran di atasnya.
2. Biaya pelaksanaan tidak berpengaruh besar terhadap peningkatan panjang sungai.
3. SFT tidak dipengaruhi cuaca, termasuk angin topan atau kabut yang ada di permukaan sungai atau selat.
4. Panjang dan kemiringan (*slope*) SFT dapat di kurangi dengan efektif.

Menurut Jacobsen (2010), beberapa keuntungan dari SFT adalah dari segi volume pekerjaan, SFT tidak memiliki volume terlalu besar karena tidak perlu membuat tiang-tiang pier dan pondasi tiang seperti halnya pada jembatan konvensional dan jika dibandingkan dengan *underground tunnel* (konvensional) maka SFT mempunyai panjang terowongan yang paling kecil sehingga dapat menghemat biaya konstruksi dan konsumsi energi kendaraan maupun kereta penumpang.

2.2. Penampang SFT

Jakobsen (2010) menyebutkan bahwa struktur SFT pada dasarnya terdiri dari tiga bagian utama yaitu :

1. Struktur *tunnel* yang terdiri dari sejumlah segmen-segmen *tunnel* dan merupakan tempat lalu lintas.
2. Struktur penghubung antara pantai dan *tunnel*.
3. Sistem kabel yang diangkur pada dasar laut.



Gambar 2.1 Ilustrasi SFT Daikokujima: “*Muroran Submarine Tunnel*” oleh Sachiko Asai (Sumber: Kanie, 2010)

Pada ilustrasi di atas merupakan studi SFT yang dicoba dikembangkan di Pulau Daikokujima, Muroran, Hokkaido, Jepang. SFT tersebut berdiameter 4 m yang digunakan sebagai tempat wisata bawah air. Gambar 2.1 di atas juga memperlihatkan dengan jelas potongan dari SFT.

Studi mengenai penampang SFT yang umum digunakan adalah beton, gabungan dari baja dan beton (Zang dkk, 2010), baja dan komposit aluminium (Faggiano dkk 2005). Pada Tabel 2.1 terlihat bahwa biaya yang digunakan untuk penampang beton-baja lebih besar bila dibandingkan penampang beton saja, namun memiliki keunggulan yang lebih banyak dari pada hanya penampang beton (tanpa baja). Waktu pelaksanaan penampang baja-beton juga lebih cepat bila dibandingkan dengan penampang beton, sehingga akan lebih optimum menggunakan penampang beton-baja.

Tabel 2.1 Perbandingan antara Penampang Beton dan Beton-Baja

| Item | Concrete tube | Steel-Concrete tube |
|---------------|---|---|
| Cost | Low cost | High cost |
| Section type | Rectangular section is majority | Round section or double round section |
| Construction | Cast in dry-dock, template needing, long construction cycle | Steel shell acting as template, pouring concrete in floating state, quick construction |
| Waterproofing | Control structural cracks and shrinkage cracks and set waterproof layer on inner and outer layer of tube to warerproof. Difficulty of waterproofing is relatively great | The outer steel shell is user to waterproof, welding quality assurance system is key point. Difficulty of waterproofing is relatively small |

Sumber: Zang dkk, 2010

2.3. Sandwich Plate Sistem (SPS)

Sandwich Plate System (SPS) adalah suatu sistem struktur yang mulai dikembangkan baik untuk konstruksi kapal maupun konstruksi gedung dan jembatan. SPS ini terdiri dari 3 (tiga) lapisan, yaitu lapisan luar, inti dan lapisan dalam. Dimana lapisan luar dan lapisan dalam terdiri dari material yang sama dan inti terdiri dari polimer. *Polyurethane* adalah jenis material polimer yang unik dan luas dalam pemakaiannya. Material ini ditemukan oleh Prof. Otto Bayer, kimiawan berkebangsaan Jerman pada tahun 1937. SPS sendiri telah dikenal penggunaannya sebagai material komposit sejak perang dunia kedua, dimana digunakan sebagai bentuk material pesawat tempur berbahan dasar *Plywood* (Welch. D, 2005 dalam Momcilovic dan Motok, 2009).



Gambar 2.2 Contoh dari SPS (Sumber: Brosur I.E., Ltd.)

Awal pembentukan material ini dibentuk menyerupai serat yang didesain untuk menandingi serat nilon. Akan tetapi penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa *polyurethane* bukan hanya dapat digunakan sebagai serat, tapi dapat juga digunakan untuk membuat busa (*foam*), bahan elastomer (karet/plastik), lem, pelapis (*coating*), dan lain-lain (Welch. D, 2005 dalam Momcilovic dan Motok, 2009). Berdasarkan brosur Intelligent Engineering, Ltd., pemakaian SPS dengan *polyurethane* kini lebih luas dan umum seperti stadion, bangunan gedung, jembatan, kapal, bangunan lepas pantai bahkan truk. Berbagai keunggulan dari SPS juga diperlihatkan pada brosur ini, seperti tahan akan: ledakan, api, dampak, peluru, mampu meredam getaran dan bunyi serta ringan dan kuat. (Brooking dan Kenedy, 2004; dan brosur Intelligent Engineering, Ltd.)

SPS yang telah diterapkan antara lain pada London Olympic Stadium West Stand Mid Tier (2015), Mississippi State University Softball Stadium (2015), Liverpool Football Club (2015), National Gymnastics Arena, Baku, Azerbaijan (2013), Cape Canaveral (2015), 58 Victoria Embankment (2015), Birmingham New Street Station (tahap 1, 2012 dan tahap 2, 2015), Carnegie Hall – New York (2011), Grand Duchess Charlotte Bridge (2015), Pulaski Skyway Bridge (2015), Ovingham Bridge dan Stanifort Bridge (2014), Dawson Bridge (2010), Ma Fang Bridge (2009), Palang Kendaraan (2015), Truk Tambang (2014), Pintu Kapal (2015), Penampang Kapal (2014), dll (Brosur Intelligent Engineering, Ltd.).



Gambar 2.3 Penggunaan SPS pada Penghalang Kendaraan (Sumber: Brosur E.I., Ltd.)

**Regional Council Bridges
Ovingham Bridge and Staniforth Bridge
March 2014 – July 2015**



Gambar 2.4 Penggunaan SPS pada Jembatan (Sumber: Brosur E.I., Ltd.)

**SPS Overlay
Side Shell Protection on FPSO Cidade De Ilhabela
August 2012**



Gambar 2.5 Penggunaan SPS pada Kapal (Sumber: Brosur E.I., Ltd.)



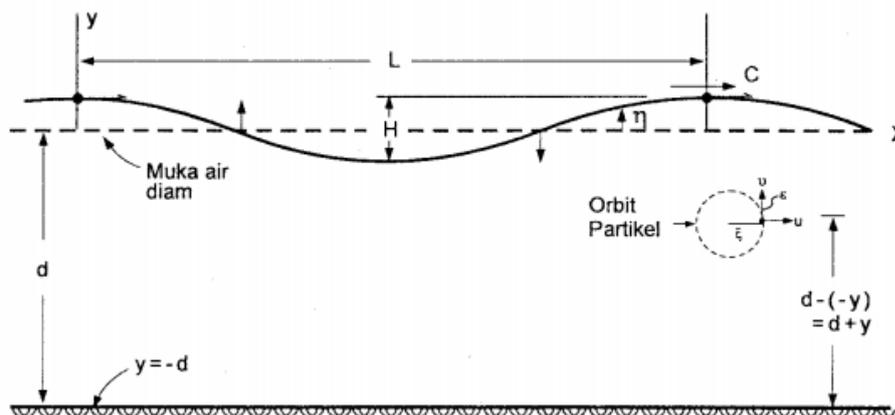
Gambar 2.6 Pengujian SPS terhadap Ketahanan Api (Sumber: Brosur E.I., Ltd.)

Penggunaan SPS yang begitu luas ini dan dengan kelebihanannya serta penerapannya pada kapal yang sangat identik dengan SFT, sehingga sangat relevan bila di jadikan material dan objek penelitian baru pada penampang SFT.

2.4. Gelombang

Gelombang sangat erat kaitannya dengan bangunan yang berada diperairan, baik berupa pemecah gelombang, bangunan lepas pantai, kapal dan juga SFT tentunya karena merupakan salah beban yang bekerja pada bangunan tersebut.

Pergerakan gelombang dapat ditunjukkan dalam fungsi posisi (x) dan waktu (t) atau kombinasi antara keduanya (phase) yang didefinisikan sebagai $\theta = kx - \omega t$. Gambar 3.4 menjelaskan pergerakan gelombang sebagai suatu fungsi posisi pada suatu waktu tertentu di laut. Titik tertinggi gelombang biasanya disebut *crest*/puncak gelombang dan titik terendah gelombang biasanya disebut *trough*/lembah gelombang. Jarak *crest* ataupun *trough* dari muka air diam adalah amplitudo gelombang. Jarak antar puncak dengan puncak atau lembah dengan lembah disebut panjang gelombang (L). Gelombang bergerak dengan cepat rambat C di air dengan kedalaman d . Dalam hal ini yang bergerak hanya bentuk (profil) muka airnya saja.



Gambar 2.7 Bentuk Dasar Gelombang Progesif Sinusoidal (Sumber: Triadmojo, 2010)

dimana:

- d = jarak antara muka air rerata dan dasar laut
- y = jarak gelombang per kedalaman
- $\eta(x,t)$ = profil muka air terhadap muka air rerata

| | |
|----------|---|
| a | = amplitudo gelombang |
| H | = tinggi gelombang = 2a |
| L | = panjang gelombang |
| T | = periode gelombang, interval waktu antara lintasan crest |
| C | = cepat rambat gelombang = L/T |
| k | = angka gelombang = 2π |
| ω | = frkuensi gelombang = $2\pi/T$ |

Ada beberapa macam teori gelombang yang telah dikemukakan para ahli, antara lain teori gelombang Airy, Stokes, Chonidal, Splitary, Dean Stream dan lain sebagainya. Namun yang paling mudah dari teori gelombang tersebut adalah teori gelombang Airy karena bersifat linier. Dan untuk teori gelombang nonlinier yang banyak digunakan adalah teori Gelombang Stokes (Deo, 2013).

2.4.1. Gelombang Linier

Gelombang linier ini dikenal juga dengan nama gelombang Airy atau gelombang amplitudo kecil. Parameter-parameter penting pada teori gelombang ini antara lain kecepatan potensial (ϕ) yang dipengaruhi waktu dan posisi (x,y).

$$\phi = \frac{gH \cosh(d+z)}{2\omega \cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh kd \quad (2.2)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (2.3)$$

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.4)$$

$$u = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.5)$$

$$v = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.6)$$

$$a_x = \left(\frac{2\pi^2 H}{T^2} \right) \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2.7)$$

$$a_y = - \left(\frac{2\pi^2 H}{T^2} \right) \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (2.8)$$

Dimana, g = percepatan gravitasi (m/s^2); H = tinggi gelombang (m); k = angka gelombang = $\frac{2\pi}{L}$; ω = frekuensi gelombang = $\frac{2\pi}{T}$; d = kedalaman perairan (m); z = kedalaman perairan yang ditinjau (m); C = cepat rambat gelombang (m/s); L = panjang gelombang (m), T = periode gelombang (s); t = waktu tinjauan (s); x = panjang gelombang tinjauan (m); η = profil muka air; u = kecepatan partikel air arah horisontal (m/s); v = kecepatan partikel air arah vertikal (m/s), a_x = percepatan partikel air arah horisontal ($m/2^2$); dan a_y = percepatan partikel air arah vertikal ($m/2^2$).

2.4.2. Gelombang Non Linier

Pada gelombang non linier dimana kecuraman gelombang (H/L) terbatas, maka persamaan pada gelombang linier tidak dapat digunakan, sehingga perlu menggunakan metode lain seperti Stokes, Cnoidal, Solitary, Dean's dan lain sebagainya (Deo, 2013).

2.4.2.a. Teori Gelombang Stokes

Nilai untuk \varnothing dan η pada teori gelombang Stokes menggunakan parameter b dan a yang diformulasikan pada persamaan berikut:

$$\varnothing = \sum_{n=1}^M b^n \varnothing_n(H, T, d) \sin(n\theta) \quad (2.9)$$

$$\eta = \sum_{n=1}^M a^n f_n(H, T, d) \cos(n\theta) \quad (2.10)$$

Dimana b_n dan a_n adalah nilai yang tidak terdefinisi dari fungsi H, T dan d ; begitu juga \varnothing_n dan f_n ; θ = sudut fase = $(kx - \omega t)$.

2.4.2.b. Teori Cnoidal

Pada teori ini, \varnothing diidealisasikan dalam fungsi kosinus elips yang tak beraturan.

$$\frac{\varnothing}{L' \sqrt{gd}} = \cos(\sqrt{\sigma} SD) f(x) \quad (2.11)$$

$$\frac{\delta}{L'\sqrt{gd}} = \left[1 - \sigma S^2 \frac{D^2}{2!} + \sigma^2 S^4 \frac{D^4}{4!} + \dots \right] f(x) \quad (2.11)$$

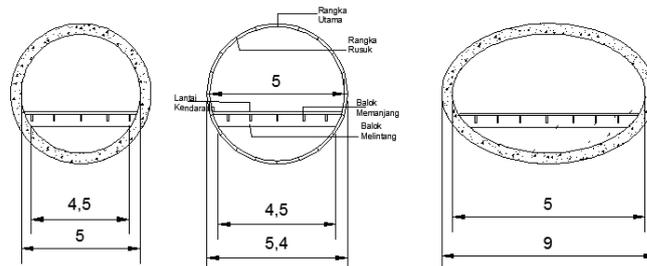
Dimana L' adalah panjang gelombang “yang dipilih”

$$\sigma = \left[\frac{d}{L'} \right]^z \ll 1 \text{ (sangat kecil)} \quad (2.12)$$

$$S = \frac{d + y}{d} \quad (2.13)$$

2.5. Penelitian Sebelumnya

Indrawan (2011) melakukan studi penampang dengan beberapa macam bahan dan bentuk penampang, yaitu: penampang bahan baja bentuk lingkaran, penampang baja bentuk oval, penampang beton bentuk lingkaran dan penampang beton bentuk oval.



Gambar 2.8 Sketsa Penampang Penelitian oleh Reka Indrwan (Indrawan, 2011).

Berdasarkan perhitungan rasio gaya apung, penampang oval beton memiliki ketebalan yang lebih tipis dari tebal beton yang disyaratkan, yaitu sebesar 40 cm. Hasil numerik pada penelitian Indrawan ini menyimpulkan bahwa penampang beton memiliki lendutan lebih besar dari pada penampang baja, yaitu 127,55 cm untuk penampang beton dan 22,4 cm untuk penampang baja. Dan berdasarkan bentuk penampang bulat dan oval dengan bahan baja, ternyata lendutan tepi pada penampang bentuk oval lebih besar dari pada penampang lingkaran, 28 mm berbanding 22,4 mm.

Sholeh dkk (2013) melakukan penelitian terhadap permodelan SFT dengan melakukan analisa numerik terhadap model uji yang dibuat oleh BPPT

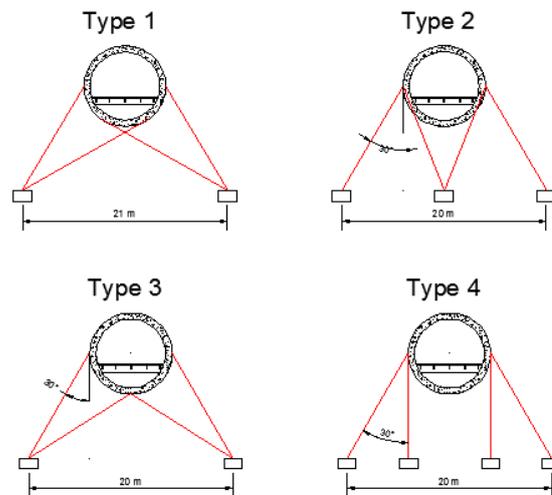
dengan melakukan SAP 2000. Kosentrasi pengujian Sholeh dkk adalah dengan memodelkan elemen kabel pada SAP 2000 dengan 5 model. Permodelan tersebut adalah memodelkannya sebagai berikut:

- Memodelkan sling sebagai *frame*.
- Memodelkan sling sebagai kabel, tanpa *initial tension* dan beban gelombang diperlakukan linear.
- Memodelkan sling sebagai kabel, tanpa *initial tension* dan beban gelombang diperlakukan non-linear.
- Memodelkan sling sebagai kabel, dengan *initial tension* dan beban gelombang diperlakukan linear.
- Memodelkan sling sebagai kabel, dengan *initial tension* dan beban gelombang diperlakukan non-linear.

Hasil uji Sholeh dkk (2013) menunjukkan bahwa pemodelan yang paling mendekati hasil uji Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) adalah model dengan menggunakan elemen kabel dengan memberikan *initial tension* pada kabel tersebut. Dan dengan mendefinisikan gelombang sebagai non-linear dan beban sebagai beban statik. Dengan hasil gaya aksial untuk perletakan ujung berkisar antara 2,3 kg – 6,03 kg sedangkan pada hasil uji BPPT berkisar antara 0,973 kg – 5,662 kg. Sedangkan gaya aksial dari hasil analisa numerik dengan perletakan sendi melingkar berkisar antara 0,2 kg – 3,76 kg dan gaya aksial hasil uji BPPT berkisar antara 0,744 kg – 3,499 kg.

Sipata dkk (2012) melakukan beberapa permodelan konfigurasi kabel dengan SAP 2000. Studi ini untuk mendapatkan konfigurasi kabel yang paling tepat dan efektif dengan material penampang SFT dari beton. Hasil studi ini juga menunjukkan bahwa dengan meletakkan kabel pada 4 (empat) posisi, struktur badan atau dinding SFT yang direncanakan sudah aman dari semua beban yang bekerja. Selain itu gaya prestress sebesar 90.560.870,5 N yang diberikan pada badan SFT sangat membantu struktur SFT dalam menahan beban-beban yang bekerja sehingga dengan menggunakan jembatan dengan sistem ini akan sangat membantu dalam mengurangi volume material pembuatan jembatan penyeberangan antar pulau yang biasa digunakan.

Gambar 2.9. merupakan beberapa konfigurasi kabel transversal SFT yang digunakan Sipata dkk (2012) dalam penelitiannya. Hasil dari studi tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi kabel yang paling efektif adalah Type 1. Konfigurasi tersebut menghasilkan perilaku yang lebih baik dibandingkan dengan konfigurasi kabel lainnya dimana gaya aksial maksimum yang bekerja adalah sebesar 803,6 kips (1 kips = 4.448,2216 N).

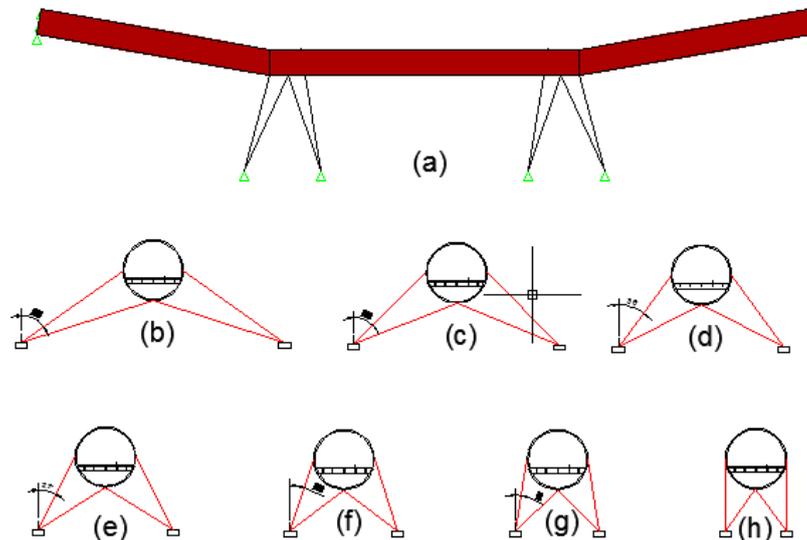


Gambar 2.9 Konfigurasi Kabel Transversal SFT (Sipata dkk, 2012)

Penelitian oleh Komara dan Wahyuni (2014) adalah dengan melakukan beberapa permodelan konfigurasi kabel dengan *SAP 2000 v.14.2.2*. Kabel dimodelkan dengan berbagai konfigurasi yaitu dengan posisi sudut 54° , 45° , 36° , 27° , 18° , 9° , 0° . Adapun konfigurasi kabel yang efektif adalah konfigurasi bentuk segitiga sebagaimana yang telah diteliti Sipata (2013).

Penelitian Komara dan Wahyuni (2014) ini menyebutkan bahwa konfigurasi kabel A sebagai kabel efektif. Pada kondisi ini, gaya aksial, tegangan dan defleksi yang dihasilkan lebih kecil. Kondisi kabel A ini digabungkan dengan parameter efektif lain yaitu kondisi perletakan Sendi-Sendi dan BWR 1,3. Kondisi struktur gabungan tersebut mendapatkan nilai yang mendekati model uji dengan pemodelan kabel menggunakan *initial tension* bawaannya sebesar 26,1 kN dan kondisi beban gelombang non-linier. Gaya yang terjadi pada model uji sebesar

4900 kN dan analisa numerik 4933,993 kN. Sehingga analisa statik menggunakan program bantu SAP 2000 pada kondisi ini dapat digunakan.



Gambar 2.10 Defleksi Akbiat Kombinasi Maksimum; (a) Tampak 3D, (b) Sudut 54°, (c) Sudut 45°, (d) Sudut 36°, (e) Sudut 27°, (f) Sudut 18°, (g) Sudut 9°, (h) Sudut 0° (Sumber: Komara dan Wahyuni, 2014)

Penelitian oleh Wahyudi dan Wahyuni (2014) adalah dengan melakukan pengujian secara numerik terhadap tipe perletakan ujung-ujung tunnel, berat sendiri dengan gaya apung (*Buoyancy Weight Ratio* – BWR) dan konfigurasi kabel. Tipe perletakan yang dimodelkan pada masing-masing ujung tunnel adalah: (1) Sendi-Sendi, (2) Jepit-Jepit, (3) Jepit-Sendi, (4) Jepit-Bebas, (5) Sendi-Bebas, (6) Bebas-Bebas. Hasil dari penelitian ini adalah perletakan ujung yang efektif adalah tipe sendi-sendi dengan konfigurasi kabel Sudut 54° dan BWR 1,3.

Santoso dan Wahyuni (2014) melakukan pengujian secara numerik terhadap *Bouyancy Weight Ratio* (BWR) Pada Struktur *Submerged Floating Tunnel* (SFT). Dimana BWR merupakan parameter utama dalam stabilitas struktur SFT dan setiap wilayah mempunyai gaya buoyancy yang berbeda-beda. BWR yang dianalisa bernilai 1,1 sampai dengan 1,8. Dari hasil analisa diperoleh BWR efektif adalah 1,3. Hasil tersebut kemudian digabungkan dengan parameter lainnya dengan perletakan ujung Sendi-Sendi dan konfigurasi kabel dengan sudut

54°. Hasil menunjukkan bahwa gaya aksial kabel sebesar 4933,993 kN yang mendekati hasil pengujian dengan model yang telah diskalakan sebesar 4900 kN.

Brooking & Kennedy (2004), yang merupakan teknisi pada Intelligent Enigneering, Ltd., bersama dengan Elestrogan telah melakukan pengujian pada material inti SPS yaitu *polyurethane* elastomer. Spesifikasi karakteristik material diuji pada temperatur-temperatur operasional ekstrim. Spesifikasi karakteristik material dari *polyurethane* pada SPS berdasarkan pengujian Brooking dan Kennedy (2004). Spesifikasi karakteristik material diuji pada temperatur-temperatur operasional ekstrim yaitu antara -80°C sampai +80°C. *Mechanical properties* dari material elastomer terdiri dari : berat jenis material, kekuatan tarik, kekuatan kompresi, modulus geser dan poisson rasio yang seluruh pengujiannya berdasarkan ASTM (*American Standard Test Material*) dan DIN (*Deutsches Institut fur Normung*). Berikut ini adalah karakteristik properties material elastomer.

Brooking & Kennedy (2004) juga melakukan pengujian lain yang dilakukan pada SPS, yang meliputi :

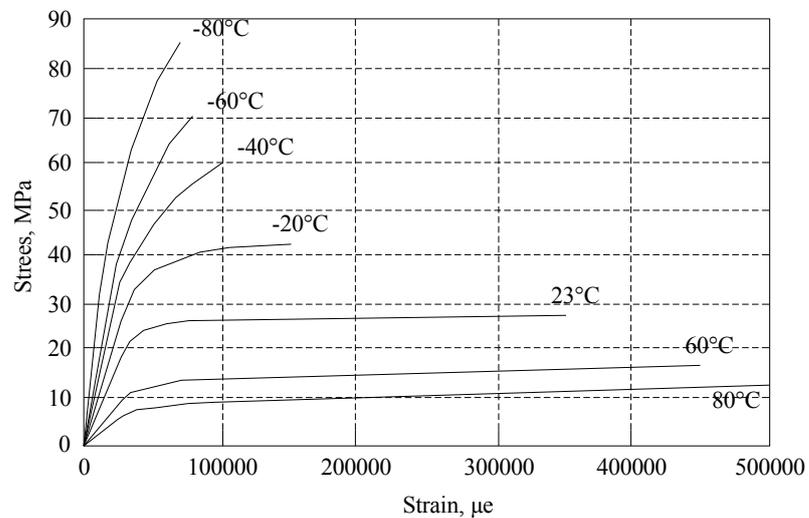
1. Ketahanan *fatigue* (*S-N curves*) pada ikatan antar bidang plat dan sambungan las untuk penggabungan antara setiap panel SPS.
2. Ketahanan pada air laut dan ketahanan kimia pada elastomer harus dapat bertahan selama proses pengoperasian material.
3. Ketahanan terhadap getaran dan peredaman terhadap kebisingan. SPS memberikan ketahanan yang jauh lebih baik dari penggunaan baja.
4. Ketahanan terhadap balistik, diuji dengan dimensi peluru 7,62 mm, hasil dari pengujian ini menunjukkan bahwa kurva balistik untuk SPS berada dibawah dari baja yang menandakan SPS lebih tahan terhadap ketahanan balistik dibanding dengan material baja.

Selain pengujian tersebut di atas, Brooking dan Kennedy (2004) juga melakukan pengujian terhadap proteksi perlindungan pada lingkungan, dengan melakukan pengujian ketahanan terhadap ledakan, uji *impact* dan ketahanan terhadap bahaya kebakaran, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 (b).

Tabel 2.2 Karakteristik Mekanikal Properties Material *Polyurethane*

| | | Test Result | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| | | Density | | | | | | | |
| | | $\rho_e = 1150 \text{ kg/m}^3$ | | | | | | | |
| Mechanical Properties | | Tensile Behaviour | | | | | | | |
| | | Property | -80°C | -60°C | -40°C | -20°C | 23°C | 60°C | 80°C |
| | | E (MPa) | 3859 | 2924 | 1765 | 1164 | 874 | 436 | 248 |
| | | σ_y (MPa) | 38,9 | 29,5 | 28,4 | 23,0 | 16,1 | 8,1 | 6,2 |
| | | ϵ_u (%) | 7,2 | 11,1 | 13,2 | 15,1 | 32,1 | 43,1 | 47,4 |
| | | Compressive Behaviour | | | | | | | |
| Property | -80°C | -60°C | -40°C | -20°C | 23°C | 60°C | 80°C | | |
| E (MPa) | 3878 | 2813 | 1347 | 1166 | 765 | 501 | 336 | | |
| σ_y (MPa) | 52,1 | 33,5 | 30,9 | 21,4 | 18,0 | 10,2 | 7,9 | | |
| | | Shear Modulus (Torsion Pendulum Test) | | | | | | | |
| Property | -80°C | -60°C | -40°C | -20°C | 23°C | 60°C | 80°C | | |
| G (MPa) | 1386 | 955 | 559 | 429 | 285 | 180 | 135 | | |
| | | Poisson Ratio | | | | | | | |
| | | N = 0,36 | | | | | | | |

Sumber : Brooking & Kennedy, 2004



Gambar 2.11 Grafik Hubungan *Strees – Strain* Material Elastomer (Sumber: Brooking dan Kennedy, 2004)



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2.12 Pengujian terhadap (a) Ledakan, (b) Ketahanan Api, (c) Impak pada Baja dan (d) Impak pada SPS (Brooking & Kennedy, 2004)

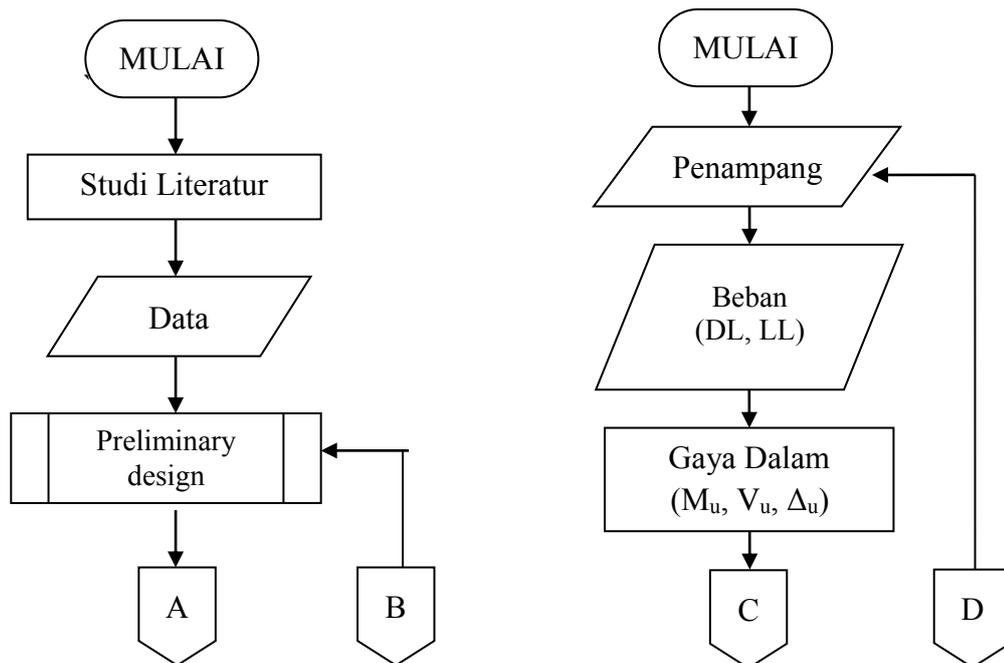
Pada Gambar 2.12 (a) merupakan pengujian terhadap ledakan antara baja dan SPS. Terlihat bahwa penampang baja tanpa *Polyurethane* mengalami kerusakan yang parah dan pada penampang SPS dengan *polyurethane* elastomer hanya mengalami sedikit kerusakan –warna putih pada gambar. Pengujian ketahanan terhadap bahaya kebakaran –Gambar 2.12 (b), dari hasil pengujian tersebut perilaku *polyurethane* elastomer dan pelat logam pada pemberian temperatur tinggi berfungsi dengan baik. IMO (*International Maritime Organization*) menilai pada struktur SPS dengan ukuran (SPS 4-25-4) mampu bertahan pada kebakaran selama 60 menit. Begitu juga pengujian impak pada baja mengalami kerusakan yang signifikan –Gambar 2.12.(c)- bila dibandingkan dengan SPS -Gambar 2.12 (d).

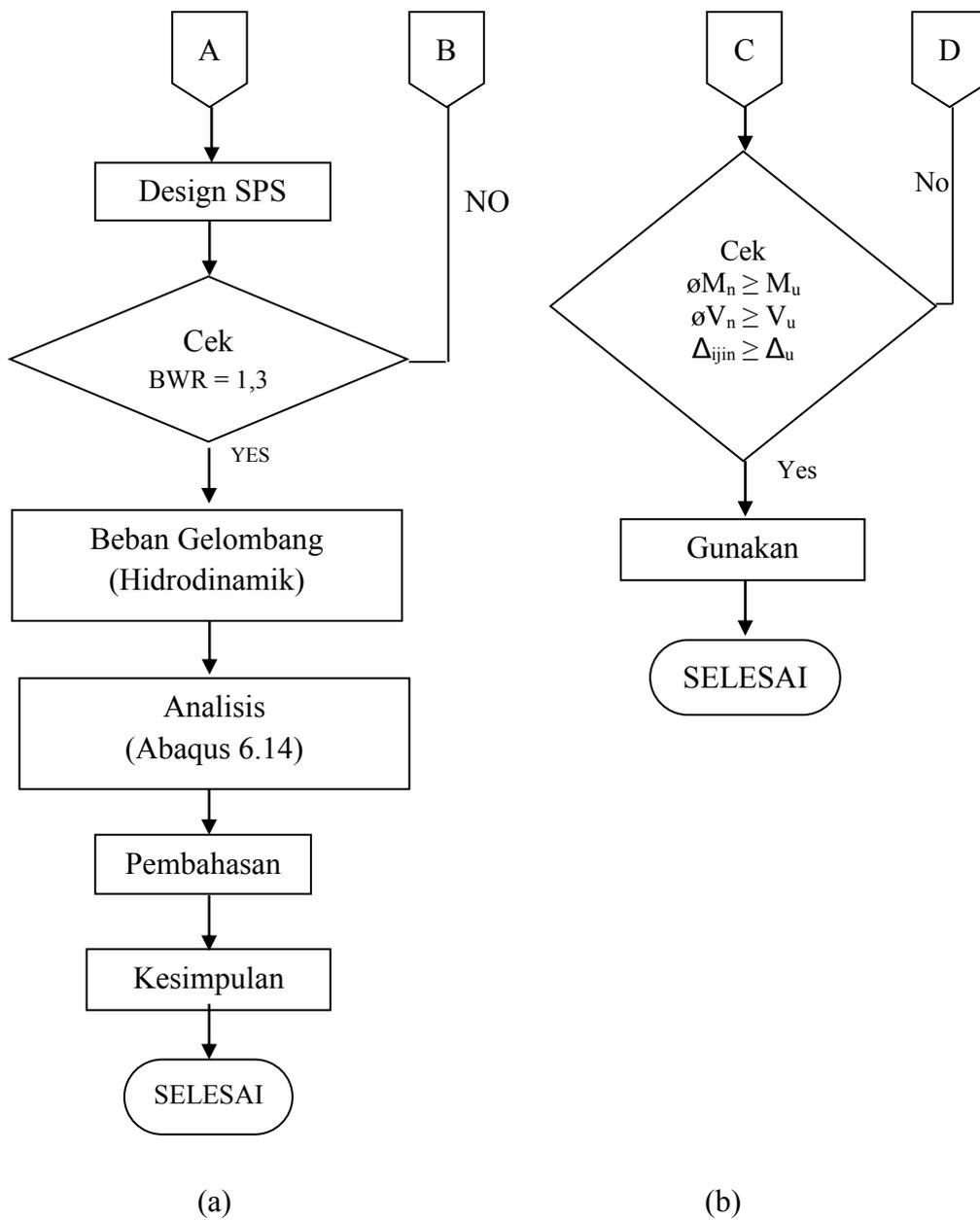
BAB 3 METODA PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Bab ini menjelaskan dan menguraikan tahapan pengerjaan penelitian ini. Dimulai dengan studi literatur yang berhubungan dengan SFT khususnya material dan bentuk penampang SFT, konfigurasi kabel dan Sudut Inklinasi Kabel (SIK), *Buoyancy Weight Ratio* (BWR) dan tipe perletakan ujung. Analisa secara numerik dilakukan dengan program bantu *Abaqus 6.14* dengan data yang telah ada atau dari penelitian sebelumnya.

Berdasarkan penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa penampang baja dengan bentuk lingkaran dan oval cukup efektif untuk meredam lendutan (Indrawan, 2013) sehingga pada penelitian ini menggunakan penampang baja berbentuk lingkaran dan oval dengan *Sandwich Plate System* dengan *polyurethane elastomer* (Brooking dan Kennedy, 2014). Beberapa parameter-parameter lain yang digunakan adalah Konfigurasi berbentuk segitiga (Sipata, dkk, 2013) dengan SIK 54° (Komara dan Wahyuni, 2013), BWR 1,3 (Santoso dan Wahyuni, 2014) dan perletakan ujung Sendi-Sendi (Wahyudi dan Wahyuni, 2014).





Gambar 3.1 Flow Chart: (a) Penelitian SPS pada Penampang SFT dan (b) Preliminary Design

3.2. Studi Literatur

Pada penelitian ini diawali dengan studi literatur yang berhubungan dengan SPS dan SFT khususnya material dan bentuk penampang tunnel, Konfigurasi kabel dan Sudut Inklinasi Kabel (SIK), *Buoyancy Weight Ratio* (BWR) dan tipe perletakan ujung. Analisa secara numerik dilakukan dengan

program bantu *Abaqus 6.14* dengan data yang telah ada atau dari penelitian sebelumnya.

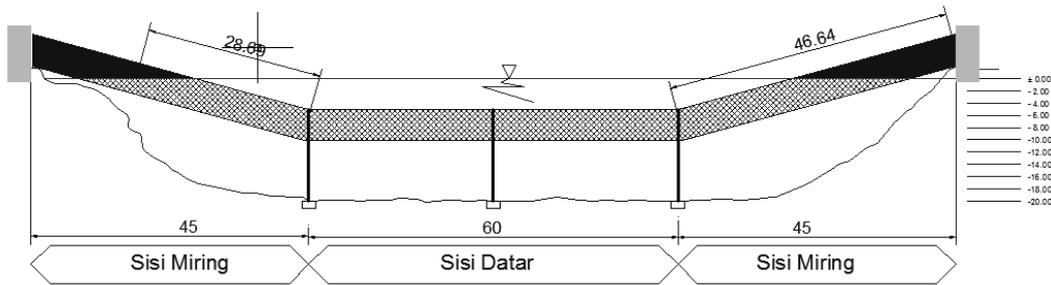
Pada penelitian ini juga menggunakan beberapa peraturan sebagai rujukan dalam perencanaan SFT. Beberapa peraturan yang digunakan pada penelitian ini antara lain adalah:

1. SNI 03-1729-2002 tentang Perencanaan Bangunan Gedung Baja
2. RSNI T-02-2005 tentang Pembebanan Untuk Jembatan
3. BMS 1992 tentang Perencanaan Jembatan
4. PPURG 1997 tentang Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung

3.3. Data

Sebagaimana penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa penampang baja dengan bentuk lingkaran dan oval cukup efektif untuk meredam lendutan (Indrawan, 2011) sehingga pada penelitian ini menggunakan penampang baja berbentuk lingkaran dan oval dengan *Sandwich Plate System* dengan *polyurethane* sebagai elastomer/intinya (Brooking dan Kennedy, 2004). Beberapa parameter-parameter lain yang digunakan adalah Konfigurasi berbentuk segitiga (Sipata, dkk, 2012) dengan SIK 54° (Komara dan Wahyuni, 2014), BWR ideal adalah 1,3 (Santoso dan Wahyuni, 2014) dan perletakan ujung Sendi-Sendi (Wahyudi dan Wahyuni, 2014).

Panjang dari perairan yang dilalui SFT adalah 150 m dengan SFT berbentuk seperti trapesium yang terdiri dari 3 (tiga) segmen, dimana segmen pertama dan ketiga memiliki kemiringan –sisi miring, yang berfungsi penghubung daratan dengan lautan dengan panjang masing-masing 45 m. Segmen kedua merupakan segemen datar yang terendam air sepanjang 60 m –sisi datar. Segemen kedua inilah yang paling banyak mendapatkan gaya apung Archimedes, elevasi segmen kedua ini $-7,5$ m dan dasar laut berada pada -20 m dari permukaan laut. Total panjang SFT ini adalah tinggi/diameter bagian dalam penampang SFT pada semua segemen direncanakan 5 m dan lebar 8 m. Panjang dari SFT ini secara keseluruhan adalah 153,28 m dan bagian yang terendam air sepanjang 117,38 m. sebagaimana terlihat pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3.



Gambar 3.2 Geometri SFT

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis dengan dua konfigurasi penampang dengan bentuk lingkaran dan oval (Gambar 3.5) yang terdiri dari material SPS dengan *polyurethane* sebagai inti/*corenya*. Dengan konfigurasi tersebut diharapkan dapat memperlihatkan perbedaan dari setiap penampang sehingga dapat menjadi referensi dalam pembangunan SFT.

Tabel 3.1 Spesifikasi Material Penelitian

| Material | ρ (kg/m^3) | E (MPa) | Rasio Posion | f_y (MPa) | f_u (MPa) |
|----------------------|-------------------------------|------------|-----------------|----------------|----------------|
| Baja | 7850 | 200000 | 0,30 | 410 | 550 |
| Polyurethane (23° C) | 1150 | 800 | 0,36 | 16 | 28 |
| Strand (Kabel) | 7750 | 195000 | 0,30 | 1675 | 1860 |

Spesifikasi karakteristik material dari *polyurethane* pada SPS berdasarkan pengujian Brooking dan Kennedy (2004). Sebagaimana terlihat pada tabel dan Gambar penelitian oleh Brooking dan Kenedy pada Tabel 2.2, yang digunakan pada penelitian ini adalah yang menggunakan suhu 23° C.

Untuk data perairan menggunakan data perairan Pulau Karya dan Pulau Panggang, yang bersumber dari penelitian sebelumnya oleh Sipata dkk (2014), dimana tinggi gelombang 1,2 m dengan periode gelombang 3,58 detik. Dari data ini akan diplot kedalam grafik hubungan d/gT^2 dan H/gT^2 yang akan diketahui tipe gelombang apa yang cocok diterapkan pada penelitian ini.

3.4. Preliminary Design

Proses ini untuk mendapatkan dimensi pelat beton/slab, balok melintang dan memanjang yang akan dilalui kendaraan nantinya seta ketebalan dari SPS. Dengan menggunakan metode coba-coba, penampang akan diinput terlebih dahulu kemudian dianalisis terhadap gaya luar yang terjadi. Gaya atau beban yang terjadi pada proses ini terdiri dari beban mati dan beban hidup.

Dimana beban mati adalah beban dari struktur itu sendiri dan beban hidup terdiri dari arus lalu lintas yang sesuai dengan RSNI T-02-2005 tentang Pembebanan Untuk Jembatan dan BMS 1992 tentang Perencanaan Jembatan. Akibat beban yang terjadi akan didapatkan gaya-gaya dalam berupa momen, gaya geser dan lendutan. Gaya dalam ini akan dikontrol dengan kekuatan nominal dari penampang. Syarat dari kontrol ini adalah gaya dalam yang terjadi harus kurang dari gaya nominal yang dimiliki penampang seperti terlihat pada alur penelitian Gambar 3.1 (b).

3.4.1. Design SPS

Sebelum melakukan analisis, harus ditentukan dulu ketebalan minimum dari panel terluar, inti dan panel terdalam dari SPS. Adapun untuk menghitung ketebalan panel baja terluar dan terdalam menggunakan rumus sebagai berikut:

$$t_{1,2_min} = 0,5 \left(t_0 + \frac{k.L}{f_1^{0,5}} \right) \quad (3.1)$$

dimana $t_{1,2_min}$ adalah ketebalan minimum panel terluar (t_1) dan panel dalam (t_2), t_0 dan k adalah parameter ketebalan minimum berdasarkan tabel 3.3, f_1 adalah faktor material (tabel 3.4) dan L panjang panel (m).

Tabel 3.2 Parameter Ketebalan Minimum

| Items | t_0 | k |
|-------------------------------------|-------|------|
| <i>Bottom / Inner bottom / Side</i> | 5,0 | 0,04 |
| <i>Weather deck *</i> | 5,5 | 0,02 |
| <i>Bulkhead</i> | 5,0 | 0,03 |

Tabel 3.3 Nilai Faktor Material Baja

| Jenis Material Baja | Keterangan | Faktor material f_l |
|---------------------|---------------------------------|-----------------------|
| NV-NS | f_y tidak kurang dari 235 MPa | 1,00 |
| NV-27 | f_y tidak kurang dari 265 MPa | 1,08 |
| NV-32 | f_y tidak kurang dari 315 MPa | 1,28 |
| NV-36 | f_y tidak kurang dari 355 MPa | 1,39 |
| NV-40 * | f_y tidak kurang dari 390 MPa | 1,47 |

Tanda * pada kedua tabel di atas adalah yang digunakan pada penelitian ini karena penampang langsung berhubungan dengan cuaca dan material baja yang digunakan BJ 55 (f_y 410 MPa –lebih dari 390 MPa). Sedangkan untuk ketebalan inti/core menggunakan metode coba-coba dengan syarat angka indeks kekakuan SPS ($R \leq 1$). Untuk mencari R dan paremeternya menggunakan rumus sebagai berikut:

$$R = 0,01 \cdot A_R \cdot \left[0,1 \frac{b^2}{d(t_1 + t_2)} + 11,7 \left(\frac{b \cdot t_c}{d^2} \right)^{1,3} \right] \cdot k \cdot P_{eq,R} \leq 1 \quad (3.2)$$

$$A_R = \left(\frac{a}{b} \right)^{0,65} \quad (3.3)$$

$$d = \left(\frac{t_1 + t_2}{2} \right) + t_c \quad (3.4)$$

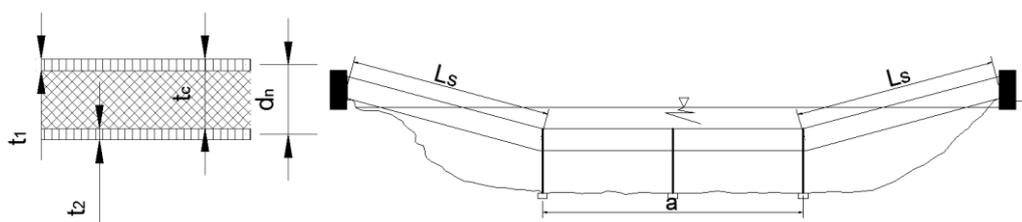
$$P_{eq,R} = 0,0017 \cdot \frac{Z}{L^2} \quad (3.5)$$

dimana:

- R = indeks kekakuan SPS
- a = panjang bagian terpanjang dari SFT (m)
- b = lebar/keliling SFT (m)
- d_n = jarak/ketebalan dari as t_1 ke as t_2 (mm)
- L = panjang panel/SFT = $2L_1 + a$ (m)
- L_1 = panjang SFT sisi miring (m)
- t_1 = tebal pelat luar (mm)
- t_2 = tebal pelat dalam (mm)
- t_c = tebal inti (mm)
- k = parameter ketebalan minimum
- $P_{eq,R}$ = tekanan eqivalen (MPa)
- Z = modulus penampang (cm^3)

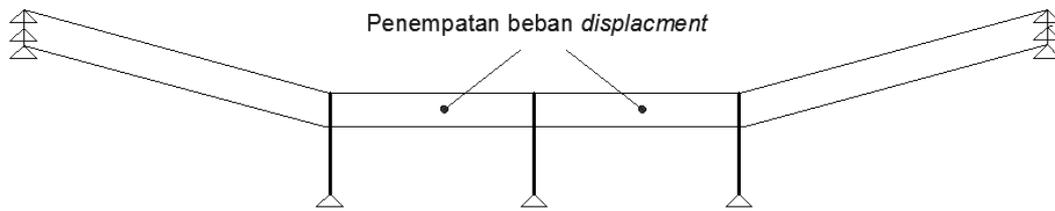
Berdasarkan perhitungan didapatkan bahwa ketebalan minimum untuk t_1 dan t_2 adalah 3,75 mm; dan untuk t_c sebesar 15 mm. Untuk memudahkan pelaksanaan dan demi keamanan untuk t_1 dan t_2 digunakan 4 mm dan t_c sebesar 20 mm. Konfigurasi penampang SPS yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari 2 model penampang yang berbeda dengan bentuk lingkaran dan oval. Dengan masing-masing penampang terdiri dari 2 model pembebanan, sehingga permodelan pada penelitian ini berjumlah 4 buah. Pada prinsipnya model tiap penampang (lingkaran dan beton) memiliki konfigurasi yang sama, hanya yang membedakan adalah pembebanannya (A1 dan A2 serta B1 dan B2). Peningkatan *displacement* pada model B, bertujuan melihat kondisi model A (kondisi normal - perencanaan) hingga mengalami perlelehan pada penampangnya (kondisi ekstrim).

Selanjutnya dari kedua model penampang dengan kondisi normal (A1 dan A2) akan dibandingkan dengan output dari penelitian Indrawan (2015) yang berbentuk lingkaran dan oval dengan penampang baja (C1 dan C2). Untuk perbandingan pada penelitian ini akan lebih difokuskan kepada bentuk lingkaran karena menurut penelitian Indrawan (2015), penampang berbentuk lingkaran dengan material baja lebih baik dari penampang berbentuk oval dengan material baja.



Gambar 3.3 Parameter perhitungan SPS

Proses selanjutnya adalah mengecek apakah masing-masing permodelan memenuhi persyaratan BWR antara 1,3, bila BWR kurang dari persyaratan tersebut, dapat ditambahkan beban *ballast* hingga memenuhi BWR tersebut. Langkah berikutnya adalah dilakukan analisis dengan *Abaqus* pada masing masing model dengan memodelkan penampang sebagai solid.

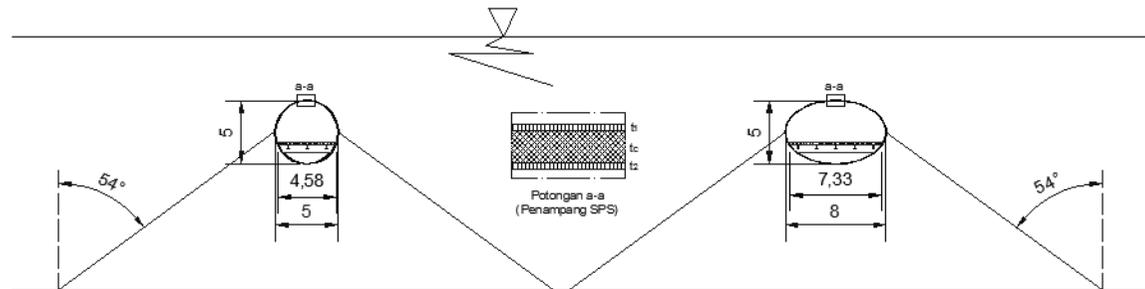


Gambar 3.4 Asumsi Permodelan

Pada Gambar 3.4 memperlihatkan asumsi yang digunakan pada permodelan ini sebagaimana pada penelitian sebelumnya bahwa perletakan ujung sebagai sendi-sendi, begitu pula asumsi perletakan pada ujung kabel sebagai sendi. Selain itu asumsi lain yang digunakan adalah *displacement* yang menjadi titik kontrol adalah *displacement* yang terletak pada sisi datar –lihat gambar.

Tabel 3.4 Konfigurasi Permodelan SPS

| No | Kode | Bentuk Penampang | Dimensi Penampang | | Tebal Penampang | | | Perletakan Ujung | Sudut Inklinasi Kabel | Bouyancy Weight Ratio | Data Gelombang | | Beban |
|----|------|------------------|-------------------|---------|-----------------|---------|---------|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|-------|-------------|
| | | | HD (mm) | VD (mm) | t1 (mm) | tc (mm) | t2 (mm) | | SIK | BWR | Ts (detik) | H (m) | |
| 1 | A1 | Lingkaran | 5000 | 5000 | 4 | 20 | 4 | Sendi-Sendi | 54° | 1,3 | 3,58 | 1,2 | D+L+H+W |
| 2 | A2 | Oval | 8000 | 5000 | 4 | 20 | 4 | Sendi-Sendi | 54° | 1,3 | 3,58 | 1,2 | D+L+H+W |
| 3 | B1 | Lingkaran | 5000 | 5000 | 4 | 20 | 4 | Sendi-Sendi | 54° | 1,3 | 3,58 | 1,2 | Displacment |
| 4 | B2 | Oval | 8000 | 5000 | 4 | 20 | 4 | Sendi-Sendi | 54° | 1,3 | 3,58 | 1,2 | Displacment |



Gambar 3.5 Bentuk Panampang Lingkaran (A1 dan B1) dan Oval (A2 dan B2)

Tabel 3.5 Hasil penelitian Reka Indrawan Penampang Baja

| No | Kode | Bentuk Penampang | Dimensi Penampang | | Rasio Lebar terhadap Tinggi | Material Penampang | Tebal Penampang | Perletakan Ujung | Sudut Inklinasi Kabel | Bouyancy Weight Ratio | Data Gelombang | | Beban | Gaya Dalam | | | |
|----|------|------------------|-------------------|---------|-----------------------------|--------------------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|------------|---------|------------|-----------|-----------|-----------|
| | | | HD (mm) | VD (mm) | | | | | SIK | | BWR | Ts (detik) | | H (m) | S11 (MPa) | S22 (MPa) | S12 (MPa) |
| 1 | C1 | Lingkaran | 5000 | 5000 | 1 | Baja | 27 | Sendi-Sendi | 54° | 1,3 | 3,58 | 1,2 | D+L+H+W | 247,1 | 249,24 | 70,88 | 22,4 |
| 2 | C2 | Oval | 9000 | 5000 | 1,8 | Baja | 27 | Sendi-Sendi | 54° | 1,3 | 3,58 | 1,2 | D+L+H+W | 79,65 | 219,15 | 56,72 | 28 |

3.4.2. Pembebanan

Dalam struktur SFT ini terdapat beberapa beban. Beban-beban yang bekerja pada struktur SFT antara lain beban permanen merupakan beban yang selalu bekerja pada struktur selama struktur tersebut ada. Beban permanen yang bekerja pada SFT adalah:

1. Beban Mati Struktur

Beban mati struktur merupakan beban yang diakibatkan oleh gaya gravitasi dari berat struktur itu sendiri. Untuk penampang tunnel, berat sendiri tergantung dari tebal, luas, panjang dan berat jenis dari material tunnel itu sendiri. Berat sendiri (W) dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$D = 1,3A_c\gamma_s + B \quad (3.6)$$

dengan A_c adalah luas penampang bahan yang digunakan dan γ_s adalah berat jenis dari material. Berat sendiri dan berat tambahan dan utilitas diasumsikan 30% dari beban mati. Beban mati tambahan berupa Ballast (B) diberikan apabila rasio gaya apung kurang dari 1,3.

Selain berat penampang itu sendiri terdapat juga fasilitas-fasilitas yang terdapat pada SFT seperti pelat lantai kendaraan dari beton dan aspal, gelagar melintang dan gelagar memanjang yang berfungsi sebagai pemikul pelat lantai. Pelat lantai kendaraan mengacu pada peraturan jembatan BMS 1992 dengan tebal minimal 20 cm dan aspal minimal 5 cm serta balok gelagar dari baja.

2. Beban Hidup

Beban hidup pada struktur SFT ini tidak memperhitungkan beban truck "T" karena dimensi terowongan SFT yang mempunyai dimensi ketinggian 5 m (belum termasuk tinggi bebas). Persyaratan untuk dapat dilalui truk minimal mempunyai ruang bebas adalah 4,5 m, sehingga beban truk diabaikan untuk perhitungan pada balok melintang maupun

memanjang. Untuk beban hidup (L) ini terdiri dari beban KEL sebesar 44 kN/m dan beban UDL sebesar 8 kPa.

3. Gaya Apung (*Buoyancy*)

Gaya apung terjadi akibat perbedaan kerapatan massa antara air laut dan udara/penampang SFT. Gaya apung dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$U = A_T \gamma_w \quad (3.10)$$

dimana:

U = Gaya Apung (kN/m)

A_T = Luas total penampang SFT

γ_w = Berat jenis air laut (10,30 kN/m³)

4. Rasio Gaya Apung (*Buoyancy Weight Ratio*)

Rasio Gaya Apung (*Buoyancy Weight Ratio* atau BWR) terhadap beban mati disarankan bernilai 1,2 – 1,3, namun bisa kurang dan lebih dari nilai tersebut. Formulasi rasio gaya apung adalah:

$$BWR = \frac{U}{W} \quad (3.11)$$

dimana BWR adalah Rasio Gaya Apung terhadap beban SFT, U adalah Gaya Apung dan W adalah beban struktur dalam hal ini, beban mati (D) ditambah beban hidup (L) dan Ballast (B), sebaiknya $1,2 \leq BWR \leq 1,3$.

Pada penelitian ini menggunakan BWR 1,3, bilamana BWR tidak mencapai nilai tersebut maka ditambahkan beban ballast hingga didapatkan BWR yang diinginkan.

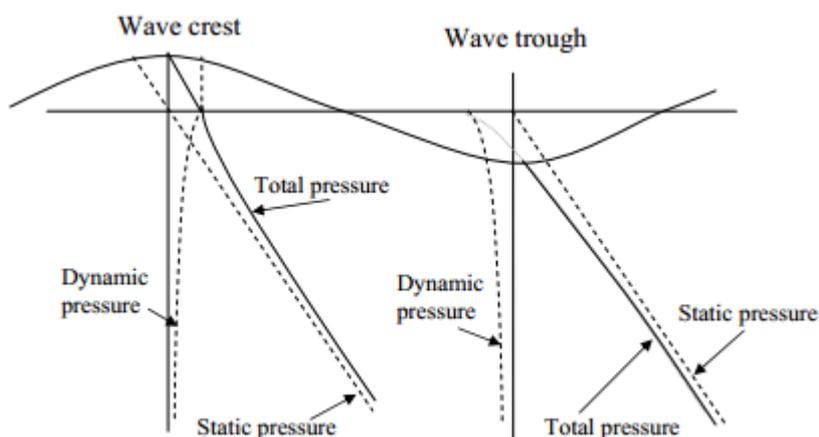
3.5. Beban Hidrodinamik

Beban ini disebabkan oleh lingkungan lokal dimana SFT dibangun. Beban ini didapatkan dari permodelan secara matematis. Beban hidrodinamik merupakan beban akibat aksi gelombang dan akibat arus laut yang bergerak secara dinamis tergantung kedalaman yang ditinjau ditambah beban statis sebagaimana terlihat pada Gambar 3.6 berikut ini.

Beban hidrodinamik yang diberikan pada penelitian ini adalah yang sesuai dengan teori Stokes Orde 5 sebagaimana diformulasikan pada persamaan berikut:

$$P_w = -\rho g z - \rho \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \right\} \quad (3.12)$$

Dimana P_w adalah beban akibat gelombang laut (kN/m); ρ = masa jenis air laut = 10,30 kN/m³; g = percepatan gravitasi = 9,81 m/s²; z = kedalaman laut yang ditinjau; u dan v merupakan kecepatan partikel air laut arah horisontal dan vertikal (m/s), t = waktu tinjauan gelombang (s).



Gambar 3.6 Tekanan Gelombang (Sumber: USFOS, 2010)

Tekanan gelombang pada persamaan di atas secara otomatis dapat dilakukan oleh *Abaqus* dengan melakukan modifikasi *subroutine* dengan kode **Aqua (Abaqus Aqua)*. Tekanan gelombang, panjang gelombang dan gaya gelombang dengan rumusan oleh Morisson secara otomatis dapat diberikan pada *subroutine Abaqus Aqua* ini.

3.5.1. Gelombang Stokes Orde 5

Sebagaimana telah diberikan pengantar pada Bab 2 bahwasanya gelombang nonlinier yang banyak digunakan untuk menentukan beban gelombang adalah Teori Gelombang Stokes Orde 5. Selaras dengan penelitian ini yang menggunakan *Abaqus* sebagai perangkat lunak pendukung dalam

melakukan analisis numerik, dimana *Abaqus* dapat melakukan analisis gelombang berdasarkan teori gelombang Stokes Orde 5.

Pada teori gelombang Stokes Orde 5 ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan potensial (ϕ). Dari parameter ϕ ini dapat ditentukan kecepatan dan percepatan gelombang. Untuk menentukan kecepatan potensial (ϕ) dan profil bentuk gelombang (η) pada teori ini, sangat dipengaruhi panjang gelombang L dan angka gelombang k , dimana k ini sendiri variabel yang dipengaruhi oleh panjang gelombang (lihat Bab 2.4) sehingga digunakan metode coba-coba untuk mencari nilai tersebut.

Skjelbia dan Hendrikson (1960) telah melakukan pengembangan dari teori stokes hingga orde 5. Dimana pada pengembangan ini diberikan beberapa parameter λ , A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} dan E_{ij} untuk menentukan ϕ . Namun parameter ini sangat dipengaruhi oleh d/L dan kd . Karena ketidakpastian d/L dan kd maka dilakukan dengan cara coba-coba atau optimasi dengan menggunakan komputer. Berikut ini formulasi yang digunakan pada gelombang Stoke orde 5.

$$\phi = \sum_{n=1}^5 \phi_n \cosh\{k(d+z)\} \cos(\omega t - kx) \quad (3.13)$$

Dimana

$$\phi_1 = \lambda A_{11} + \lambda^3 A_{13} + \lambda^5 A_{15}$$

$$\phi_2 = \lambda^2 A_{22} + \lambda^4 A_{24}$$

$$\phi_3 = \lambda^3 A_{33} + \lambda^5 A_{35}$$

$$\phi_4 = \lambda^4 A_{44}$$

$$\phi_5 = \lambda^5 A_{55}$$

Angka gelombang dapat diformulasikan sebagai berikut

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (3.14)$$

Untuk mencari panjang gelombang L dan koefisien λ dapat ditentukan dengan persamaan di bawah ini. Dengan menggunakan parameter d/L sebagai acuannya.

$$\frac{\pi H}{d} = \left(\frac{1}{d/L} \right) \tanh kd (1 + \lambda^2 C_1 + \lambda^4 C_2) \quad (3.15)$$

$$\frac{d}{L_0} = \left(\frac{d}{L} \right) \tanh kd \{ \lambda + \lambda^3 B_{33} + \lambda^5 (B_{35} + B_{55}) \} \quad (3.16)$$

$$\text{Dimana } L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.17)$$

Kecepatan arah horisontal

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \sum_{n=1}^5 n \frac{\omega}{k} \phi_n \cosh\{k(d+z)\} \sin(\omega t - kx) \quad (3.18)$$

Kecepatan arah vertikal

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \sum_{n=1}^5 \frac{\omega}{k} \phi_n \sinh\{k(d+z)\} \cos(\omega t - kx) \quad (3.19)$$

Percepatan arah horisontal

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = \sum_{n=1}^5 n \frac{\omega^2}{k} \phi_n \cosh\{k(d+z)\} \cos(\omega t - kx) \quad (3.20)$$

Percepatan arah vertikal

$$a_y = \frac{\partial w}{\partial t} = - \sum_{n=1}^5 \frac{\omega^2}{k} \phi_n \sinh\{k(d+z)\} \sin(\omega t - kx) \quad (3.21)$$

Profil muka air

$$\eta = \sum_{n=1}^5 E_n \frac{\sin\{n(\omega t - kx)\}}{k} \quad (3.22)$$

Untuk menentukan parameter A_{ij} , B_{ij} , C_i dan E_i dapat dilihat pada lampiran.

3.5.2. Beban Aksi Gelombang

Gaya gelombang per kedalaman dapat dihitung dengan persamaan Moorison sebagai berikut:

$$F = F_D + F_I \quad (3.23)$$

$$F = \frac{\rho}{2g} D_e \cdot C_d \cdot u \cdot |u| + \frac{\rho}{2g} A_e \cdot C_w \cdot a \quad (3.24)$$

dimana:

F = Gaya gelombang (kN/m)

- w = Berat jenis air laut (10,3 kN/m³)
- A_e = Luas penampang termasuk marine growth (m²)
- C_d = Koefisien drag
- C_w = Koefisien massa
- D_e = Diameter efektif SFT (termasuk marine growth) (m)
- g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- u = kecepatan aliran gelombang pada kedalaman SFT (m/s)
- |u| = nilai absolut dari $\sqrt{u^2 + v^2}$
- a = percepatan gelombang per kedalaman (m/s²)
- F_D = Gaya Drag (kN/m)
- F_I = Gaya Inersia (kN/m)

Tabel 3.6. Koefisien Drag dan Inersia (Sumber: API RP 2A-WSD 2000)

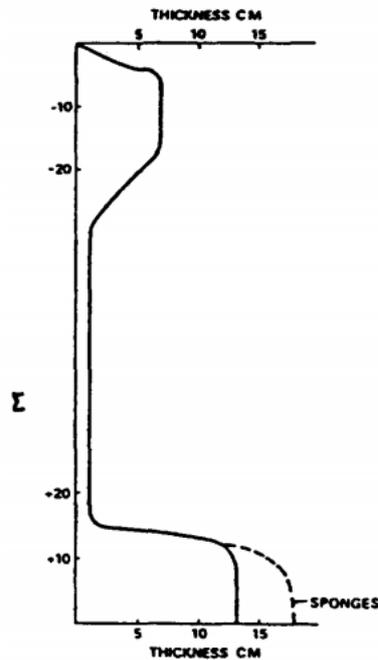
| Parameter | Cd | Cm |
|----------------|------|-----|
| Smooth member | 0,65 | 1,6 |
| Rough member * | 1,05 | 1,2 |

Pada perhitungan gelombang juga perlu memperhitungkan efek *marine growth* karena SFT terbenam dalam air. Struktur yang menempel pada laut lama kelamaan akan ditempel oleh organisme laut, efek ini disebut *marine growth*. Akibat dari *marine growth* ini, penampang dari SFT akan bertambah besar sehingga beban aksi gelombang pada persamaan Morison diatas menggunakan diameter efektif dan Luas penampang efektif.

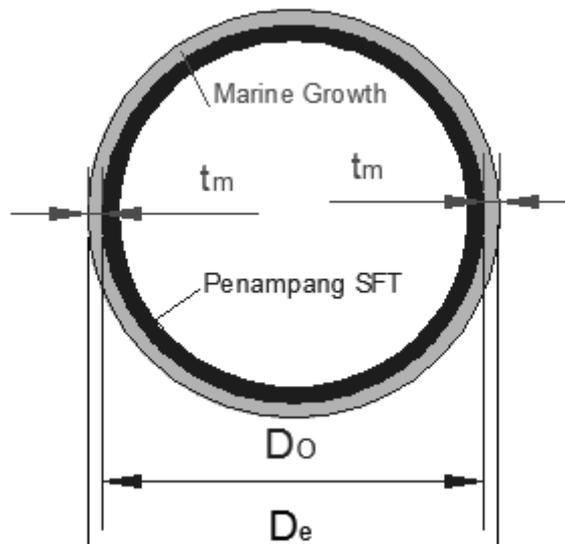
$$D_e = D_o + 2t_m \quad (3.25)$$

Dimana Diameter efektif (D_e) merupakan diameter luar dari SFT (D_o) ditambah dua kali -kanan dan kiri- ketebalan *marine growth* (t_m)

Perkiraan ketebalan *marine growth* (t_m) dapat ditentukan dengan menggunakan profil *marine growth* yang diperlihatkan pada Gambar 3.7 dibawah. Berdasarkan Gambar 3.7, maka ketebalan *marine growth* adalah 5 cm karena kedalaman SFT terletak pada -20 m. Gambar 3.8 memperlihatkan hubungan antara diameter efektif, diameter SPS dan *marine growth*.

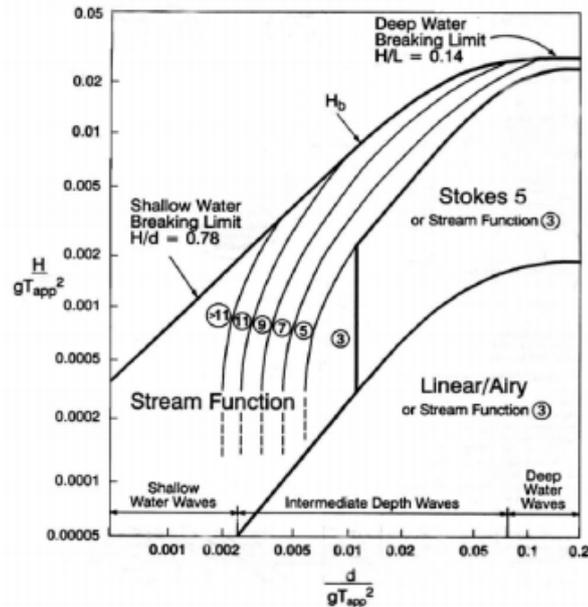


Gambar 3.7 *Marine Growth Profil* (Ahrens, 1997; Sumber: Indrawan, 2011)



Gambar 3.8 Detail Penampang Efektif

Tipe gelombang akan dipilih berdasarkan Gambar 3.9. berikut ini. Dengan menggunakan menarik garis horisontal dan vertikal akan didapatkan jenis gelombang apa yang tepat diterapkan pada penelitian ini.



Gambar 3.9 Grafik Penentuan Model Gelombang (API-RP2A, 2000; Sumber USOFOS, 2010)

3.6. Analisis

Analisis dilakukan secara numerik dengan *software* berbasis Metode Elemen Hingga (MEH). Ada banyak *software* yang berbasis MEH ini yang umum digunakan di kalangan praktisi keteknik sipil seperti *SAP 2000*, *SAFE*, *ETABS*, *Ansys*, *Abaqus* dan masih banyak lainnya. Pada penelitian ini menggunakan *software Abaqus* versi 6.14. Kelebihan *Abaqus* ini adalah sangat baik dalam menganalisis tegangan karena proses *meshing*nya sangat baik bila dibandingkan *SAP 2000* atau *ETABS*, serta mampu memperlihatkan arah tegangannya (Dewobroto, 2013). Selain itu *Abaqus* versi 6.14 merupakan *Abaqus* versi terbaru hingga saat ini (Januari 2016) dan telah menggunakan referensi terbaru untuk proses analisisnya, salah satunya beban hidrodinamik yang sesuai dengan penelitian ini. Kekurangan *Abaqus* adalah tidak terdapatnya input satuan sehingga perlu menyamakan semua satuan sebelum input parameter.

BAB 4

PRELIMINARY DESIGN

Pada bab ini dihitung berapa ketebalan pelat lantai kendaraan, penampang balok memanjang dan melintang yang aman untuk memikul kendaraan, ketebalan SPS dan BWR. Kendaraan rencana yang dapat melewati SFT ini dibatasi hanya pada mobil penumpang dengan berat total 8 ton. Pemilihan ini karena diameter rencana SFT ini hanya 5 m, sehingga hanya kendaraan penumpang saja yang dapat memasuki terowongan SFT.

4.1. Pelat Lantai Kendaraan

Perencanaan pelat lantai kendaraan untuk SFT disesuaikan dengan bentuk geometri dari penampang SFT.

Direncanakan :

$b_1 = 1.2$ meter (jarak antar balok memanjang)

Berdasarkan BMS pasal 6.1.12 :

$$d_3 \geq 200 \text{ mm}$$

$$d_3 \geq 100 + 40 b_1$$

$$d_3 \geq 100 + 40 \times 1.2$$

$$d_3 \geq 148 \text{ mm}$$

Jadi dipakai $d_3 = 300 \text{ mm} = 0,3 \text{ m}$

$d_4 \geq 5 - 8 \text{ cm}$ (tebal lapisan aspal)

Diambil $d_4 = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$

$$l_x = b_1 = 1,2 \text{ m}$$

$$l_y = \lambda = 5 \text{ m}$$

$$\frac{l_y}{l_x} = \frac{5}{1,2} = 4,17 > 2 \text{ (Pelat 1 arah)}$$

Faktor Beban :

- Beton cor di tempat , $K_{MS}^U = 1,3$
- Beban truk T , $K_{TT}^U = 2,0$ (Asumsi perhitungan terdapat beban truk)

Pembebanan :

a. Beban Mati :

- Berat sendiri plat = $d3 \times \gamma_{\text{beton}} \times 1 \text{ m}$
= $0,3 \text{ m} \times 24 \text{ KN/m}^3 \times 1 \text{ m} = 7,2 \text{ KN/m}$
 - Berat aspal = $d4 \times \gamma_{\text{aspal}} \times 1 \text{ m}$
= $0,05 \text{ m} \times 22 \text{ KN/m}^3 \times 1 \text{ m} = \underline{1,1 \text{ KN/m}}$
- $q_M = 8,3 \text{ KN/m}$**

b. Beban Hidup :

Beban roda truk = 100 KN , maka DLA = 0,3

$$T = (1 + 0,3) \times 100 = 130 \text{ KN}$$

c. Beban Ultimate :

- $q_{M(U)} = K_{MS}^U \times q_M$
= $1,3 \times 8,3 \text{ KN/m} = 10,79 \text{ KN/m}$
- $T_{(U)} = K_{TT}^U \times T$
= $2,0 \times 130 \text{ KN} = 260 \text{ KN}$

Momen – Momen Arah Melintang (Mx) :

a. Beban Mati :

$$\begin{aligned} M_u &= \frac{1}{10} \times q_{M(U)} \times b l^2 \\ &= \frac{1}{10} \times 10,79 \text{ KN/m} \times (1,2 \text{ m})^2 = 1,554 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

b. Beban Hidup :

$$\begin{aligned} M_u &= 0,8 \times \frac{S + 0,6}{10} \times T_{(U)}, \text{ dimana } S = b l \\ &= 0,8 \times \frac{1,2 + 0,6}{10} \times 260 \text{ KN} = 37,44 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

c. Beban Total :

$$M_u = 1,554 \text{ KNm} + 37,44 \text{ KNm} = 38,994 \text{ KN.m}$$

Perhitungan Tulangan :

Digunakan beton :

$$f_y = 320 \text{ MPa}$$

$$f_c' = 30 \text{ Mpa}$$

$$\beta = 0,85$$

- Tulangan Arah x (Arah Melintang) :

$$M_u = A_s \times f_y \times 0,9 \times d_y$$

$$A_{su} = \frac{M_u}{f_y \times 0,9 \times d_y}$$

$$= \frac{38.994.000}{320 \times 0,9 \times 225} = 601,76 \text{ mm}^2$$

Dicoba tulangan D 16, $A_{st} = 201,06 \text{ mm}^2$

$$A_{sv} = \frac{A_{st} \times 1000}{A_{su}} = 334,12 \text{ mm}$$

Dipakai tulangan arah melintang D 16 – 300 mm , $A_s = 670,2 \text{ mm}^2$

- Tulangan Arah y (Arah Memanjang) :

$A_y =$ Tulangan susut

$$\rho_{\min} = 0,0018 \times \frac{400}{f_y}$$

$$= 0,0018 \times \frac{400}{320} = 0,00225$$

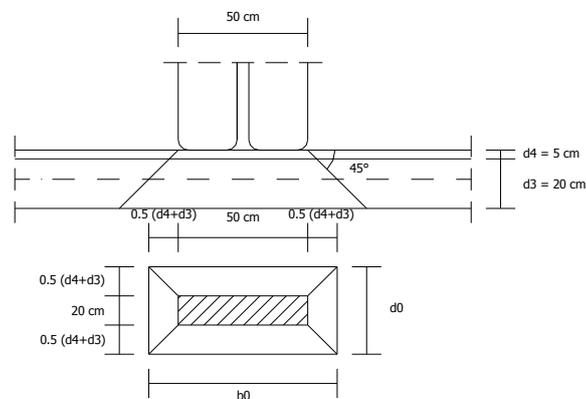
$$d' = 300 - 40 - \frac{1}{2} \times 12 = 254 \text{ mm}$$

$$A_y = \rho_{\min} \times d' \times 1000$$

$$= 0,00225 \times 254 \times 1000 = 571,5 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan arah memanjang Ø 12 – 175 mm , $A_s = 646,27 \text{ mm}^2$

Kontrol Geser Pons :



Gambar 4.1 Geser Pons Pada Pelat Lantai Kendaraan

- Keliling Kritis :

$$\begin{aligned}
 U &= 2 (b_o + d_o) \\
 &= 2 [(0,5 \times 35 + 50 + 0,5 \times 35) + (0,5 \times 35 + 20 + 0,5 \times 35)] \\
 &= 2 [(35 + 50) + (35 + 20)] = 2 [85 + 55] \\
 &= 280 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

- Luas Kritis :

$$\begin{aligned}
 A &= U \times (d_4 + d_3) \\
 &= 280 \times (5 + 30) = 9800 \text{ cm}^2
 \end{aligned}$$

- Gaya Geser Ultimate :

$$\begin{aligned}
 V_n &= K_{TT}^U \times 100 \times (1 + DLA) \\
 &= 2.0 \times 100 \times (1 + 0,3) = 260 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

$$V_{uc} = \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) x \left(\frac{\sqrt{f_c'}}{6} \right) x U x d_o$$

$$\text{Dimana : } \beta = \frac{50}{20} = 2,5$$

$$V_{uc} = \left(1 + \frac{2}{2,5} \right) x \left(\frac{\sqrt{30}}{6} \right) x 2800 \text{ mm} x 550 \text{ mm}$$

$$= 2530478 \text{ N}$$

$$= 2530,478 \text{ KN}$$

$$V_c = \frac{\sqrt{f_c'}}{3} x U x d_o$$

$$= \frac{\sqrt{30}}{3} x 2800 \text{ mm} x 550 \text{ mm}$$

$$= 2811642 \text{ N}$$

$$= 2811,642 \text{ KN}$$

Kuat penampang pada geser harus memenuhi :

i. $V_n \leq V_{uc}$

$$260 \text{ KN} \leq 2530,478 \text{ KN} \text{ (OK)}$$

ii. $V_c > V_{uc}$

$$2811,642 \text{ KN} > 2530,478 \text{ KN} \text{ (OK)}$$

4.2. Perhitungan Balok Memanjang

Pada SFT ini balok memanjang diasumsikan sebagai *simple connection* sehingga berlaku sendi rol sebagai perletakkannya. Jarak antar balok memanjang adalah 1,25 m dengan panjang balok memanjang 3 m. Baik balok memanjang pada SFT berbentuk lingkaran maupun oval memiliki konfigurasi yang sama.

Pada balok memanjang ini direncanakan menggunakan baja WF 250x175x7x11 dengan menggunakan penampang kompak. Keterangan lebih lanjut mengenai profil ini dapat dilihat pada tabel 4.1. Kemudian dikontrol apakah penampang dari profil termasuk kompak atau tidak. Dipilih profil yang digunakan adalah profil kompak guna memudahkan perhitungan lentur.

Setelah itu dihitung beban yang bekerja pada profil seperti beban mati dan beban hidup. Beban mati berasal dari beban aspal, pelat lantai, berat sendiri profil dan beban bekisting. Beban Hidup merupakan beban KEL dan UDL saja, tidak memperhitungkan beban T karena tidak didesain untuk dilewati truk.

Tabel 4.1 Propertis penampang WF 250x175x7x11

| | | | |
|-------|--------------------------|-------|-----------------------|
| A | 56,24 cm ² | S_x | 502,0 cm ³ |
| w | 44,10 kg/m | S_y | 113,0 cm ³ |
| Z_x | 534,77 cm ³ | i_x | 10,4 cm |
| Z_y | 165,60 cm ³ | i_y | 4,18 cm |
| I_x | 6.120,00 cm ⁴ | r | 16 mm |
| I_y | 984,00 cm ⁴ | h | 190 mm |
| f_y | 410 MPa | f_u | 550 MPa |
| t_w | 7 mm | t_f | 11 mm |
| d | 244 mm | b_f | 175 mm |

Kontrol Penampang

| | | | | | |
|-----------------------------|-------|----|-----------------|------|----|
| h/t_w | 27,14 | ok | $b/2t_f$ | 7,95 | ok |
| $1680/f_y^{0.5}$ | 82,97 | | $170/f_y^{0.5}$ | 8,40 | |
| Penampang Kompak !!! | | | | | |

Tabel 4.2 Beban Pada Balok Memanjang

| Beban Mati | |
|---|----------------------|
| <i>Aspal</i> | <i>1,7875 kN/m</i> |
| <i>Plat Beton</i> | <i>7,8 kN/m</i> |
| <i>Berat Sendiri Balok</i> | <i>0,4851 kN/m</i> |
| <i>Berat Bekisting</i> | <i>0,875 kN/m</i> |
| <i>Berat Total (q_{dead})</i> | <i>10,948 kN/m</i> |
| <i>M_{max} (momen akibat beban mati)</i> | <i>12,31605 kN.m</i> |
| <i>V_{max} (gaya geser akibat beban mati)</i> | <i>16,4214 kN</i> |

| Beban Hidup | |
|---|------------------------------|
| <i>Beban Hidup Merata (UDL)</i> | <i>8,00 kN/m²</i> |
| <i>L < 30 m (BMS 2.3.3.1)</i> | |
| <i>q_{UDL}</i> | <i>20,00 kN/m</i> |
| <i>Beban Hidup (KEL)</i> | <i>44 kN/m</i> |
| <i>(BMS 2.3.3.1)</i> | |
| <i>P_(KEL)</i> | <i>71,5 kN</i> |
| <i>M_{max} (momen akibat beban hidup UDL+KEL)</i> | <i>76,125 kN.m</i> |

Setelah dilakukan perhitungan beban selanjutnya menghitung gaya dalam yang terjadi seperti momen dan geser serta lendutan.

Tabel 4.3 Kontrol Balok memanjang

| Kontrol Geser | |
|-----------------------------|-------------------|
| <i>V_{live max}</i> | <i>101,500 kN</i> |
| <i>V_{dead max}</i> | <i>16,421 kN</i> |
| <i>V_u</i> | <i>117,921 kN</i> |
| <i>V_n</i> | 32718 kg |
| | 327,18 kN |
| <i>φV_n</i> | 294,462 kN |
| kontrol | ok !!! |

| Kontrol Lentur | |
|-----------------------------|----------------|
| <i>M_{live max}</i> | 76,125 kNm |
| <i>M_{dead max}</i> | 12,31605 kNm |
| <i>M_u</i> | 88,441 kNm |
| <i>M_n</i> | 219,25652 kNm |
| <i>φM_n</i> | 197,330868 kNm |
| kontrol | ok !!! |

Kontrol Lendutan

| | |
|-------------------------|---------------|
| Δ beban mati | 0,07 cm |
| Δ beban hidup | 0,24 cm |
| Δ total | 0,31 cm |
| Δ ijin | 0,60 cm |
| kontrol lendutan | ok !!! |

Berdasarkan perhitungan di atas, balok memanjang menggunakan profil baja WF 250x175x7x11.

4.3. Perhitungan Balok Melintang

Seperti halnya pada balok memanjang, asumsi yang digunakan pada balok melintang ini adalah simple connection. Begitu juga penampang rencana balok melintang ini memiliki konfigurasi yang sama antara bentuk lingkaran dan oval, namun untuk perhitungan menggunakan perhitungan bentuk oval.

Rencana balok melintang yang digunakan adalah WF 600x300x14x23 dengan panjang 7,4 m. Perhitungan balok melintang ini dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.4 Propertis Penampang WF 600x300x14x23

| | | | |
|-------|----------------------------|-------|--------------------------|
| A | 222,40 cm ² | S_x | 4.620,00 cm ³ |
| w | 175,00 kg/m | S_y | 701,00 cm ³ |
| Z_x | 5.017,23 cm ³ | i_x | 24,90 cm |
| Z_y | 2.041,35 cm ³ | i_y | 6,90 cm |
| I_x | 137.000,00 cm ⁴ | r | 28,00 mm |
| I_y | 10.600,00 cm ⁴ | h | 492,00 mm |
| f_y | 410 MPa | f_u | 550,00 MPa |
| t_w | 14 mm | t_f | 23 mm |
| d | 594 mm | b_f | 302 mm |

Kontrol Penampang

| | | | | | |
|-----------------------------|-------|----|-----------------|------|----|
| h/t_w | 35,14 | ok | $b/2t_f$ | 6,6 | ok |
| $1680/f_y^{0.5}$ | 82,97 | | $170/f_y^{0.5}$ | 8,40 | |
| Penampang Kompak !!! | | | | | |

Tabel 4.5 Tabel Beban Mati Balok Melintang

| Beban Mati Sebelum Komposit | |
|---|---------------------|
| <i>Balok memanjang</i> | <i>1,164 kN/m</i> |
| <i>Plat Beton</i> | <i>18,720 kN/m</i> |
| <i>Balok melintang</i> | <i>1,925 kN/m</i> |
| <i>Berat Bekisting</i> | <i>2,100 kN/m</i> |
| <i>Berat Total (q_{dead})</i> | <i>23,909 kN/m</i> |
| <i>M_{max} (momen akibat beban mati)</i> | <i>163,659 kN.m</i> |
| <i>V_{max} (gaya geser akibat beban mati)</i> | <i>88,464 kN</i> |

| Beban Mati Sesudah Komposit | |
|---|--------------------|
| <i>Aspal</i> | <i>4,29 kN/m</i> |
| <i>Berat Total (q_{dead})</i> | <i>4,290 kN/m</i> |
| <i>M_{max} (momen akibat beban mati)</i> | <i>29,365 kN.m</i> |
| <i>V_{max} (gaya geser akibat beban mati)</i> | <i>15,873 kN</i> |

Seperti pada perhitungan balok memanjang beban yang bekerja pada balok melintang adalah beban hidup dan beban mati. Beban mati pada balok melintang ini terjadi dua kondisi yaitu sebelum komposit dan sesudah komposit. Beban mati sebelum komposit terdiri dari beban balok memanjang, balok melintang, pelat lantai dan beban bekisting sementara beban mati sesudah komposit hanya beban aspal. Beban hidup tidak berbeda dengan balok memanjang.

Tabel 4.6 Tabel Beban Hidup Balok Melintang

| Beban Hidup | |
|--|-------------------------------|
| <i>Beban Hidup Merata (UDL)</i> | <i>9,355 kN/m²</i> |
| <i>L > 30 m (BMS 2.3.3.1)</i> | |
| <i>q_{UDL}</i> | <i>56,129 kN/m</i> |
| <i>Beban Hidup (KEL)</i> | <i>44 kN/m</i> |
| <i>(BMS 2.3.3.1)</i> | |
| <i>q_{KEL}</i> | <i>114,4 kN/m</i> |
| <i>M_{max} (momen akibat beban hidup UDL+KEL)</i> | <i>1167,272 kN.m</i> |
| <i>V_{max} (gaya geser akibat beban hidup UDL+KEL)</i> | <i>630,958 kN</i> |

Tabel 4.7. Tabel Kontrol pada Balok Melintang

| | |
|------------------|---------------|
| $V_{live_{max}}$ | 630,958 kN |
| $V_{dead_{max}}$ | 104,337 kN |
| V_u | 735,295 kN |
| V_n | 169444,8 kg |
| | 1694,448 kN |
| ϕV_n | 1525,0032 kN |
| kontrol | ok !!! |

| | |
|------------------|---------------|
| $M_{live_{max}}$ | 1167,27 kNm |
| $M_{dead_{max}}$ | 193,02 kNm |
| M_u | 1360,30 kNm |
| M_n | 2057,0643 kNm |
| ϕM_n | 1851,3579 kNm |
| kontrol | ok !!! |

| | |
|-------------------------|---------------|
| Δ beban mati | 0,29 cm |
| Δ beban hidup | 1,16 cm |
| Δ total | 1,45 cm |
| Δ ijin | 1,48 cm |
| kontrol lendutan | ok !!! |

Tahap akhir dari desain balok melintang adalah mengontrol gaya dalam yang terjadi harus kurang dari gaya dalam yang dimampu ditahan oleh profil. Berdasarkan analisis tersebut balok melintang menggunakan profil baja WF 600x300x14x23.

4.4. Perhitungan Penampang SFT

Penampang SFT ini terdiri dari 3 (tiga) layer/lapisan, yaitu bagian dalam dari baja (t_1), bagian tengah dari *polyurethane* (t_c) dan bagian luar dari baja (t_2). Namun ketebalan tiap layer ini harus memenuhi persyaratan yang telah ditentukan seperti pada uraian 3.4.1.

Untuk menghitung ketebalan t_1 dan t_2 dengan menggunakan Persamaan (3.1) didapatkan nilai t_1 dan $t_2 = 3,748$ mm. Nilai ini dibulatkan menjadi 4 mm. Sedangkan untuk menghitung ketebalan ini (t_c) harus menggunakan coba-coba sehingga memenuhi Persamaan (3.2). Dicoba menggunakan $t_c = 15$ mm, didapatkan nilai $R < 1$. Namun untuk memudahkan pelaksanaan dibulatkan menjadi 20 mm sehingga SPS yang digunakan pada penelitian ini adalah 4-20-4.

Tabel 4.8 Tabel Perhitungan Tebal SPS

| Lingkaran | | | Oval | | |
|----------------------|----------|-----------------|----------------------|----------|-----------------|
| t _o | 5 | | t _o | 5 | |
| k | 0,02 | | k | 0,02 | |
| L | 151,4112 | m | L | 151,4112 | m |
| f ₁ | 1,47 | | f ₁ | 1,47 | |
| t _{1,2_min} | 3,748818 | mm | t _{1,2_min} | 3,748818 | mm |
| t ₁ | 4 | mm | t ₁ | 4 | mm |
| t ₂ | 4 | mm | t ₂ | 4 | mm |
| t _c | 15 | mm | t _c | 15 | mm |
| a | 151,4112 | m | a | 151,4112 | m |
| b | 15,70796 | m | b | 20,42035 | m |
| d | 19 | mm | d | 19 | mm |
| Z | 8641685 | cm ³ | Z | 8641685 | cm ³ |
| A _R | 4,361388 | | A _R | 3,677575 | |
| P _{eq,R} | 0,640813 | | P _{eq,R} | 0,640813 | |
| R | 0,003846 | OK | R | 0,004583 | OK |

4.5. Perhitungan BWR

BWR atau rasio gaya apung terhadap beban SFT dapat ditentukan menggunakan Persamaan (3.6), (3.10) dan (3.11). Untuk contoh kasus BWR dengan penampang lingkaran dengan SPS 4-20-4 adalah sebagai berikut:

Berat tunnel didapat dengan Persamaan (3.6)

$$W_T = 1,3 \left(\sum A_c \cdot y_s \right) = 1,3(14,362) = 18,672 \text{ kN}$$

$$U = A_T \cdot \gamma_w = 20,077 \cdot (117,38 \cdot 10,30) = 24273 \text{ kN}$$

Untuk perhitungan lebih rinci dapat dilihat pada tabel berikut ini

Tabel 4.9 Tabel BWR

| Model | SPS | B. Memanjang | B. Melintang | Lantai Beton | Bersat Aspal | Berat Tunnel | UDL | UKL | Ballast | W | U | BWR |
|---|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|---------|---------|----------|----------|-------|
| A1 | 4-20-4 | 199,58778 | 254,8 | 5068,896 | 604,04344 | 17,61877794 | 346,978 | 20,8572 | 12159 | 18671,78 | 24273,66 | 1,300 |
| A2 | 4-20-4 | 399,17556 | 490 | 5068,896 | 604,04344 | 22,87497661 | 346,978 | 40,11 | 22779 | 29751,08 | 38676,55 | 1,300 |
| Ket: Jumlah balok melintang oval 4 buah dan oval 6 buah | | | | | | | | | | | | |

Nilai W pada tabel di atas merupakan gabungan dari berat balok memanjang, balok melintang, lantai beton dan aspal, berat tunnel, UDL, UKL dan Ballast. Sedangkan BWR sendiri merupakan perbandingan antara U terhadap

W. Nilai BWR harus 1,3 sehingga bila rasio antara U dan W belum mencapai atau melebihi 1,3 maka dilakukan penambahan ballast. Sehingga ballast pada tabel di atas merupakan beban mati tambahan, dapat berupa blok beton ataupun air saluran dalam SFT.

BAB 5

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas mengenai analisis data dan interpretasi dari hasil dari *Abaqus*. Analisis data ini bertujuan untuk mendapatkan parameter-parameter yang harus diinput pada *Abaqus*, terutama tipe gelombang. Dengan mengetahui tipe gelombang yang terjadi akan diketahui pula parameter apa saja yang akan diberikan pada saat memasukan beban gelombang yang terdapat pada bahasa program *Abaqus Aqua*. *Abaqus Aqua* merupakan bahasa program pada *Abaqus* yang memang diperuntukan untuk analisis stuktur yang mendapat pengaruh gelombang seperti bangunan lepas pantai, kapal dan tentu saja SFT.

5.1. Menentukan Tipe Gelombang

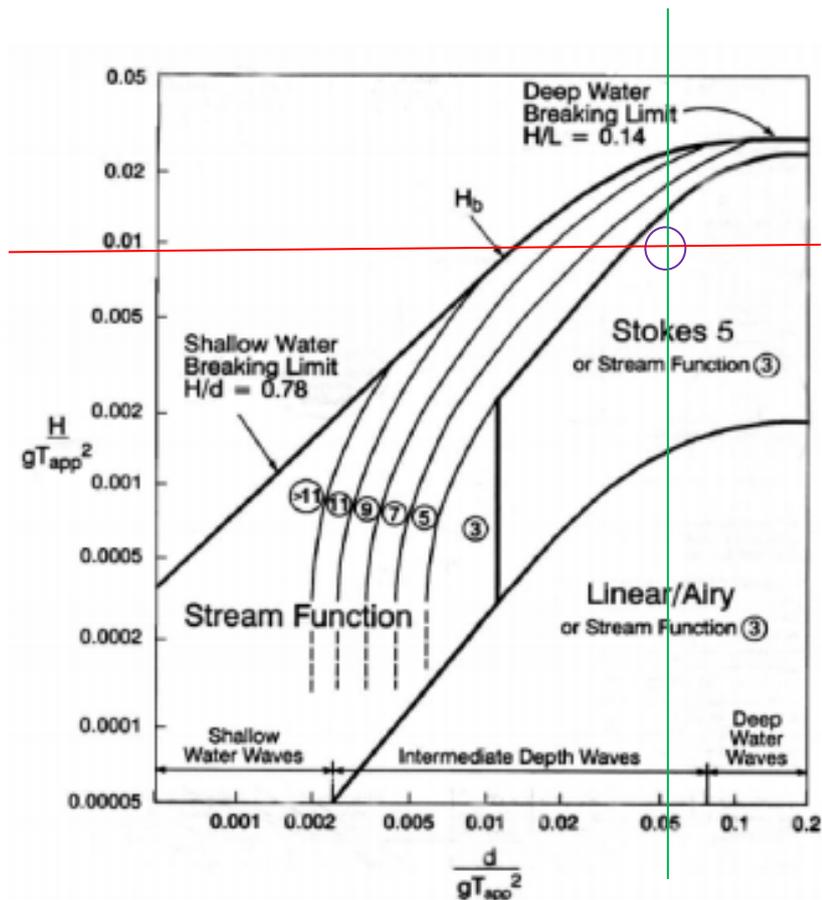
Seperti telah dijelaskan pada Bab 3, gelombang di lautan terdiri dari berbagai bentuk/tipe. Bentuk gelombang yang paling mudah adalah Tipe Airy, namun pada penelitian ini tipe gelombang yang digunakan harus sesuai dengan keadaan di lapangan. Untuk menentukan tipe gelombang dapat menggunakan grafik yang ada pada Gambar 3.9.

Pada Gambar 3.9, parameter-parameter yang dibutuhkan untuk menentukan tipe gelombang yang digunakan adalah tinggi gelombang (H), perioda gelombang (T) dan kedalaman laut (d). Dari grafik tersebut dihubungkan antara parameter horisontal dan vertikal. Adapun nilai dari parameter horisontal dan vertikal tersebut adalah:

$$\frac{H}{g \cdot T^2} = \frac{1,2}{9,81 \cdot 3,58^2} = 0,009544 \quad (5.1)$$

$$\frac{d}{g \cdot T^2} = \frac{20}{9,81 \cdot 3,58^2} = 0,159072 \quad (5.2)$$

Nilai tersebut kemudian ditarik searah nilainya dan titik pertemuan garis tersebutlah yang menentukan tipe gelombang yang digunakan.



Gambar 5.1 Penentuan Tipe Gelombang

Garis merah tersebut merupakan nilai dari H/gT^2 dengan nilai 0,009 dan garis hijau nilai dari d/gT^2 dengan nilai 0,159. Pertemuan kedua garis tersebut berada pada area Stokes 5, yang artinya tipe gelombang berdasarkan data H , g , d dan T tersebut adalah tipe gelombang stokes. Tipe gelombang Stokes ini dapat diinput di *Abaqus* dengan menggunakan bahasa program *Abaqus Aqua*.

5.2. Menentukan Panjang Gelombang

Panjang gelombang ditentukan menggunakan cara coba-coba dengan persamaan (3.14), (3.15), (3.16) dan (3.17). Karena antara variabel d , L dan λ sangat terkait dengan variabel lainnya. Maka pada penentuan panjang gelombang ini hanya variabel d/L dan λ saja yang diinput dengan cara coba-coba, sehingga didapatkan panjang gelombang L sebesar 20,411423 m \approx 20,14 m.

5.3. Menentukan Kecepatan dan Percepatan Partikel Air

Kecepatan Partikel Air untuk arah horisontal (u) dan vertikal (v) ditentukan dengan persamaan berikut ini:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \sum_{n=1}^5 n \frac{\omega}{k} \phi_n \cosh\{k(d+z)\} \sin(\omega t - kx) \quad (5.3)$$

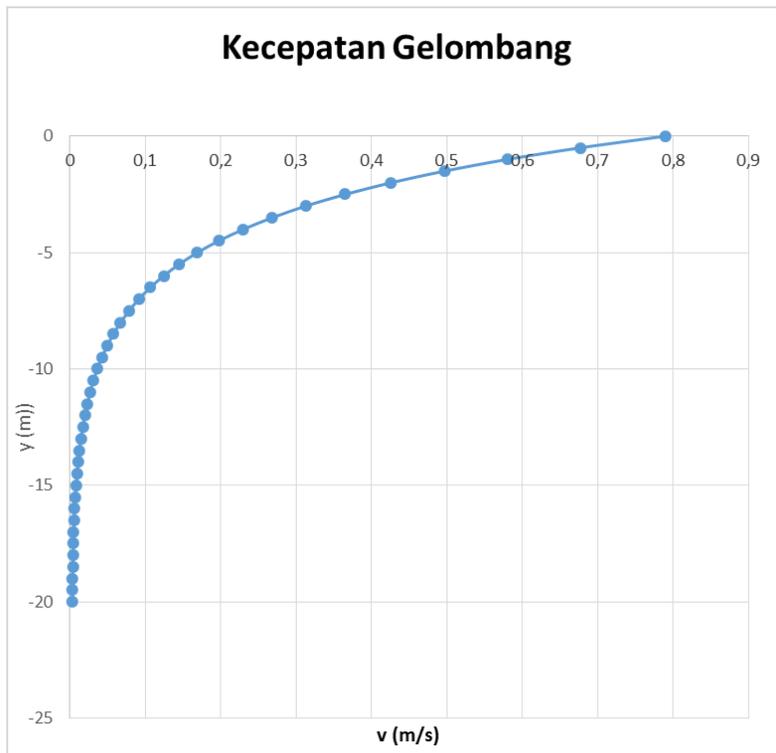
$$v = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \sum_{n=1}^5 \frac{\omega}{k} \phi_n \sinh\{k(d+z)\} \cos(\omega t - kx) \quad (5.4)$$

Untuk percepatan arah x (a_x) dan arah y (a_y) dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini:

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = \sum_{n=1}^5 n \frac{\omega^2}{k} \phi_n \cosh\{k(d+z)\} \cos(\omega t - kx) \quad (5.5)$$

$$a_y = \frac{\partial v}{\partial t} = -\sum_{n=1}^5 \frac{\omega^2}{k} \phi_n \sinh\{k(d+z)\} \sin(\omega t - kx) \quad (5.6)$$

Dengan menggunakan $\sigma = 2\pi/T = 1,755$ cps, $y = -7,5$ m dan $x = 0$ serta $t = T = 3,58$, maka didapatkan nilai dari persamaan tersebut diatas dan diplot dalam grafik berikut ini.

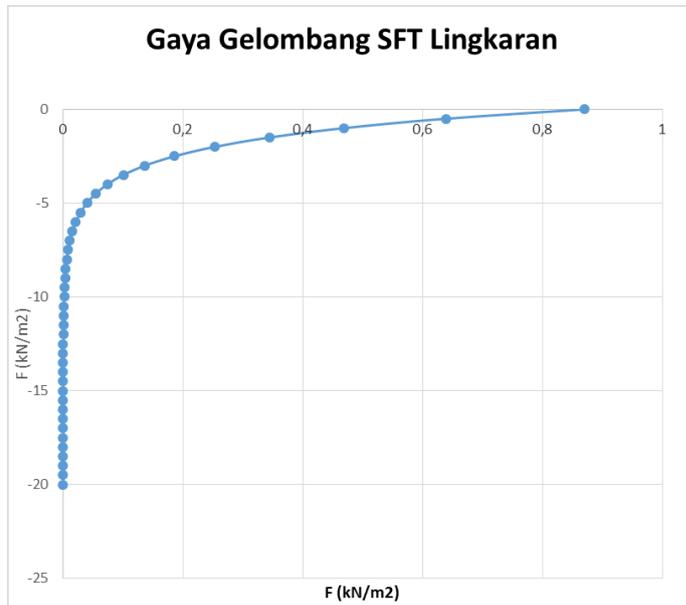


Gambar 5.2 Kecepatan Gelombang

Dari Gambar 5.2 terlihat kecepatan gelombang semakin di dasar semakin berkurang. Kecepatan gelombang ini tidak dipengaruhi bentuk dari penampang SFT, karena variabel yang digunakan adalah angka gelombang, periode gelombang dan kedalaman laut saja.

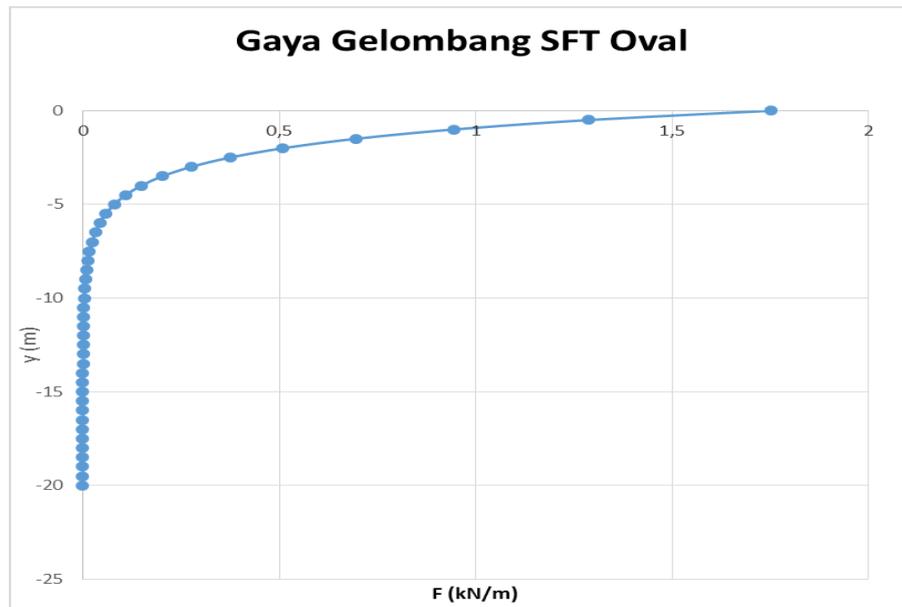
5.4. Menentukan Tekanan Gelombang

Tekanan gelombang akibat kecepatan dan percepatan partikel air menggunakan Persamaan (3.21) hingga Persamaan (3.23). Pada Persamaan (3.14) tersebut memerlukan koefisien C_d dan C_m . Nilai dari C_d dan C_m yang digunakan adalah 1,05 dan 1,2. Gaya gelombang ini sangat dipengaruhi oleh bentuk dari bentuk SFT.



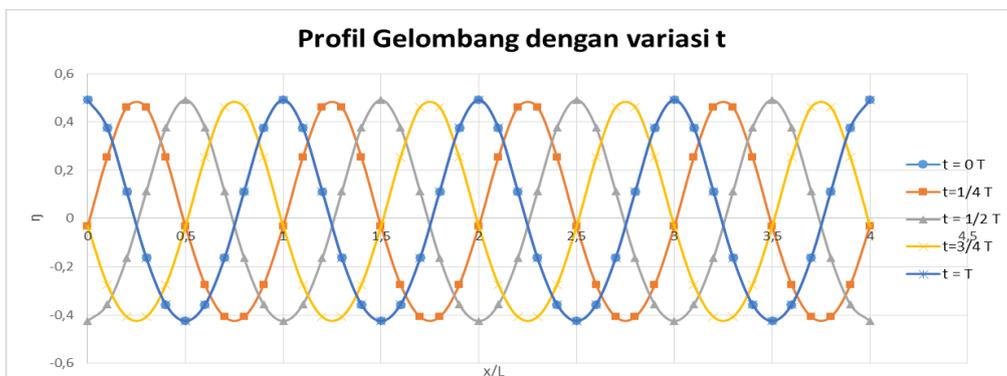
Gambar 5.3 Gaya Gelombang Model A1

Pada tekanan gelombang dengan SFT berbentuk lingkaran (A1) ini tekanan terbesar terjadi pada muka air. Tekanan ini dipengaruhi oleh profil gelombang dengan menggunakan rumusan Morison. Pada gaya gelombang ini belum mendapat gaya tekan hidrostatis. Tekanan hidrostatis akan berbentuk linier dan semakin besar pada dasar laut, berbalik dengan kondisi gaya gelombang.



Gambar 5.4 Gaya Gelombang Model A2

Gambar gaya gelombang di atas merupakan tekanan gelombang pada SFT dengan model lingkaran (A1) dan oval (B1). Untuk model A2 dan B2, beban ini ditambahkan beban displacement hingga 500 mm sehingga kondisi ekstrim dari SFT tersebut. Gaya gelombang pada SFT dengan bentuk lingkaran (A1) terlihat lebih kecil bila dibandingkan dengan penampang berbentuk oval (B1). Hal tersebut dipengaruhi oleh dimensi penampang dimana lebar/diameter efektif model B1 lebih besar dari pada model A1. Jadi semakin besar penampang, semakin besar pula gaya gelombangnya.



Gambar 5.5 Profil gelombang dengan berbagai variasi t

Profil gelombang ini akan mempengaruhi besarnya gaya gelombang. Pada distribusi gaya gelombang kondisi A1 dan A2, menggunakan $t = 0$ T. Dengan kondisi $t = 0$ T ini akan mendapatkan gaya gelombang yang paling besar bila dibandingkan dengan t semakin besar (mendekati T).

5.5. Hal yang Harus Diperhatikan Pada Analisis *Abaqus*

Secara umum, tahap-tahap dalam melakukan analisis dengan *Abaqus* adalah menggambar model SFT, *input material*, penggabungan *part*, *step*, *interaction*, *load*, *mesh*, *job* dan *analysis*. Namun untuk penelitian ini ada hal-hal yang harus diperhatikan dalam melakukan analisis dengan *Abaqus* ini.

1. Satuan dan Orientasi Sumbu

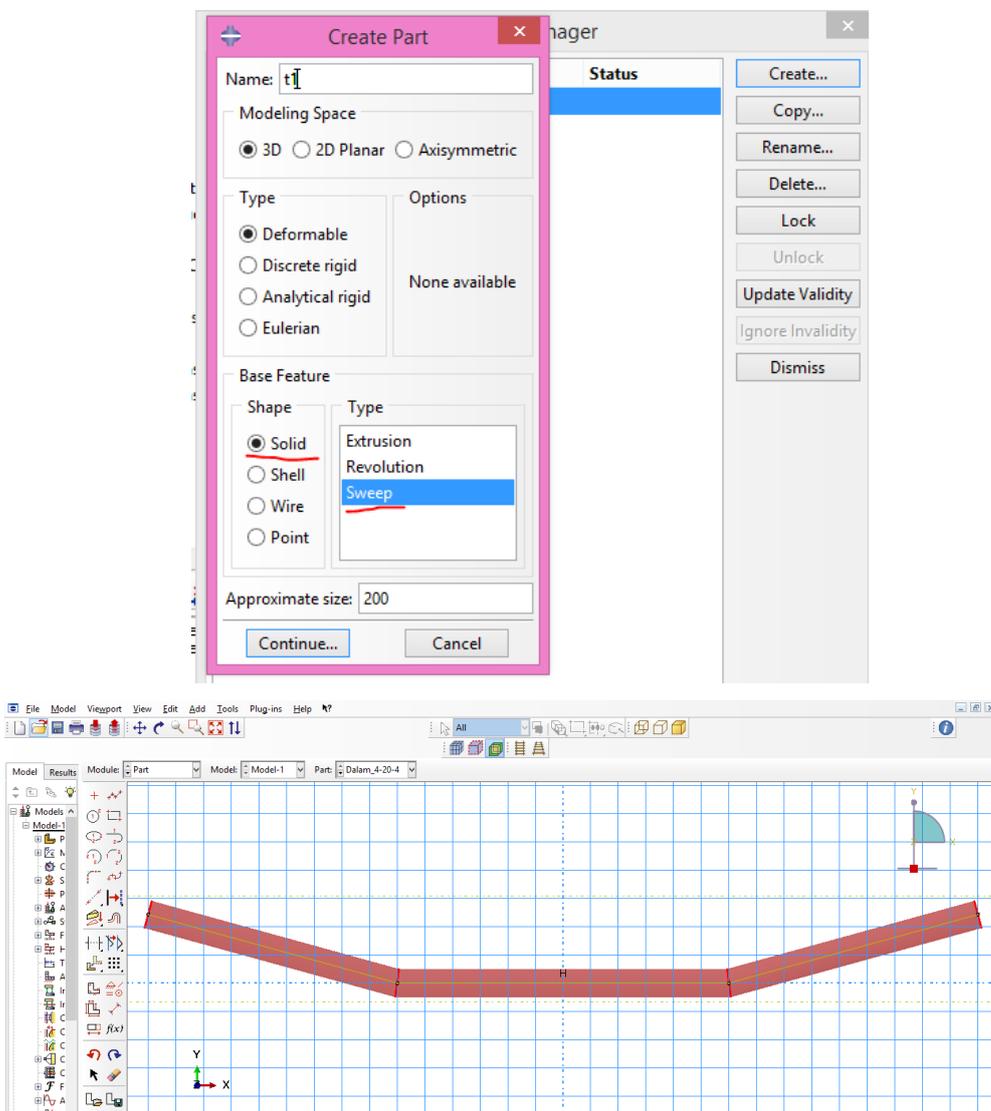
Dalam *Abaqus* tidak terdapat input satuan sehingga kita harus mendefinisikan sendiri satuan yang kita gunakan. Satuan yang digunakan pada *input Abaqus* pada penelitian ini adalah kN untuk beban, m untuk jarak/ *displacement*, m/s^2 untuk gaya gravitasi, $^{\circ}$ untuk sudut dan kPa untuk tekanan, begitu pula *output* yang dihasilkan dari *Abaqus* sama seperti asumsi input satuan. Namun untuk hasil pada pembahasan nantinya *output* dari tekanan tersebut akan dikonversi menjadi MPa dan mm untuk satuan jarak/*displacement*.

Selain satuan, hal lain yang harus diperhatikan pada penelitian ini adalah orientasi sumbu dari model. Untuk profil memanjang dari SFT searah sumbu x dan lebar/potongan melintang searah sumbu y sedangkan level/tinggi searah sumbu z. Penggunaan sumbu ini nantinya akan sinkron dengan bahasa program pada saat pemberian beban gelombang stokes.

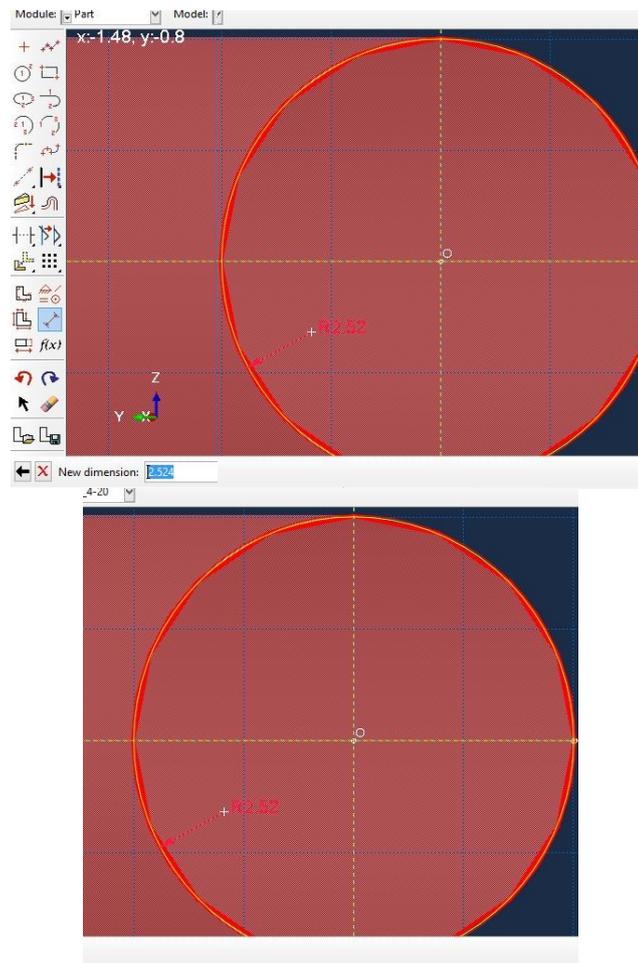
2. Penggambaran Model

Model yang akan dibentuk dengan *Abaqus* menggunakan *shape solid*. Karena bentuknya yang cukup rumit sehingga penggambaran model menggunakan solid dengan tipe *sweep*. Dengan tipe ini kita dapat membuat bentuk model SFT mendekati kondisi aslinya. Tahap awal dari tipe ini adalah dengan membuat bentuk SFT dengan koordinat -75,12.15 untuk koordinat penampang yang berada di daratan pada sisi kiri lalu -30,0,

kemudian 30,0 dan ditutup pada koordinat 75,12.15. Sehingga bentuk dari potongan memanjang SFT terlihat seperti pada Gambar 5.6. Langkah selanjutnya adalah membuat penampang dari SFT pada *tools* yang sama. Dengan menekan *enter*, maka kita akan dialihkan untuk membuat penampang dari SFT. Selanjutnya dibuat dulu lapisan terdalam (t_1) untuk SFT dengan radius lingkaran dalam 2,5 m dan diberi ketebalan 4 mm sehingga radius lingkaran luar untuk t_1 adalah 2,504 m.



Gambar 5.6 Permodelan SFT Pada *Abaqus*



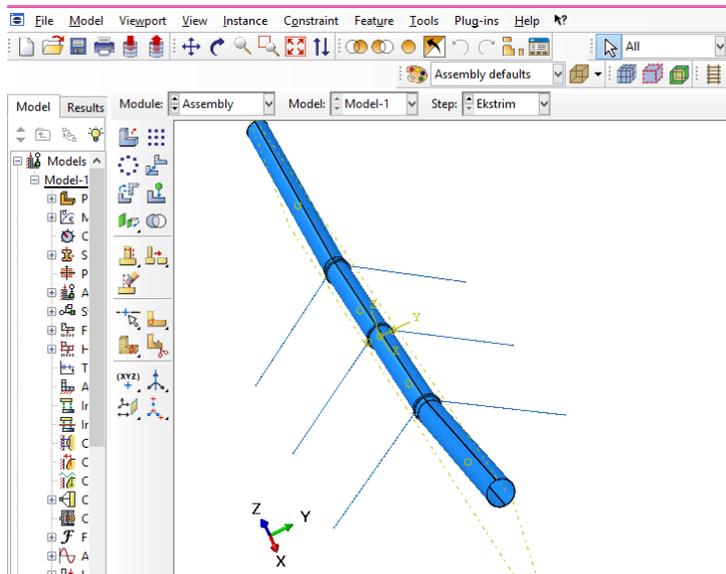
Gambar 5.7 Permodelan *Polyurethane*

Setelah itu membuat lapisan inti (t_c) atau *elastomer polyurethane* dengan cara yang sama dengan memodelkan t_1 di atas. Hanya saja perbedaan terjadi pada radius lingkaran dalam 2,504 m dan radius lingkaran luar sebesar 2,524 m sebagaimana terlihat pada Gambar 5.7 di atas.

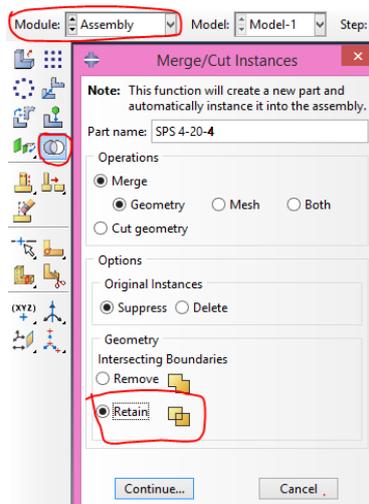
3. Penggabungan Part

Dalam *Abaqus*, tiap bagian dari model harus dibuat dalam satu *part*, yang dapat digabungkan satu dengan lainnya sehingga menjadi model yang sesuai dengan yang diinginkan. Penggabungan *part* atau bagian bagian yang telah dimodelkan menggunakan *Module: Assembly*. Pada module ini terdiri dari beberapa *tool* seperti *create instace* untuk memasukan *part* pada gambar kerja, *rotate instance* untuk memutar *part*, *translate instance* untuk menggerakkan *part* dan lain sebagainya. Pada tahapan ini merupakan

penggabungan dari beberapa *part* sehingga menjadi bentuk yang sesuai dengan yang akan di analisis.

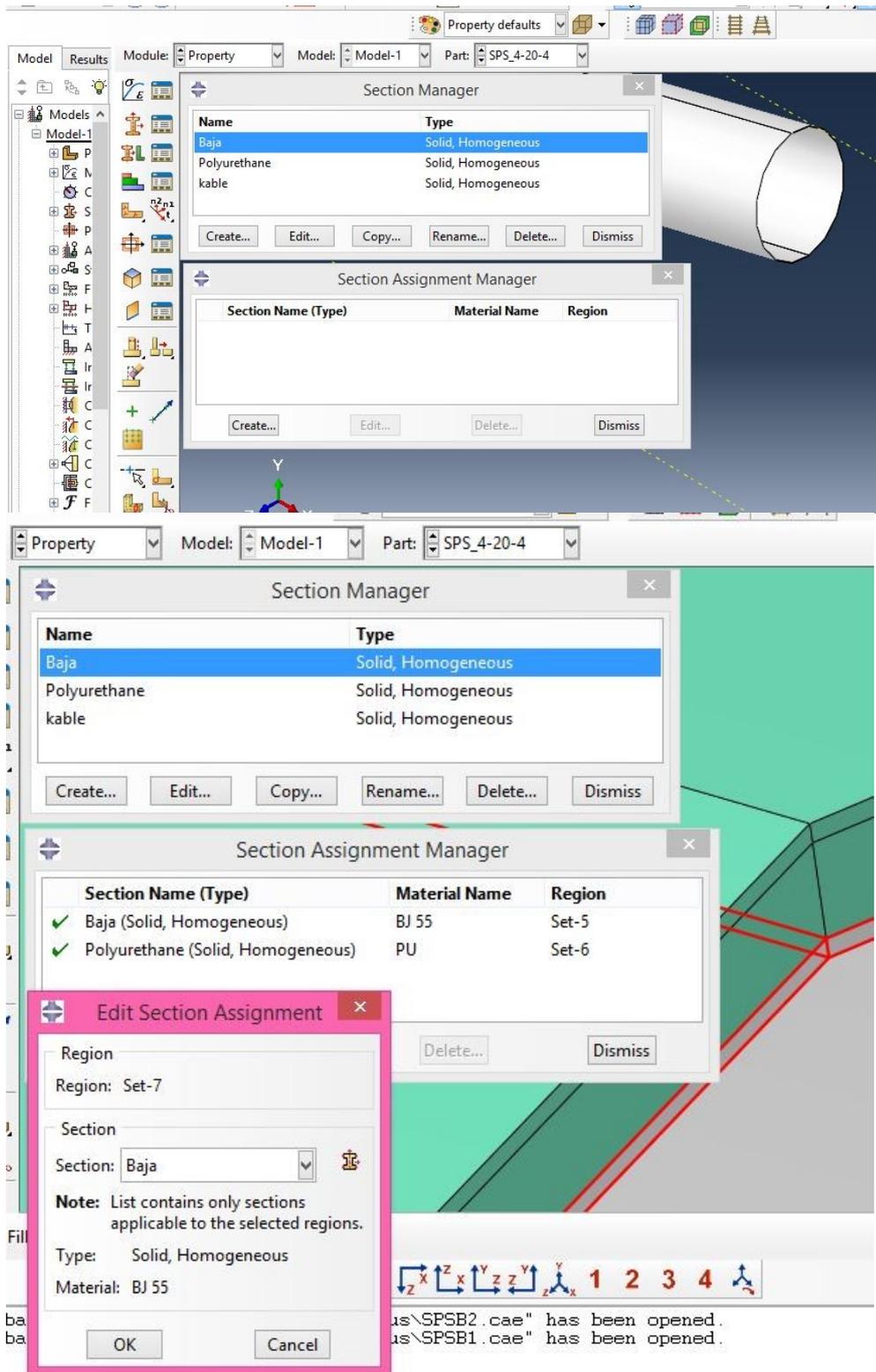


Gambar 5.8 Pilihan *Module* pada *Abaqus*



Gambar 5.9 Penggabungan *Part*

Karena pada model SFT ini terdiri dari 3 lapisan dengan material yang berbeda/*part*, maka penggabungan antara lapisan satu dengan lainnya menggunakan *merge* dengan tipe *both* kemudian untuk memisahkan antara t_1 , t_c dan t_2 menggunakan *retrain* untuk *geometri*, dimana lapisan tersebut akan menjadi satu dalam hal *part* namun terpisah dalam hal *properties/material* sehingga penampang akan berbentuk SPS.

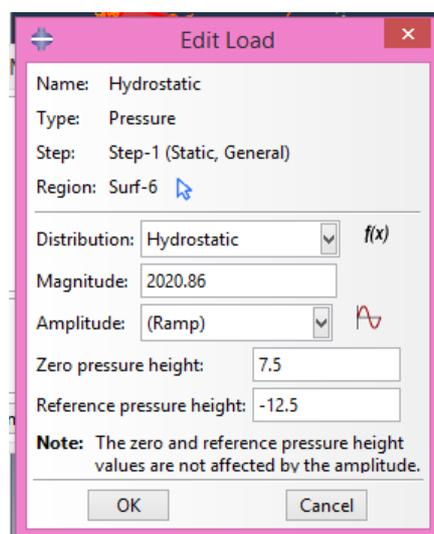


Gambar 5.10 Pemberian Material SPS

Setelah penggabungan part, maka langkah selanjutnya adalah memberikan material SPS yang sesuai pada masing-masing lapisan. Gambar 5.10 di atas memperlihatkan cara pemberian material SPS pada *part* yang telah digabung. Pertama-tama memilih lapisan t_1 dan diberikan material baja, selanjutnya memilih lapisan tengah dan diberikan material *polyurethane*. Begitu pula pada lapisan terdalam (t_2), setelah dipilih diberikan material yang sesuai yaitu baja sehingga seluruh lapisan telah membentuk SPS dengan material yang sesuai.

4. *Load dan Boundary Condition*

Pada tahap ini diberikan beban/*load* yang sesuai dengan SFT seperti beban hidrostatik, dinamis dan beban lainnya yang bekerja pada SFT. Beban hidrostatik ini diberikan secara dinamis dengan membuat *Step* dengan bentuk dinamis. Karena titik tengah dari penampang berada pada koordinat 0,0, maka tinggi elevasi air berada 7,5 m dari titik tengah dan -12,5 m untuk dasar laut. Beban maksimum sebesar $\rho g d = 2020 \text{ kN/m}$. Beban Gelombang Stokes diberikan pada tahap ini namun bukan pada *module load*, tapi pada edit bahasa program (*subrotine*). Input yang harus diberikan pada beban gelombang ini berdasarkan manual dari *Abaqus* adalah **AQUA* dan **WAVE*. Dimana **AQUA* untuk memberikan efek dinamis pada beban gelombang dan **WAVE* adalah tipe gelombang yang akan digunakan, dalam hal ini stoke orde 5.



Gambar 5.11 *Input* Beban Hidrostatik

Input File Usage: **AQUA*
 seabed elevation, free surface elevation, gravitational constant, fluid density
 The **AQUA* option must be included in the model data portion of the input file.

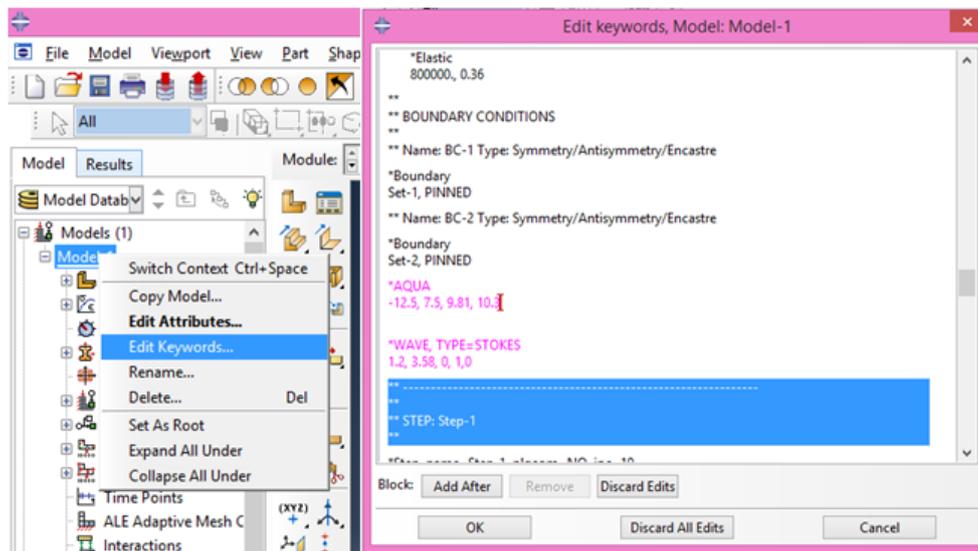
Input File Usage: **WAVE, TYPE=STOKES*
 wave height, wave period, phase angle, direction of travel cosines

Gambar 5.12 *Screen Shoot Subroutine Aqua*

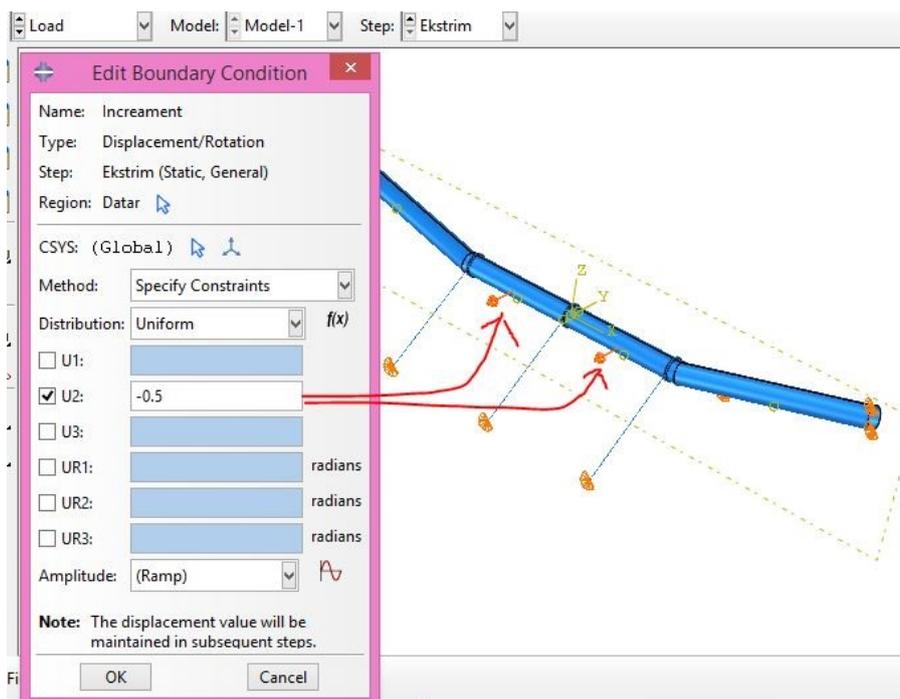
Screen shoot di atas didapatkan dari manual Abaqus. Adapun input bahasa program yang digunakan pada penelitian ini adalah:

```
*AQUA  
-12.5, 7.5, 9.81, 10.3  
*WAVE, TYPE=STOKES  
1.2, 3.58, 0, 1, 0
```

Cara memasukan beban gelombang ini dengan klik kanan pada “*Module*” kemudian pilih “*Edit Keyword*”. Setelah itu, masukan bahasa program dari *Aqua* dan gelombang seperti di atas, tepat di atas “*Step*”. Sesuai keterangan dari manual *Abaqus*, bahwa untuk *subroutine Aqua* harus terdiri dari elevasi dasar laut (-12,5 m), muka air laut (7,5 m), gaya gravitasi (9,81 m/s²) dan masa jenis air laut (10,30 kN/m³). Sementara untuk gelombang, harus menuliskan **WAVE* kemudian tipe gelombangnya, yaitu Stokes Orde 5. Adapun parameter pada *subroutine* gelombang ini adalah tinggi gelombang (1,2 m), periode gelombang (3,58 m), sudut fase gelombang (0), dan arah datang gelombang (1,0).



Gambar 5.13 Cara Pemberian Beban *Aqua* dan Tipe Gelombang



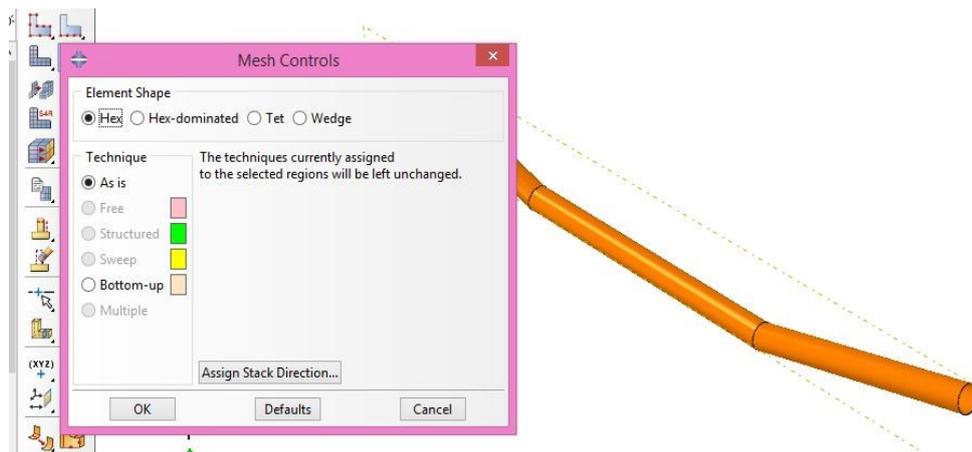
Gambar 5.14 Beban *Displcament* Model B2

Khusus Model B1 dan Model B2 dilakukan penambahan beban berupa *displacement* searah sumbu y pada bagian sisi datar dari badan SFT (Gambar 5.14). Selain penambahan beban hal lain pada bagian ini adalah pada pilihan *boundary condition*, dimana pada bagian ini diberikan asumsi dari perletakan dan beban *displacement*. Perletakan diasumsikan sebagai

sendi, baik pada ujung perletakan maupun pada ujung kabel. Pada perletakan ujung, sendi diberikan mengelilingi penampang. Sementara penambahan beban *displacement* dilakukan secara statis diberikan hingga 500 mm yang dilakukan hingga 10 Step sehingga setiap Step memberikan *displacement* searah sumbu y negatif sebesar 50 mm. Dengan penambahan beban ini diharapkan memperlihatkan kondisi SFT sampai mencapai titik lelehnya ($f_y = 410$ MPa pada baja, $f_y = 16$ MPa pada PU, dan $f_y = 1675$ MPa pada kabel). Penambahan beban *displacement* ini sebagai asumsi bahwa SFT terkena beban gelombang secara ekstrim yang melebihi perencanaan sehingga mengalami *displacement* (searah sumbu y) melebihi batas yang diijinkan sebesar 187,5 mm.

5. Mesh

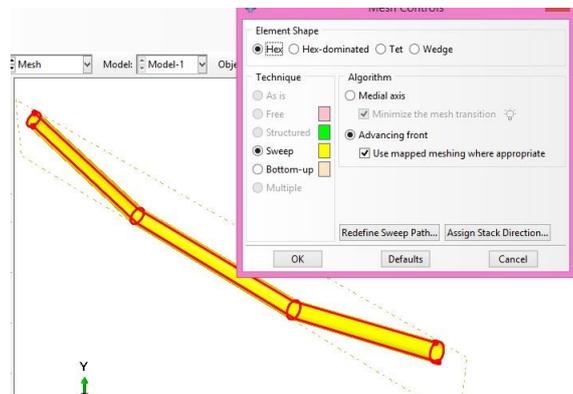
Setelah dilakukan penggabungan *part* seperti dijelaskan di atas, maka hal penting lainnya adalah *mesh*. Pada model SFT terlihat bahwa penampang sebelum diberikan *mesh* masih berwarna jingga. Warna jingga pada model menunjukkan bahwa tidak dapat dilakukan mesh pada model karena bentuk yang rumit –berdasarkan program *Abaqus*, sehingga harus dilakukan pemotongan penampang/partisi menjadi bentuk yang lebih sederhana.



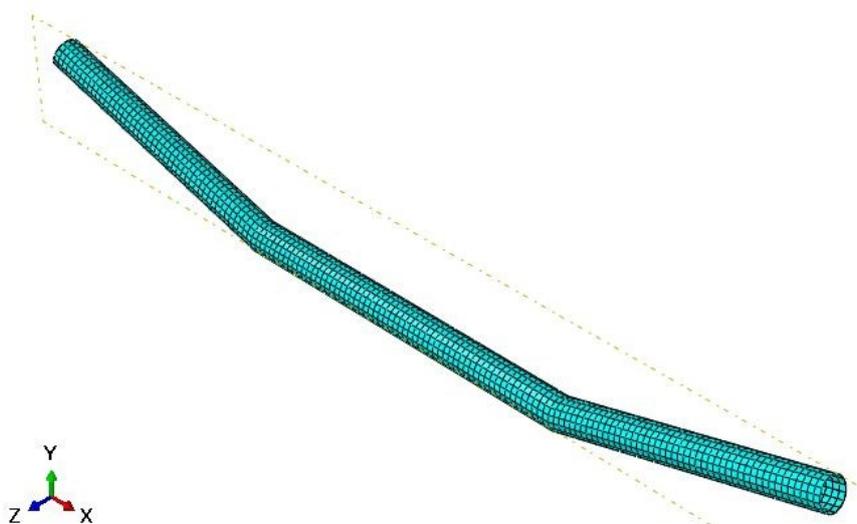
Gambar 5.15 Penampang SPS yang Belum Dipartisi

Untuk penempatan partisi ini dilakukan dengan cara coba-coba sehingga warna dari model akan menjadi dari salah satu warna berikut: hijau, kuning

atau merah muda. Tiap tiap warna mewakili pemilihan model *mesh* yang dapat dilakukan. Model dengan warna hijau adalah yang paling baik untuk dilakukan *mesh* karena memiliki bentuk yang paling sederhana, kemudian kuning dan merah muda. Partisi pada model SFT di penelitian ini adalah dengan membagi 2 bagian SFT secara memanjang. Pada saat dibagi dengan model partisi ini, SFT telah berganti berwarna kuning yang artinya model sudah dapat *dimesh* (Gambar 5.16). Selanjutnya dilakukan *meshing* pada penampang SFT dan *part* lainnya seperti sabuk dan kabel. Karena sabuk dan kabel sudah berwarna kuning, sehingga tidak perlu dilakukan partisi, cukup langsung ke proses *mesh*.



Gambar 5.16 Penampang SPS yang Telah Dipartisi



Gambar 5.17 Penampang SPS Setelah Diberikan *Mesh*

Penampang/*part* yang telah diberikan *mesh*, akan terdiri dari banyak elemen sebagaimana terlihat pada Gambar 5.17 di atas. Semakin kecil *mesh* maka semakin banyak elemen yang dihasilkan. Namun semakin banyak elemen akan membutuhkan waktu analisis yang lama. Untuk penelitian ini, *mesh* yang digunakan untuk penampang dipilih yang berbentuk persegi, dengan jumlah mengikuti *default* dari *Abaqus*. Hal ini bertujuan agar elemen yang dihasilkan tidak terlalu banyak, namun juga tidak terlalu sedikit.

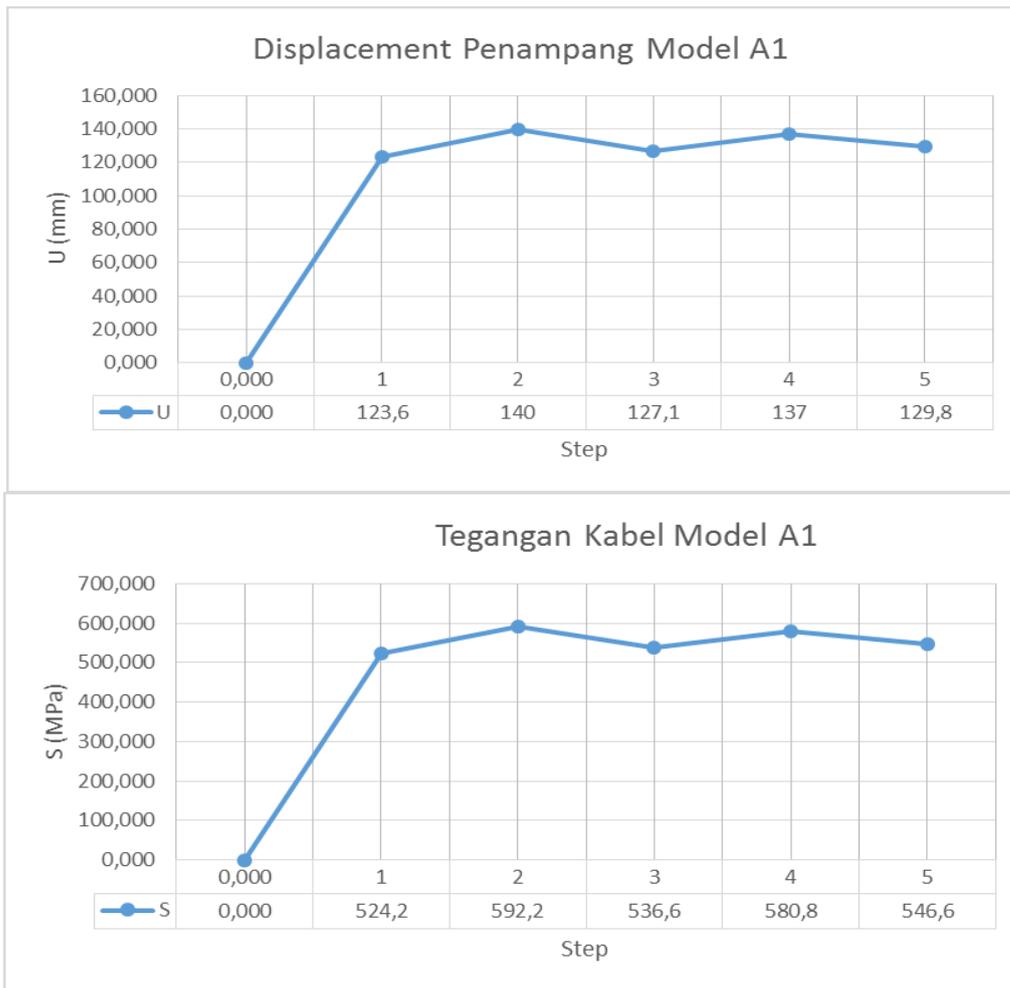
5.6. Interpretasi *Output* Model A1

Sebagaimana telah dijelaskan di atas bahwa satuan untuk *output* dari *Abaqus* ini adalah kPa untuk tekanan dan m untuk jarak/*displacement*, namun pada saat penyajian akan dikonversi ke MPa dan mm.

Tabel 5.1 Tegangan Model A1

| <i>Step</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Ijin |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| S t ₁ (MPa) | 288,35 | 312,11 | 293,28 | 307,73 | 297,09 | 410 |
| Rasio (%) | 70,33 | 76,12 | 71,53 | 75,06 | 72,46 | 100 |
| S t _c (MPa) | 1,15 | 1,25 | 1,17 | 1,23 | 1,19 | 16 |
| Rasio (%) | 7,22 | 7,79 | 7,34 | 7,69 | 7,43 | 100 |
| S t ₂ (MPa) | 282,54 | 305,81 | 287,37 | 301,52 | 291,10 | 410 |
| Rasio (%) | 68,91 | 74,59 | 70,09 | 73,54 | 71,00 | 100 |

Tabel 5.1 memperlihatkan tegangan pada Model A1. Tegangan yang terjadi pada penampang SFT dengan Model A1 ini sebagaimana terlihat pada Tabel 5.1. berada pada daerah perletakan, dimana tegangan untuk model A1 tegangan terbesar terjadi pada daerah ini. Dari ketiga lapisan t₁, t_c dan t₂ tidak ada yang mengalami leleh hingga *Step* 5. Beban yang diberikan pada kondisi ini adalah beban dalam kondisi normal -beban perencanaan. Tegangan maksimum terjadi pada *Step* 2 dimana pada t₁ (bagian terluar) rasio antara tegangan yang terjadi dan tegangan ijin –lelehnya- sebesar 76,12%. Begitu pula pada lapisan inti t_c dan lapisan terdalam t₂, tegangan terbesar terjadi pada *Step* 2. Walaupun begitu semua lapisan belum mencapai batas lelehnya sehingga dari segi tegangan penampang, model A1 memenuhi persyaratan.

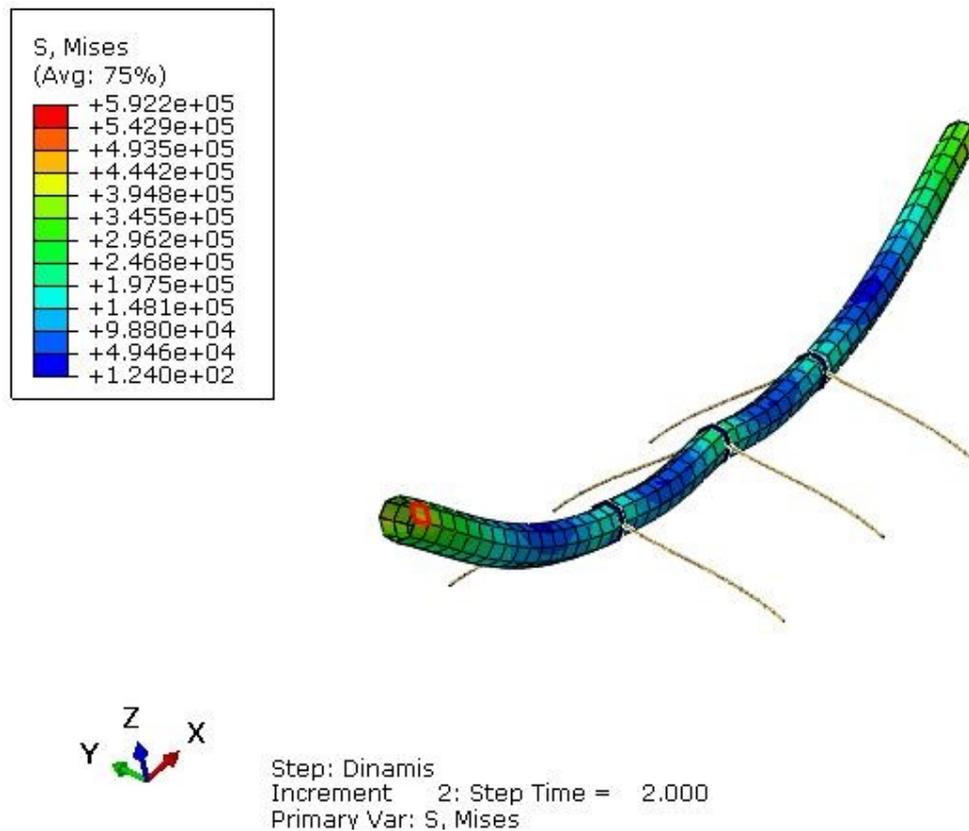


Gambar 5.18 *Displacement* Penampang dan Tegangan Pada Kabel Model A1

Gambar 5.18 memperlihatkan *displacement* penampang dan tegangan yang terjadi pada kabel dengan Model A1. Dari gambar tersebut terlihat bahwa *displacement* terbesar pada penampang dengan Model A1 terjadi pada *step* 2 dengan besar 140 mm dan masih dibawah batas ijin sebesar 187,5 mm. Rasio antara *displacement* yang terjadi dan batas yang diijinkan pada masing-masing *step* adalah 65,92%, 74,67%, 67,79%, 73,07% dan 69,23%. Tegangan yang terjadi pada kabel Model A1 ini identik dengan *displacement* pada penampang. Besarnya tegangan yang terjadi pun masih dibawah batas lelehnya sebesar 1675 MPa.

Gambar 5.19 adalah gambar *output* tegangan pada Model A1 dalam bentuk spektrum warna. Berdasarkan spektrum warna dari tegangan, warna

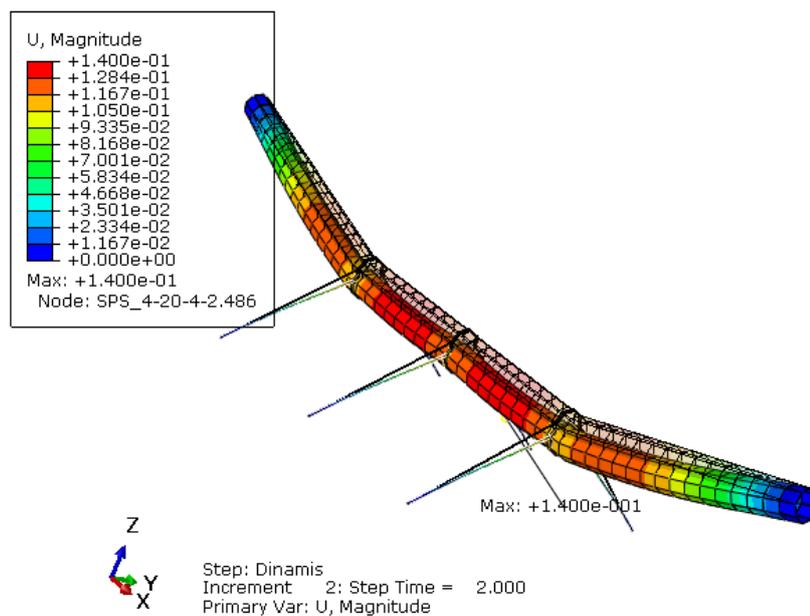
merah adalah nilai maksimum dan hingga biru dengan nilai minimum (lihat gambar dan keterangannya). Pada Model A1 ini, tegangan terbesar terjadi pada *Step 2* pada elemen 417. Dimana elemen 417 ini adalah bagian terluar dari SPS (t_1) dengan besar 312,110 MPa. Kemudian pada dibawah lapisan t_1 terdapat lapisan inti (t_c) dan lapisan dalam (t_2). Pada posisi yang sama, besarnya t_c adalah 1,247 MPa pada elemen 833 dan t_2 sebesar 305,814 MPa pada elemen 208. Pemilihan elemen 417 ini berdasarkan spektrum warna tegangan yang terjadi pada SFT, terlihat pada gambar di bawah elemen 417 (kotak merah) memiliki warna agak kekuningan.



Gambar 5.19 *Output* Tegangan S Model A1

Gambar 5.20 di bawah adalah *output* dari *displacement* yang ditampilkan dalam bentuk spektrum warna. Seperti halnya tegangan (S), pemilihan *node displacement* (U) pada Model A1 ini berdasarkan spektrum warna akibat *displacement*, dimana warna merah menunjukkan daerah yang

paling besar *displacementnya* hingga berwarna biru yang memiliki nilai terkecil (Gambar 5.16). *Displacement* terbesar terjadi pada *Step* 2, dimana besarnya *displacement* pada *Step* ini adalah 140 mm –nilai pada Gambar 5.20 sebesar 0,140 karena dalam satuan m- pada node 486. Pada gambar terlihat warna spektrum yang terang adalah *displacmient* pada SFT akibat beban sedangkan warna redup merupakan bentuk SFT sebelum mendapat beban apapun.



Gambar 5.20 *Output Displacement* Model A1

5.7. Interpretasi *Output* Model A2

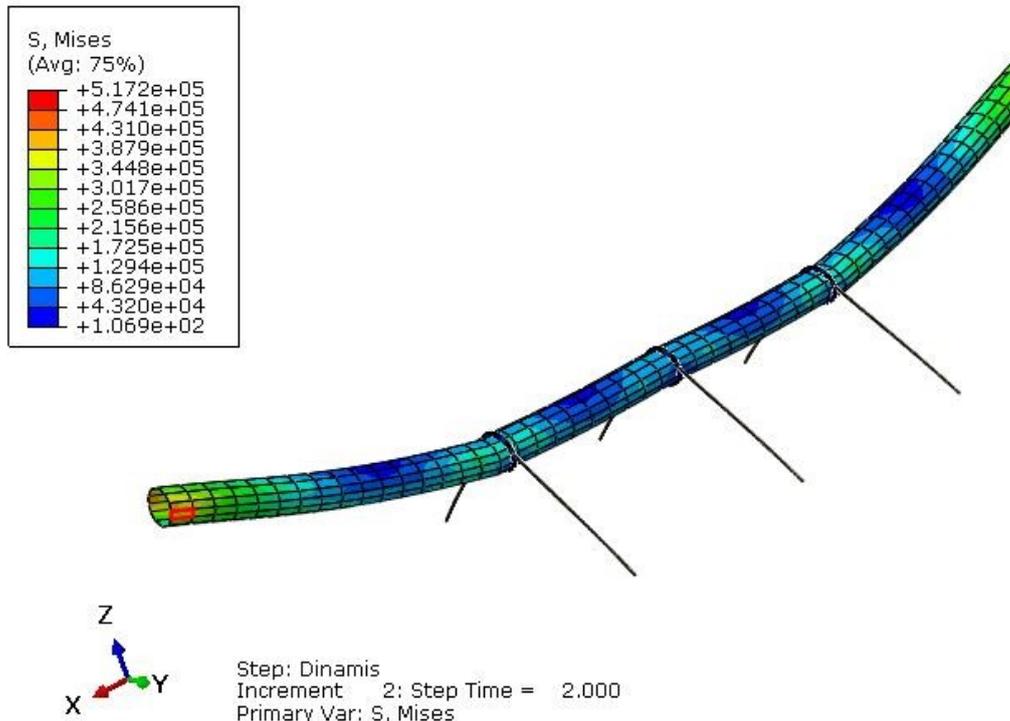
Untuk Model A2 dengan bentuk oval dengan beban dalam kondisi normal -perencanaan, hasil yang diperoleh dari *output* dari *Abaqus* dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut:

Tabel 5.2 Tegangan Penampang dan Kabel Model A2

| <i>Step</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Ijin |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| S_{t1} (MPa) | 359,17 | 391,98 | 366,13 | 385,77 | 371,55 | 410 |
| Rasio (%) | 87,60 | 95,61 | 89,30 | 94,09 | 90,62 | 100 |
| S_{tc} (MPa) | 1,39 | 1,52 | 1,42 | 1,49 | 1,44 | 16 |
| Rasio (%) | 8,69 | 9,49 | 8,86 | 9,34 | 8,99 | 100 |

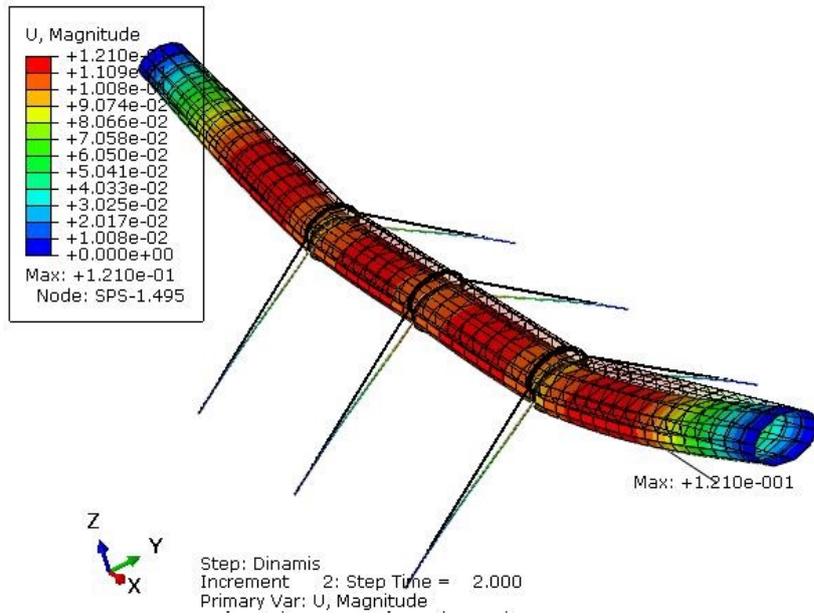
| | | | | | | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| S _{t2} (MPa) | 363,89 | 397,17 | 370,96 | 390,87 | 376,45 | 410 |
| Rasio (%) | 88,75 | 96,87 | 90,48 | 95,33 | 91,82 | 100 |
| | | | | | | |
| S _{kabel} (MPa) | 421,90 | 517,20 | 440,00 | 500,70 | 455,00 | 1675 |
| Rasio (%) | 25,19 | 30,88 | 26,27 | 29,89 | 27,16 | 100 |

Tabel 5.2 adalah *output* dari tegangan pada penampang dan kabel. Tegangan yang terjadi pada Model A2 ini juga memiliki nilai terbesar pada *Step* 2 dimana posisi dari elemen dengan tegangan terbesar ini terjadi pada daerah perletakan ujung, yaitu pada elemen 1093 (t_1), elemen 469 (t_c) dan elemen 1768 (t_2). Dari *Step* 1 hingga *Step* 5, semua tegangan pada penampang masih di bawah batas yang diijinkan, yaitu 410 MPa pada t_1 dan t_2 serta 16 MPa pada t_c . Rasio antara tegangan yang terjadi dan tegangan ijin pada Model A2 ini hampir mendekati 100% -batas ijinnya. Dimana rasio terbesar terjadi pada *Step* 2 dengan besar 95% untuk t_1 , 9,5% untuk t_c dan 96% untuk t_2 . Besarnya tegangan pada model A2 ini akibat dari besarnya ukuran penampang dibanding penampang model A1, sehingga gaya/tekanan gelombang yang terjadi juga semakin besar. Sementara tegangan yang terjadi pada kabel juga terjadi pada *Step* 2 dengan rasio 30,88% dari kapasitas ijinnya. Berdasarkan tegangan pada kabel, Model A2 masih dalam kategori aman sementara berdasarkan tegangan pada penampang, model A2 ini juga masih dalam batas aman namun kurang baik mengingat rasio yang cukup besar hingga 96%. Solusi untuk model bentuk oval ini adalah dengan menambah ketebalan SPS terutama pada t_1 dan t_2 sehingga tegangan yang terjadi pada penampang tidak sebesar saat ini.

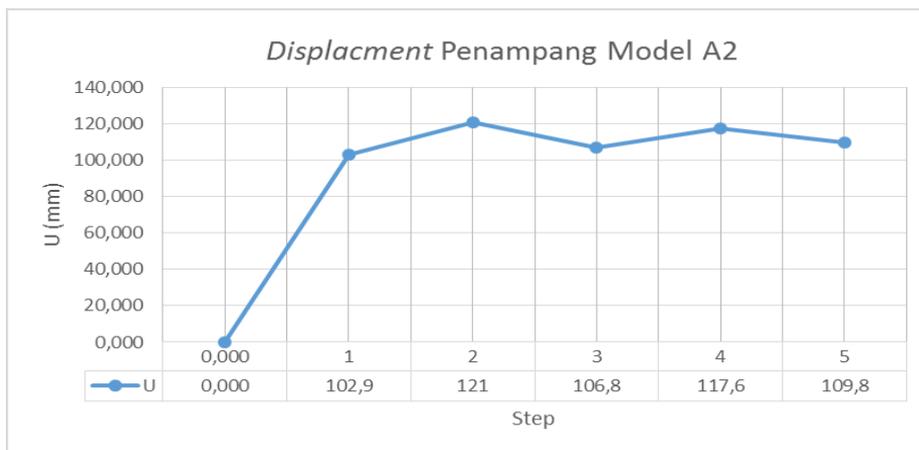


Gambar 5.21 Tegangan S Model A2

Pada Tabel 5.2 di atas, tegangan pada penampang terjadi pada masing-masing *Step* berada pada elemen 1093 (t_1), 469 (t_c) dan 1768 (t_2). Sedangkan pada Gambar 5.18 di atas menunjukkan posisi dari elemen-elemen tersebut, dimana bagian yang berwarna kuning terjadi pada daerah perletakan ujung yang ditandai dengan kotak merah. Sedangkan pada keterangan spektrum terlihat warna merah memiliki besar $5,172e+5$. Nilai tersebut terletak pada kabel sebagaimana terlihat pada tabel, adapun satuan pada permodelan adalah dalam kPa, sehingga bila dikonversi 512720 kPa menjadi $517,20$ MPa.



Gambar 5.22 Spektrum *Displacement* Model A2



Gambar 5.23 *Displacement* Penampang Model A2

Pada Gambar 5.22 dimana memperlihatkan *displacement* pada penampang dalam bentuk spektrum warna, terlihat bahwa daerah yang berwarna merah -dimana pada daerah ini merupakan *displacement* yang terbesar- terjadi pada daerah sisi datar dan sisi miring. Namun *displacement* terbesar pada penampang SFT dengan Model A2 ini terletak pada bagian badan SFT sisi miring yang terjadi pada *Step* 2 di node 495 dengan besar 121 mm. Rasio antara yang terjadi terhadap *displacement* ijin 187,5 mm pada masing-masing step adalah 54,88%, 64,53%, 56,96%, 62,72% dan 58,56%. Rasio dari yang terbesar

hingga terkercil terjadi pada *Step 2* (64,53%), *Step 4* (62,72%), *Step 5* (58,56%), *Step 3* (56,96%) dan *Step 1* (54,88%). Bentuk *displacement* pada Model A2 ini juga identik dengan *displacement* pada Model A1.

5.8. Interpretasi *Output Model B1*

Model B1 pada prinsipnya adalah model A1 yang diberikan beban *displacement* pada sisi datar sebesar 500 mm –melebihi batas yang diijinkan sebesar 187,5 mm. Pemberian beban *displacement* ini untuk memperlihatkan pengaruh *displacement* terhadap tegangan yang terjadi pada SFT. Pada Model B1 ini, tegangan yang terjadi akan dikomparasikan dengan *displacementnya*. Titik/node yang diberi beban *displacement* dikomparasi dengan tegangan yang terjadi dalam node yang sama sehingga benar-benar memperlihatkan hubungan *displacement* dan tegangan. Node yang diberi beban *displacement* adalah node 1379 pada elemen 499, sehingga komparasi akan dilakukan pada node 1379 dengan element 499 untuk t_1 , elemen 915 untuk t_c , 216 untuk t_2 .

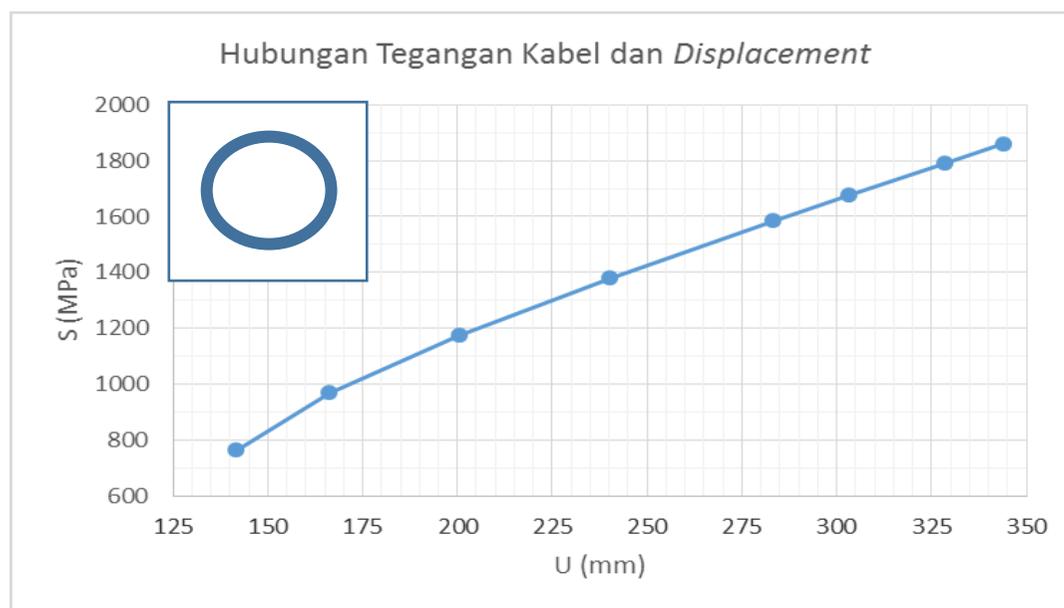
Pada Gambar 5.24 di bawah terlihat bahwa dengan *displacement* sebesar 181,83 mm tegangan pada t_1 telah mencapai batas ijinnya 410 MPa dan mencapai batas putusnya dengan tegangan 550 MPa pada *displacement* 215 mm. Sedangkan pada t_c hingga pada Step 10 masih sangat jauh dari batas ijinnya 16 MPa, sementara pada t_2 batas ijin 410 MPa terjadi pada *displacement* 182,15 mm. Dengan meningkatkan *displacement* maka akan terjadi kegagalan putus pada penampang t_2 yang terjadi pada *displacement* 218 mm. Peningkatan *displacement* hingga 500 mm tentu sudah tidak berguna mengingat pada *displacement* 218 mm telah terjadi kegagalan pada penampang t_1 dan t_2 .

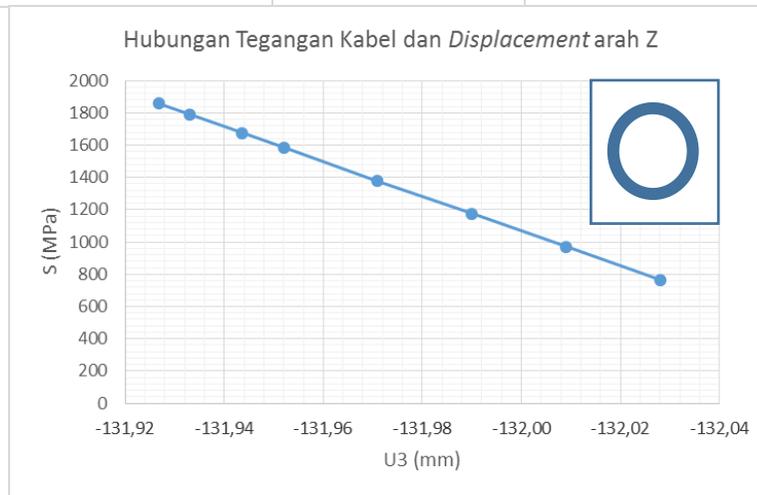
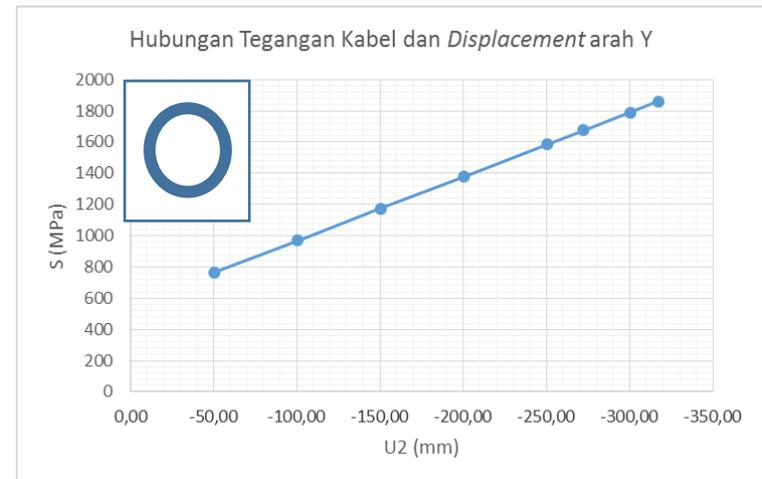
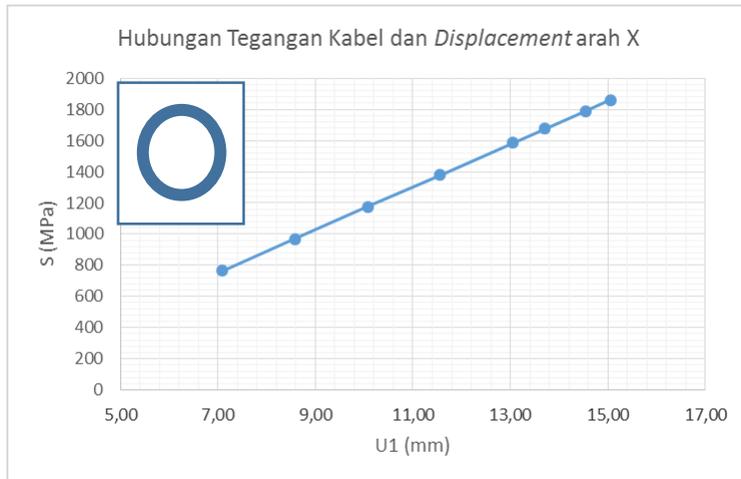


Gambar 5.24 Tegangan Penampang dan *Displacement* Model B1

Tabel 5.3 *Output* Tegangan Kabel Hingga Putus dan *Displacement*

| | | | | | | | | |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| S kabel (MPa) | 764,4 | 969,2 | 1174 | 1379 | 1585 | 1675 | 1790 | 1860 |
| U (mm) | 141,57 | 166,16 | 200,41 | 240,23 | 283,28 | 303,05 | 328,30 | 344,02 |
| U1 (mm) | 7,09 | 8,58 | 10,07 | 11,56 | 13,05 | 13,71 | 14,55 | 15,05 |
| U2 (mm) | -50,61 | -100,54 | -150,47 | -200,40 | -250,34 | -272,26 | -300,27 | -317,24 |
| U3 (mm) | -132,03 | -132,01 | -131,99 | -131,97 | -131,95 | -131,94 | -131,93 | -131,93 |





Gambar 5.25 Gambar Hubungan Tegangan Kabel dan *Displacement*

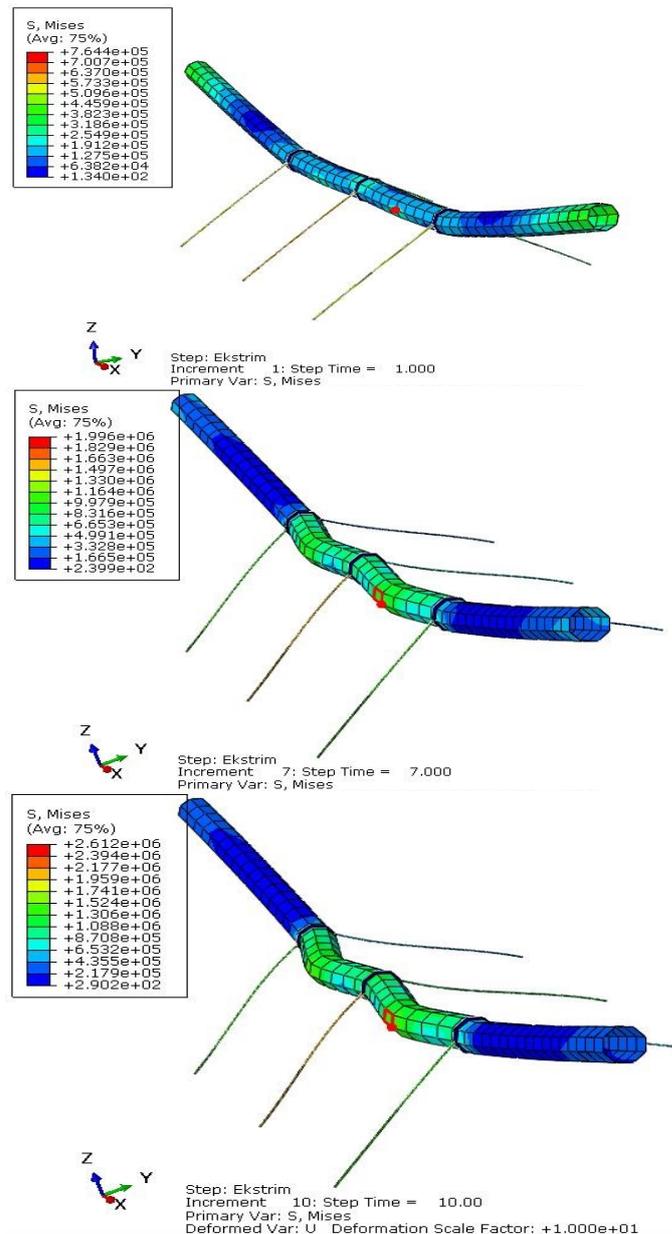
Tabel 5.3 dan Gambar 5.25 memperlihatkan hubungan antara *displacement* dan tegangan pada kabel sampai mencapai titik putusnya. Dari hubungan antara tegangan kabel dan *displacement* terlihat bahwa leleh kabel sebesar 1675 MPa terjadi pada *displacement* 303,05 mm (pada tabel teks warna hijau). Dengan peningkatan *displacement* maka kabel akhirnya mengalami kegagalan –tegangan putus- sebesar 1860 MPa pada *displacement* 344,02 MPa (pada tabel teks warna merah). Walaupun beban *displacement* diberikan hingga 500 mm, namun telah terjadi kegagalan sebelum batas tersebut. *Displacement* pada gambar tersebut berada pada node yang sama dengan node pada penampang, yaitu node 1379.

Hubungan tegangan kabel dan *displacement* dengan arah x, searah memanjang dari SFT leleh pada kabel terjadi pada *displacement* 13,71 mm dan mencapai tegangan putus pada *displacement* 15,05 mm. Sedangkan pada hubungan antara tegangan kabel dan *displacement* dengan arah y –searah beban *displacement*, terjadi perlelehan pada kabel dengan *displacement* -272,26 mm dan tegangan putus terjadi pada *displacement* -317,24 mm. Pada *displacement* arah y ini sebenarnya telah melewati batas yang diijinkan terhadap *displacement* maksimal sebesar 187,5 mm sementara pada *displacement* arah x dan z belum mencapai batas yang diijinkan walaupun telah mencapai batas lelehnya.

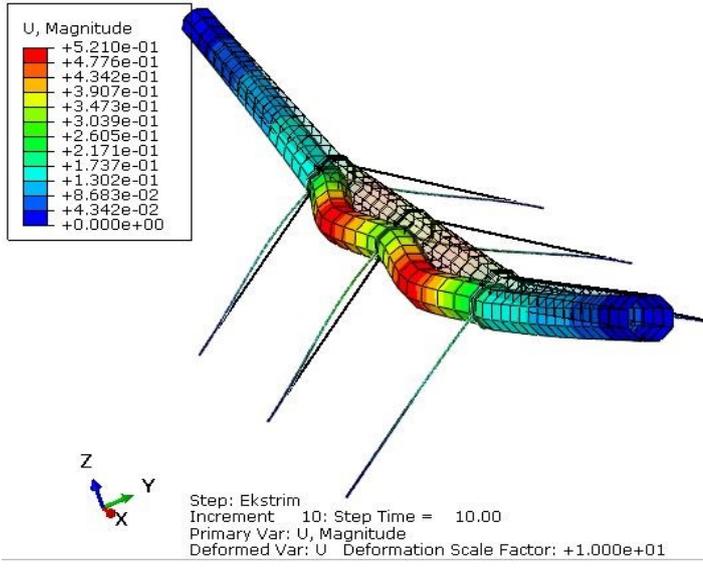
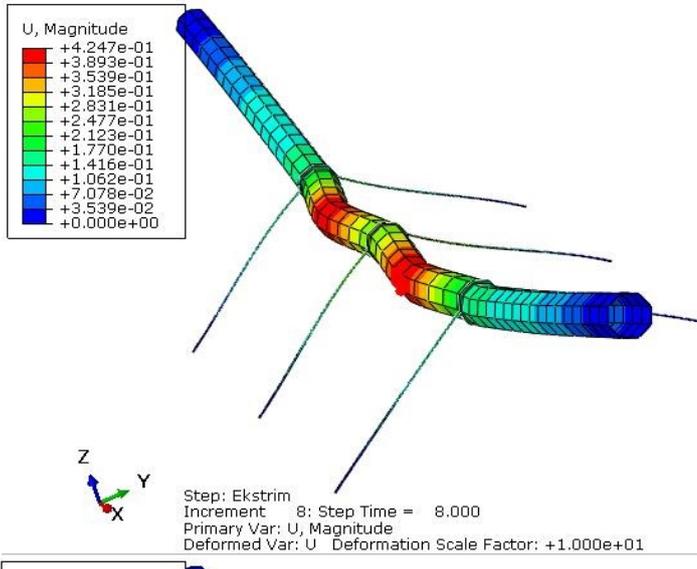
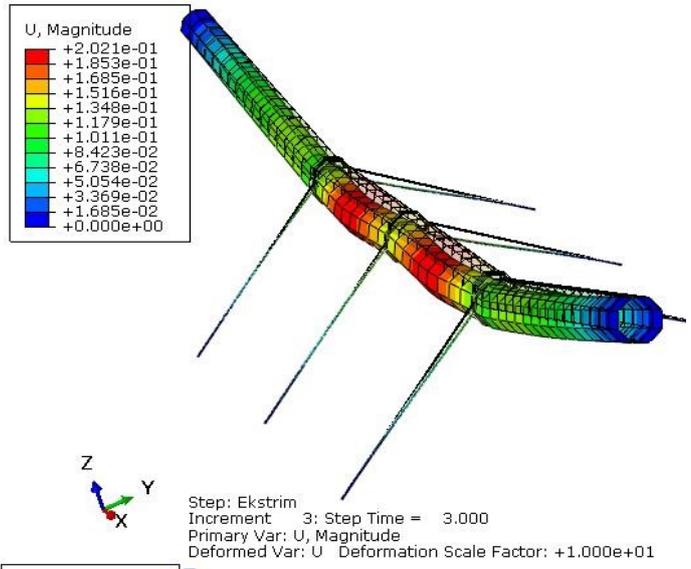
Pada hubungan antara tegangan kabel dan *displacement* arah z (U3) terlihat bahwa semakin besar tegangan yang terjadi maka semakin kecil *displacement*nya. Hal ini diakibatkan gaya *displacement* yang searah sumbu y negatif mengakibatkan penampang mengalami pergerakan ke arah atas –semakin kecil menuju nol. Namun dengan terus meningkatkan *displacement* hingga 500 mm pun pada arah z ini belum mencapai *displacement* sama dengan nol.

Displacement yang ditinjau pada Model B1 ini berada pada node 1379 yang terletak pada sisi datar dari SFT, dimana pada Gambar 5.26 node ini diperlihatkan dengan titik merah pada penampang. Sedangkan elemen yang menjadi tinjauan adalah elemen 499, elemen ini ditunjukkan pada Gambar 5.26 dengan kotak merah. Pada *Step* 1, tegangan terbesar terjadi pada daerah perletakan ujung yang diperlihatkan pada gambar dengan warna hijau. Sementara pada elemen ini berwarna biru muda yang artinya tegangan pada elemen ini cukup kecil

bila dibandingkan pada daerah perletakan. Seiring pertambahan *displacement* pada node 1379, elemen 499 ini berubah warna menjadi hijau dan daerah perletakan menjadi biru. Hingga *Step* 10 dimana pada node 1379 ini *displacement* pada arah sumbu sebesar 500 mm, tegangan maksimum pada elemen 499 sebesar 1583 MPa pada t_1 , 6 MPa pada t_c dan 1552 MPa pada t_2 . Tentu saja pada kondisi ini penampang telah mengalami kegagalan karena melebihi tegangan putusnya yang hanya sebesar 550 MPa.



Gambar 5.26 Tegangan Pada SFT Model B1



Gambar 5.27 Displacement Model B1

Gambar 5.26 dan Gambar 5.27 memperlihatkan spektrum warna dari tegangan dan *displacement* dimana warna merah adalah nilai terbesar dan warna biru adalah nilai terkecil. Spektrum warna dari *displacement* yang terjadi pada *Step* 1 hingga *Step* 3 terlihat bahwa *displacement* pada sisi miring berwarna hijau sementara pada sisi datar berwarna merah. Hal ini menunjukkan *displacement* yang terjadi pada sisi miring masih belum bergerak terlalu jauh, mendekati *displacement* pada sisi datar. Sementara pada *Step* 4 hingga *Step* 10 perbedaan *displacement* pada sisi miring dan sisi datar ini sangat jelas terlihat perbedaannya, dimana warna dari sisi miring berwarna dominan biru dan pada sisi datar berwarna merah. Begitu pula bentuk dari SFT ini telah mengalami perubahan bentuk yang cukup signifikan dari kondisi aslinya, pada gambar bentuk SFT dengan warna agak redup merupakan kondisi asli dan bentuk SFT dengan warna terang kondisi setelah mengalami *displacement* hingga 500 mm.

5.9. Interpretasi *Output Model B2*

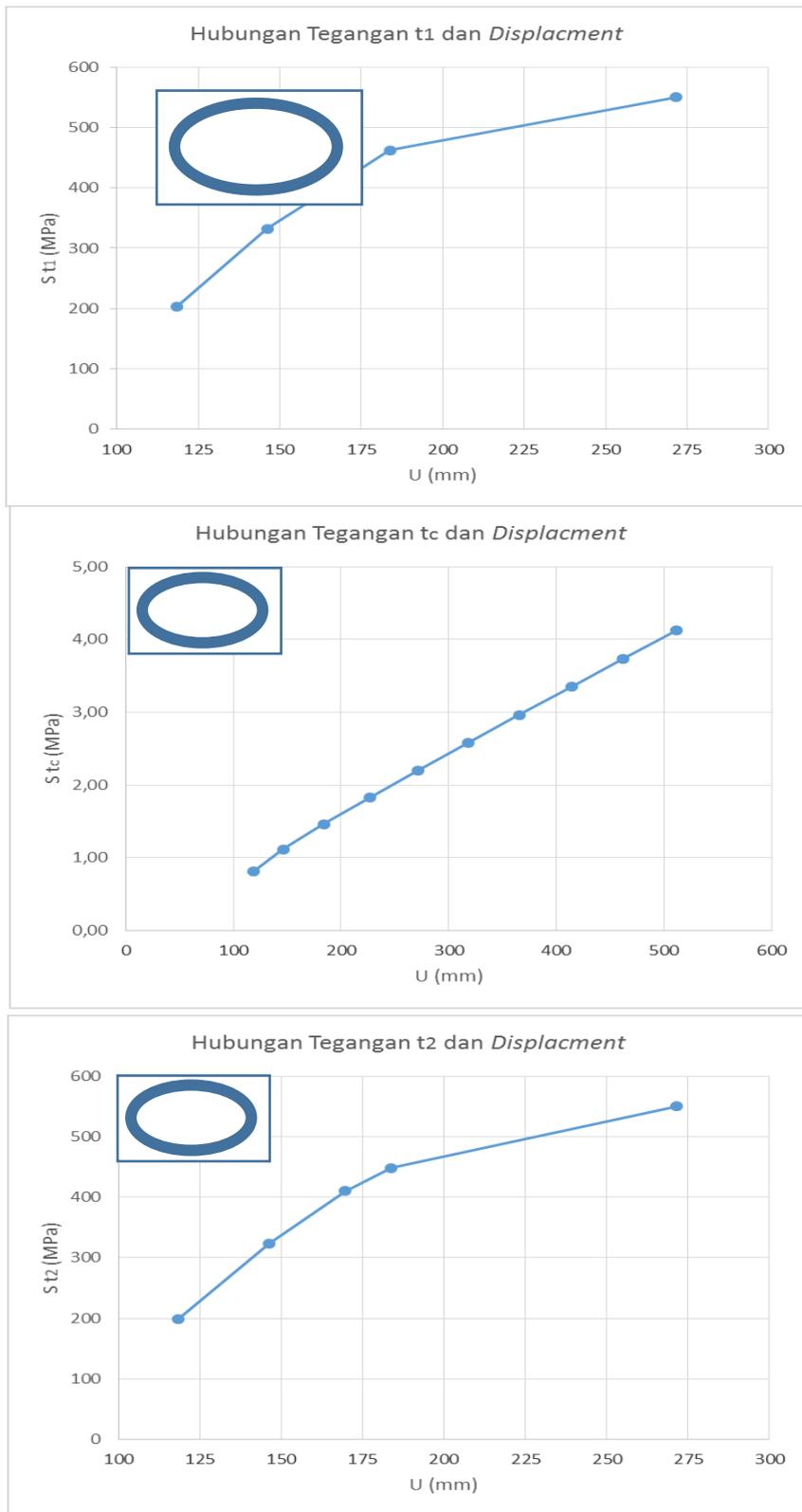
Tidak berbeda dengan Model B1, Model B2 merupakan Model A2 yang diberikan beban *displacement* searah sumbu y sebesar 500 mm. Node untuk *displacement* yang menjadi acuan pada Model B2 ini adalah node 1607 yang terletak pada elemen 749. Berdasarkan node dan elemen ini, didapatkan tegangan yang terjadi pada t_1 , t_c dan t_2 dari *Step* 1 hingga *Step* 10 adalah sebagaimana ditampilkan pada Tabel 5.4.

Berdasarkan Tabel 5.4 Tegangan Penampang Model B2 di atas terlihat bahwa pada *Step* 2 tegangan pada t_1 dan t_2 telah melebihi batas yang ijinnya sebesar 410 MPa (berwarna merah). Sementara pada t_c hingga *Step* 10 belum mencapai batas yang diijinkan, bahkan hanya 26% saja dari batas ijinnya sebesar 16 MPa. Adapun rasio pada tabel di atas adalah rasio antara tegangan yang terjadi berbanding tegangan ijinnya. Tegangan penampang ini bila dikorelasikan dengan *displacement* yang terjadi maka akan memudahkan dalam menentukan pada *displacement* berapa tegangan ini melebihi batas yang diijinkan.

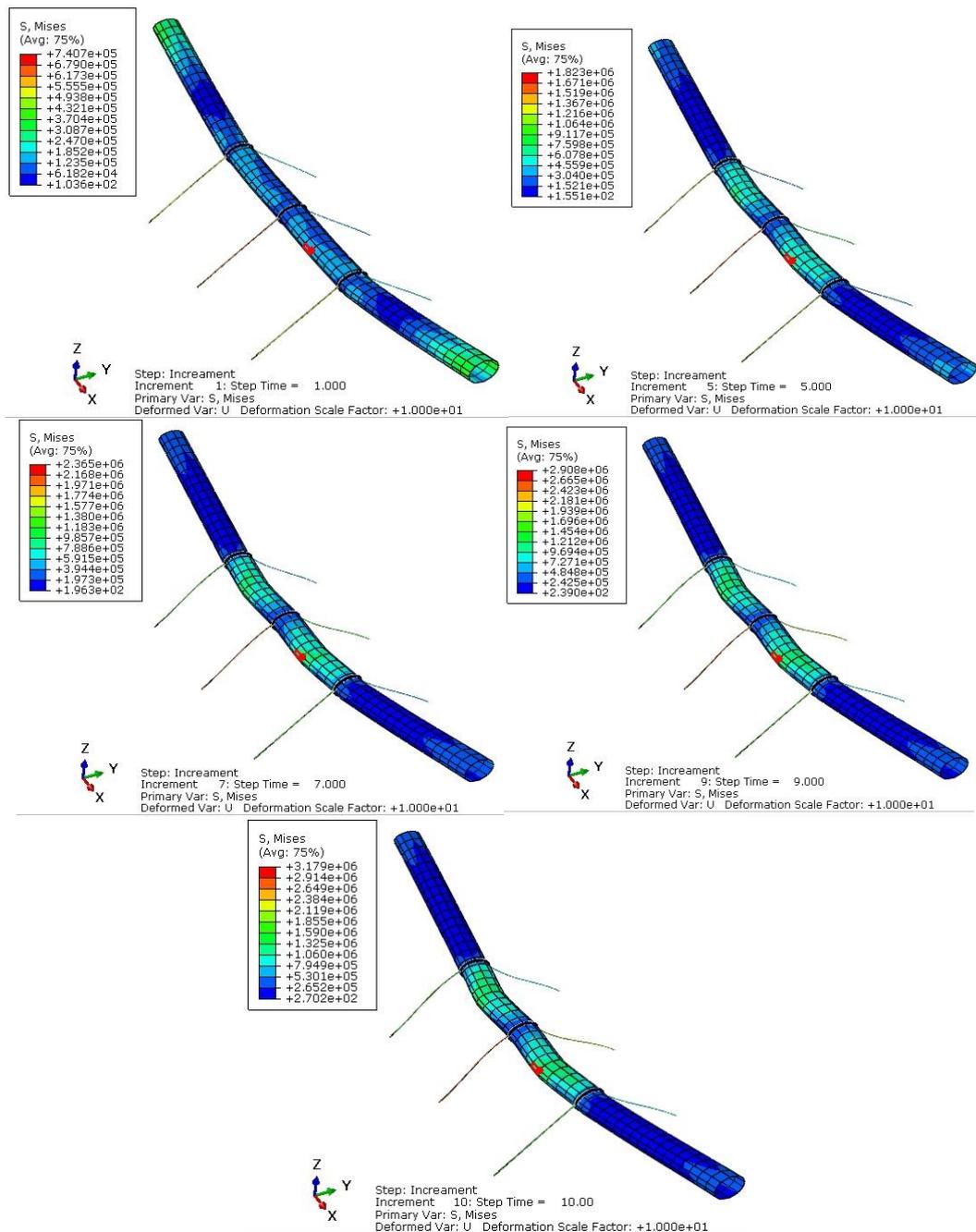
Tabel 5.4 Tegangan Penampang Model B2

| <i>Step</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | Ijin |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| S t ₁ (MPa) | 203 | 332 | 462 | 592 | 723 | 853 | 984 | 1115 | 1245 | 1376 | 410 |
| Rasio (%) | 50 | 81 | 113 | 144 | 176 | 208 | 240 | 272 | 304 | 336 | 100 |
| S t _c (MPa) | 0,81 | 1,11 | 1,46 | 1,83 | 2,20 | 2,58 | 2,96 | 3,35 | 3,74 | 4,12 | 16 |
| Rasio (%) | 5 | 7 | 9 | 11 | 14 | 16 | 19 | 21 | 23 | 26 | 100 |
| S t ₂ (MPa) | 199 | 323 | 449 | 574 | 700 | 826 | 952 | 1078 | 1204 | 1330 | 410 |
| Rasio (%) | 49 | 79 | 109 | 140 | 171 | 201 | 232 | 263 | 294 | 324 | 100 |

Pada Gambar 5.28 memperlihatkan hubungan antara tegangan t_1 , t_c , t_2 dan *displacement*. Sebagaimana telah dijelaskan di atas bahwa *displacement* yang menjadi tinjau berada pada node 1607 yang terletak pada sisi datar SFT. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa dengan batas ijin untuk t_1 terjadi pada *displacement* 168,80 mm. Peningkatan *displacement* secara berangsur-angsur meningkatkan pula tegangan yang terjadi. Sementara tegangan ijin sebesar 410 MPa pada t_2 terjadi pada *displacement* 169,65 mm. Peningkatan *displacement* semakin meningkatkan tegangan yang terjadi, baik pada t_1 , t_c dan t_2 . Walaupun *displacement* maksimum diberikan sebesar 500 mm pada Step 10, namun leleh terjadi pada Step 3 untuk lapisan t_1 dan t_2 . Sementara tegangan putus terjadi pada Step 4 untuk lapisan t_1 dan t_2 dengan *displacement* yang berdekatan yaitu pada *displacement* 215 mm untuk t_1 dan 218 mm untuk t_2 . Sementara pada t_c tidak/belum mencapai batas ijinnya hingga *displacement* maksimum sebesar 551 mm pada Step 10.



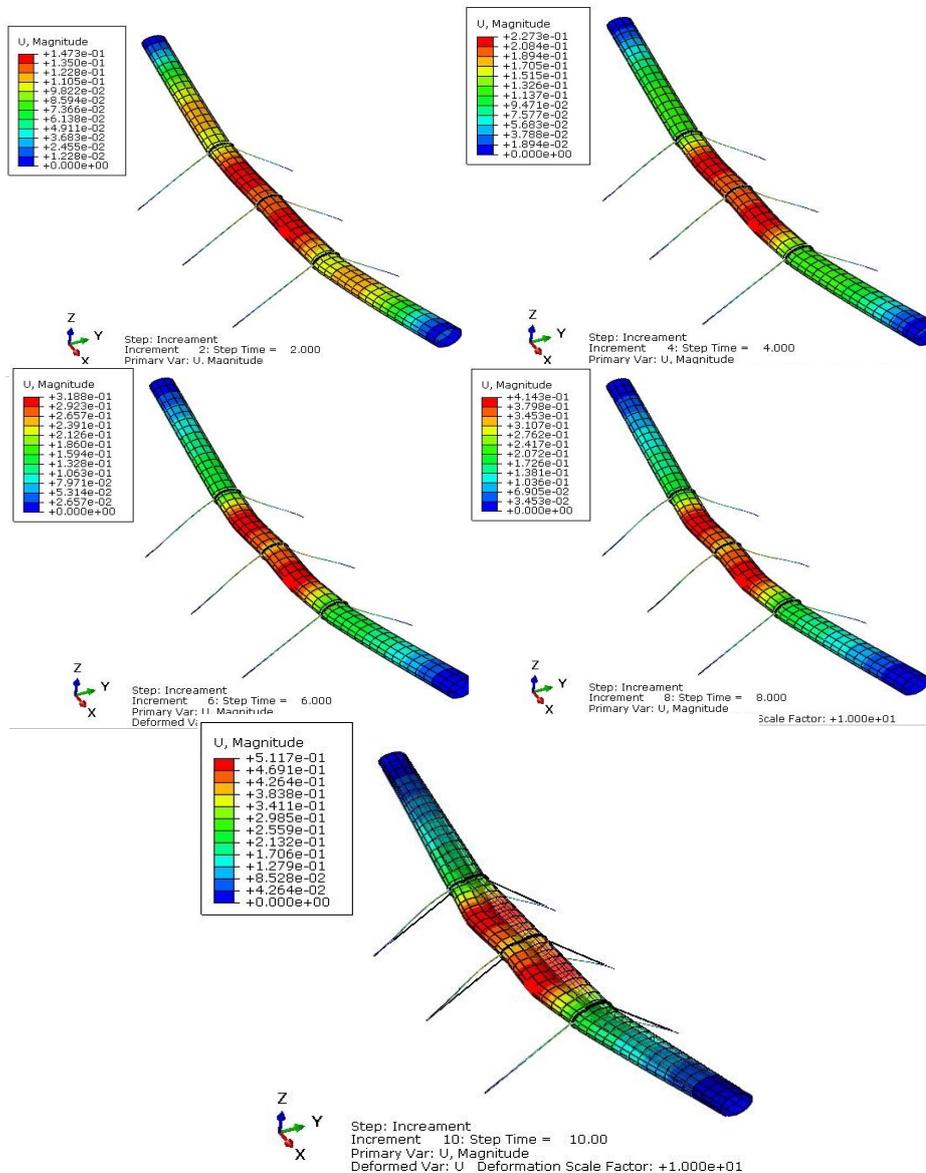
Gambar 5.28 Hubungan Tegangan Penampang dan *Displacement* Model B2



Gambar 5.29 Tegangan Pada Penampang Model B2

Gambar 5.29 Tegangan pada penampang Model B2 di atas merupakan spektrum tegangan yang terjadi pada Model B2 dimana berdasarkan warna, urutan terbesar hingga terkecil adalah merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila dan biru – seperti urutan warna pelangi. Pada gambar di atas terlihat ada kotak dan titik berwarna merah pada penampang, kotak tersebut merupakan elemen yang ditinjau

yaitu elemen 749 dan titik tersebut node yang menjadi tinjauan yaitu node 1607. Pada saat *Step* 1 tegangan terbesar terjadi pada daerah perletakan ujung. Pada *Step* 1 ini tegangan pada elemen yang ditinjau sekitar 200an MPa (warna nila), sementara pada daerah perletakan ujung tegangan yang terjadi sekitar 400an MPa (warna hijau) –nilai pasti dapat dilihat pada tabel. Pada *Step* 3 hingga *Step* 10 barulah perubahan cukup signifikan terlihat, dimana tegangan pada elemen yang ditinjau berwarna hijau sementara pada sisi miring dan daerah perletakan ujung warna dari tegangan adalah warna biru.



Gambar 5.30 *Displacement Model B2*

Gambar 5.30 di atas memperlihatkan *displacement* yang terjadi pada Model B2. Pada Model B2 ini tidak jauh berbeda dengan Model B1 karena *displacement* yang diberikan sama yaitu 500 mm. Pada *Step 1* dan *Step 2*, spektrum warna dari *displacement* ini lebih bervariasi karena *displacement* yang terjadi masih sangat kecil. Pada *Step 1* dan *Step 2* ini sisi datar didominasi warna merah yang artinya pada daerah ini *displacement* yang terjadi paling besar, sementara pada sisi miring *displacement* berwarna jingga, kuning, hijau dan biru. Pada *Step 3* hingga *Step 10* warna dari *displacement* agak identik antara step satu dengan lainnya. Hal ini akibat *displacement* yang terjadi cukup besar bila dibandingkan pada sisi datar. Pada *Step 3* inilah tegangan pada penampang telah melewati batas ijinnya –leleh dan melewati tegangan putus pada *Step 4*.

5.10. Perbandingan Model A1, Model A2, Model C1 dan Model C2

Sebagaimana telah diungkapkan pada Bab 3 bahwa, hasil dari permodelan A1 dan A2 akan dibandingkan dengan hasil dari penelitian Indrawan dalam hal ini Model C1 dan C2 (lihat Tabel 3.5). Sejatinya, permodelan yang paling layak untuk dibandingkan adalah Model A1 dan C1 karena memiliki konfigurasi yang sama persis, namun yang membedakan hanya materialnya saja. Bila pada penelitian ini (A1) menggunakan SPS, maka model C1 menggunakan baja dengan ketebalan 27 mm. Berikut ini tabel S11, S22, S12 dan U dari model A1, A2, C1 dan C2.

Tabel 5.5 Perbandingan Model A1 dan Model C1

| Model | S11 (MPa) | S22 (MPa) | S12 (MPa) | U (mm) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| A1 | 250,701 | 76,694 | -83,974 | 140,000 |
| C1 | 247,100 | 249,240 | 70,880 | 22,400 |
| Rasio (%) | 101,457 | 30,771 | 118,473 | 625,000 |

Tabel 5.6 Perbandingan Model A2 dan Model C2

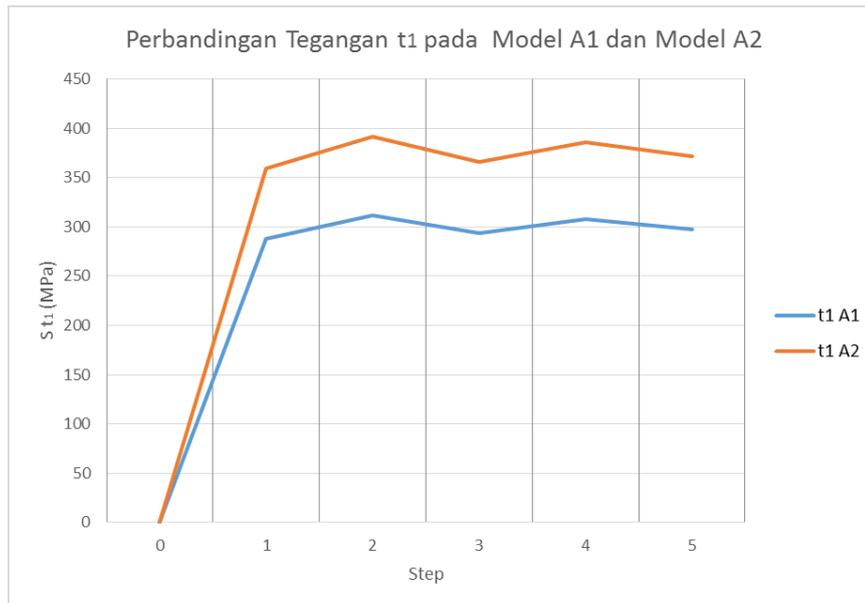
| Model | S11 (MPa) | S22 (MPa) | S12 (MPa) | U (mm) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| A2 | 397,174 | 1,217 | 66,349 | 121,000 |
| C2 | 79,650 | 219,150 | 56,720 | 28,000 |
| Rasio (%) | 498,649 | 0,555 | 116,976 | 432,143 |

Pada Tabel 5.5. dan Tabel 5.6. di atas, tegangan pada Model A1 dan Model A2 yang ditampilkan adalah tegangan lapisan terluar t_1 dari SPS dengan material baja yang memiliki ketebalan 4 mm. Pada Tabel 5.5. terlihat bahwa Model C1 memiliki tegangan S11 yang lebih kecil bila dibandingkan dengan Model A1. Namun tegangan yang terjadi pada S22 memiliki selisih yang sangat jauh, dimana rasio pada Model A1 dan Model C1 sebesar 30,77% atau sebesar 76,69 MPa pada Model A1 sementara pada Model C1 sebesar 249,24 MPa. Rasio pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6 adalah perbandingan antara model A (SPS) terhadap model C (Baja saja). Bila dibandingkan pada tegangan geser S12, Model A1 dan Model C1 tidak memiliki selisih yang jauh namun berbeda arah tegangan. Namun dari tinjauan *displcaement*, maka Model C1 sangat kecil bila dibandingkan dengan Model A1, yang mana U pada Model A1 mempunyai rasio 625% dari *displacement* Model C1. Walaupun begitu, nilai U pada Model A1 ini masih di bawah batas yang diijinkan. Besarnya *displacement* ini diakibatkan ketebalan dari t_1 yang hanya sebesar 4 mm saja, sementara pada Model C1 sebesar 27 mm.

Sementara pada Tabel 5.6 tegangan S11 pada Model A2 adalah 397,174 MPa sementara pada Model C2 hanya sebesar 79,65 MPa. Bila dibandingkan S11 pada Model C2, maka Model A2 memiliki rasio sebesar 498% terhadap tegangan S11 pada Model C2. Pada tegangan S22, Model A2 sangat unggul bila dibandingkan Model C2 dengan rasio 0,56%. Sementara pada tegangan S12 Model A2 dan Model C2 tidak memiliki perbedaan yang signifikan dimana pada Model A2 sebesar 66,35 MPa dan pada Model C2 sebesar 56,72 MPa. Bila ditinjau dari *displacement* U, pada Model A1 sebesar 121 mm sementara pada Model C2 sebesar 28 mm saja. Tentu perbandingan pada Model A2 dan Model C2 ini kurang baik mengingat dimensi antara Model A2 dan Model C2 berbeda dimana Model A2 dimensinya lebih kecil dari pada Model C2.

Tabel 5.7 Perbandingan Model A1 dan Model A2

| Model | S11 (MPa) | S22 (MPa) | S33 (MPa) | U (mm) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| A1 | 250,701 | 76,694 | 65,706 | 140,000 |
| Rasio (%) | 61,147 | 18,706 | 16,026 | 74,667 |
| A2 | 397,174 | 1,217 | 137,998 | 121,000 |
| Rasio (%) | 96,872 | 0,297 | 33,658 | 64,533 |



Gambar 5.31 Perbandingan Tegangan t_1 Model A1 dan Model A2

Tabel 5.7 menunjukkan perbandingan tegangan S11, S22 dan S33 serta U antara Model A1 dan Model A2 dimana nilai tersebut adalah nilai terbesar dari *step* yang ada, yaitu pada elemen 417 pada Model A1 dan elemen 1093 pada Model A2. Dari tabel ini diketahui ternyata S11 pada Model A1 lebih kecil dari pada Model A2, dimana rasio antara S11 ini terhadap tegangan ijinnya (410 MPa) sebesar 61,15% untuk Model A1 dan 96,87% untuk Model A2. Sementara bila dibandingkan dari tegangan S22 maka Model A2 lebih unggul dari pada Model A1 dan pada tegangan S33 maka Model A1 yang lebih baik. Bila dibandingkan dari segi *displacement* U, maka Model A2 lebih baik dari pada Model A1. Bila

diperhatikan maka Model A1 lebih baik dari segi S11 dan S33 sementara pada Model A2 lebih baik dari segi S22 dan U. Seperti telah dijelaskan di atas walau tegangan yang terjadi pada kedua model ini masih dibawah batas yang diijinkan, namun Model A1 yang lebih disarankan mengingat tegangan-tegangan yang terjadi tidak mencapai 95% dari batas ijinnya. Sementara pada Model A2 ada salah satu bagian tegangan yang melebihi 95% dari batas ijinnya.

Gambar 5.31 memperlihatkan perbandingan tegangan yang terjadi pada lapisan terluar (t_1) pada Model A1 dan Model A2. Dari gambar grafik tersebut terlihat bahwa *Step 2* merupakan nilai terbesar dari kedua model. Pada *Step 2* – nilai terbesar, tegangan t_1 pada Model A1 sebesar 312,11 MPa dan pada Model A2 sebesar 391,98 MPa. Selisih tegangan yang terjadi antara Model A1 dan Model A2 pada *Step 2* adalah sebesar 79,87 MPa, dimana Model A2 (bentuk oval) lebih besar. Pada gambar grafik tersebut terlihat Model A1 lebih baik dari pada Model A2 karena tegangan yang terjadi lebih kecil dari pada Model A2. Berdasarkan Tabel 5.7 dan Gambar 5.31 yang memperlihatkan perbandingan tegangan S11, S22, S33, S t_1 dan *displacement* pada Model A1 dan Model A2 dapat disimpulkan bahwa Model A1 lebih baik dari pada Model A2 dan kedua model dalam tahap aman dari segi perencanaan.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Setelah melakukan analisis dan perbandingan SFT dengan SPS dapat disimpulkan bahwa:

1. Permodelan SPS dan beban gelombang pada SFT dilakukan dengan cara:
 - Permodelan menggunakan tipe solid dengan *retrive* dan penggambaran menggunakan tipe *sweep*.
 - Beban hidrodinamis pada SFT dapat diberikan dengan menggunakan bahasa program *AQUA dan *WAVE
2. Perilaku pada permodelan A1 dan A2 dimana beban pada kedua model ini dalam kondisi normal –perencanaan adalah:
 - Kedua model (A1 dan A2) menunjukkan dapat dipergunakan pada perencanaan SFT.
 - Tegangan dan *displacement* yang terjadi permodelan A1 dan A2 memiliki nilai terbesar pada *Step 2* dari *5 Step*.
 - Permodelan A1 memberikan hasil numerik yang lebih baik dari pada permodelan A2 dengan rasio terhadap tegangan ijin sebesar 61,147% pada Model A1 dan 96,872% pada Model A2.
3. Pada permodelan B1 dan B2 (kondisi ekstrim) memperlihatkan bahwa Model B1 lebih baik dari Model B2 dengan *displacement* maksimum 182 mm untuk mencapai batas ijinnya (410 MPa), sementara pada Model B2 batas ijin tercapai pada *displacement* 169 mm.
4. Perbandingan antara SFT dengan bentuk penampang lingkaran dengan material SPS (A1) dan material baja (C1) memperlihatkan dari tegangan S11 dan U lebih baik dengan material baja. Namun, hal ini diakibatkan dari ketebalan penampang baja pada Model C1 sebesar 27 mm dan ketebalan (t_1) pada Model A1 hanya sebesar 4 mm. Perbandingan antara SFT dengan bentuk penampang oval dengan material SPS (A2) dan

material baja (C2) memperlihatkan dari tegangan S11 dan U lebih baik dengan material baja.

6.2. Saran

Pada penelitian ini tentu masih banyak hal yang harus dilakukan sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Adapun saran kami pada penelitian selanjutnya adalah:

1. Menggunakan perbandingan tinggi dan lebar penampang yang lebih bervariasi pada penampang berbentuk oval.
2. Menggunakan ketebalan penampang dengan variasi t_1 , t_c dan t_2 yang lebih banyak.
3. Penggunaan elastomer/*core* pada SPS selain *polyurethane*.

DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- Badan Standarisasi Nasional (2005), *Standar Pembebanan Untuk Jembatan (RSNI T-02 2005)*, Bandung, BSN.
- Brooking, M.A. and Kennedy, S.J. (2004), “The performance, safety and production benefits of SPS structures for double hull tankers”, *Proceedings of the RINA Conference on Double Hull Tankers*, London, UK, pp. 1-2.
- Departemen Pekerjaan Umum . (1987), *Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah dan Gedung (PPPURG 1987)*, Jakarta, Yayasan Badan Penerbit PU.
- Dewobroto, Wiryanto. (2013), *Komputer Rekayasa Struktur dengan SAP 2000*, Jakarta, LuminaPress.
- Directorate General Of Highways Ministry Of Public Works Republic Of Indonesia (1992), *Bridge Management System (BMS)*
- Faggiano, B., Landolfo, R., Mazzolani, F. (2005), “The SFT: an innovative solution for waterway strait crossings”, *Proceedings of the IABSE Symposium “Structures and Ex-treme Events”*, Lisbon, Portugal, LIS 146.
- Faggiano, B., Martire, G., Mazzolani, F. (2010), “Cable Supported Immersed Inverted Bridge: A challenging proposal”, *Procedia Engineering, Volume 4, Pages 283-291*
- Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL) (1996), *Analysis Of The Submerged Floating Tunnel Concept*, Crowthore, Transport Research Laboratory.
- Hakkart, CH., Lancelotti, A., Østlid, H., Marazza, R., Nyhus, K. A., C (1993), “Submerged Floating Tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 8, Issue 2*, Ed. Culverwell, D.R., Pergamon Press Ltd., Great Britain, Pages 265-285
- Indrawan, Reka. (2011) *Studi Penampang Submerged Floating Tunnel*, Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Jakobsen, Bernt. (2010), "Design of the Submerged Floating Tunnel operation under various condition ", *Procedia Engineering, Volume 4*, Pages 71-79
- Kanie, Shunji. (2010), "Feasibility studies on various SFT in Japan and their technological evaluation ", *Procedia Engineering, Volume 4*, Pages 13-20
- Komara, Indra dan Wahyuni, E. (2014), *Studi Konfigurasi Kabel Struktur Submerged Floating Tunnel*, Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Markey, Ian. (2010), "SFT monitoring and design verification", *Procedia Engineering, Volume 4*, Pages 319-323.
- Momcilovic, Nikola dan Motok, Milorad.(2009), "Estimation of Ship Lightweight Reduction be Means of Application of Sandwich Plate System", *FME Transactions 37*, Hal. 123-128, Belgrade, Pages 317-336.
- Østlid, Håvard. (2010), "When is SFT competitive?", *Procedia Engineering, Volume 4*, Pages 3-11.
- Santoso, Agus M., Wahuni, Endah. (2014), *Studi Variasi Buoyancy Water Ratio (BWR) Pada Struktur Submerged Floating Tunnel (SFT)*, Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sholeh, Syayhuddin., Wahyuni, Endah., Raka, IGP. (2013), "Studi Permodelan Struktur Submerged Floating Tunnel", ", *Teknik POMITS*, Vol. 1, No. 1, Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sipata, Fandy., Wahyuni, E., Suswanto, B. (2014), *Studi Permodelan Perletakan Ujung (Shore Connections) Pada Submerged Floating Tunnel (SFT)*, Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Skjlebreia, L., Hendrickson, J. (1960), *Fifth Order Gravity Wave Theory, Proceedings of the 87th Coastal England Conference*, den Haag
- Triatmodjo, Bambang. (2010), *Perencanaan Pelabuhan*, Yogyakarta, Beta Offset Yogyakarta.
- Usofos (2010), *Hydrodynamics: Theory Description of use Verification*
- Wahyudi, Agus., Wahyuni, Endah. (2012), *Studi Konfigurasi Kabel (Submerged Floating Tunnel)*, Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Zang, Keqian., Xiang, Yiqian., Du, Y. (2010), “Research on tubular segment design of submerged floating tunnel”, *Procedia Engineering*, Volume 4, Pages 199-205.

BIOGRAFI PENULIS



Sulung dari tiga bersaudara ini dilahirkan di Tarakan, 25 September 1986. Menamatkan pendidikan dasar di SDN 002 Tarakan (sekarang SD Utama 1 Tarakan) pada tahun 1998. Pendidikan lanjut diselesaikan di SLTP N 1 Nunukan pada tahun 2001 dan di SMU N 1 Nunukan pada tahun 2004. Pada tahun 2012 mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Sipil Universitas Borneo Tarakan (UBT). Sembari kuliah S1 hingga lulus, penulis juga bekerja di CV Bahana Citra Consultant. Sempat menjadi asisten dosen pada di Jurusan Teknik Sipil UBT sehingga memudahkannya untuk memperoleh informasi beasiswa ke jenjang magister hingga mendapatkan beasiswa Pra S2 - 3T di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada tahun 2013 dan dilanjutkan pada beasiswa BPPDN 2014. Tertarik akan permodelan dan bahasa program komputer hingga akhirnya mengantarkannya pada penelitian skripsi dan tesis yang berkaitan dengan permodelan rekayasa. Dibawah bimbingan Miftahul Iman, S.T., M.Eng. beliau menamatkan program Sarjana Tekniknya dan menyelesaikan program magister dengan Bidang Keahlian Teknik Struktur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dibawah bimbingan Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D dan Endah Wahyuni, S.T., M.Sc., Ph.D. Penulis dapat dihubungi melalui telepon dan WA di nomor 081346617568 dan email emailnya.ahmad.hernadi@gmail.com

