



RC142501

# ANALISA KONFIGURASI MOORING SISTEM PADA SUBMERGED FLOATING TUNNEL (SFT)

DITA KAMARUL FITRIYAH  
3114202008

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

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

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh  
Gelar  
Magister Teknik (MT)  
Di  
Institute Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)**

**Oleh :  
Dita Kamarul Fitriyah  
Nrp. 3114202008**

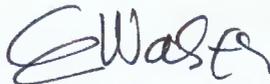
**Tanggal Ujian :  
Periode Wisuda :**

**Disetujui oleh**



**Budi Suswanto ST. MT. Ph.D  
19730128 199802 1 002**

**(Pembimbing I)**



**Endah Wahyuni, S.T. M.Sc. Ph.D  
19700201 199512 2 001**

**(Pembimbing II)**



**Data Iranata, S.T. M.T Ph.D  
19800430 200501 1 002**

**(Penguji)**



**Harun Alrasyid, S.T. M.T. Ph.D  
19830808 200812 1 005**

**(Penguji)**

**an. Direktur Program Pascasarjana  
Asisten Direktur**



**Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng  
19611021 198603 1 009**

# **ANALISA KONFIGURASI MOORING SISTEM PADA SUBMERGED FLOATING TUNNEL (SFT)**

Oleh Dita kamarul Fitriyah  
NRP 3114202008  
Dosen Konsultasi 1. Budi Suswanto, ST, MT.,Ph.D  
2. Endah Wahyuni, ST,M.Sc,Ph.D

## **ABSTRAK**

*Submerged Floating Tunnel (SFT) merupakan sebuah struktur tubular yang terendam dan mengambang di kedalaman tetap melalui sistem angkur yang terdiri dari kabel yang terhubung ke dasar laut. Terowongan secara permanen dikenakan berat sendiri dan dibantu dengan adanya daya apung yang ditimbulkan oleh air, Penampang terowongan didesain sehingga daya apung dapat mengatasi berat badan struktural dan mengalami kekuatan volume yang diarahkan ke atas. Sistem kabel juga memainkan peran yaitu untuk menghambat terowongan, meminimalkan perpindahan dan tegangan yang disebabkan oleh beban lingkungan, seperti beban gempa dan hidrodinamik yang dapat menjadi runtuh dalam kasus penyeberangan laut dengan sistem SFT (Submerged Floating Tunnel ) oleh karena itu, kabel sangat berperan dalam menstabilkan posisi SFT (Submerged Floating Tunnel ). karena itu, maka SFT (Submerged Floating Tunnel ) akan dipasang kabel baja untuk menahan struktur agar tetap kokoh. Sehingga struktur tidak mengalami pergoyangan berlebih akibat beban lingkungan. Kabel dimodelkan dengan berbagai konfigurasi yaitu dengan posisi sudut  $0^0$ ,  $9^0$ ,  $18^0$ ,  $27^0$ ,  $36^0$ ,  $45^0$ ,  $54^0$ ,  $63^0$ , dan  $72^0$ .*

*Dalam pemodelan dengan metode numerik menggunakan software ABAQUS v6.14. dimana pemodelan sesuai dengan data lingkungan pada kepulauan seribu yaitu antara pulau panggang dan pulau karya. Pemodelan yang dibuat dibandingkan*

*dengan penelitian sebelumnya menggunakan software SAP2000. Namun halnya, pada pemodelan dengan ABAQUS menggunakan load yaitu increment displacement yang dimungkinkan sampai elemen mengalami leleh.*

*Hasil analisa elemen menunjukkan bahwa konfigurasi kabel yang efektif yaitu konfigurasi kabel dengan sudut inklinasi sudut  $54^0$ . Pada kondisi ini, tegangan dan perpindahan yang dihasilkan menunjukkan nilai yang relatif kecil dibandingkan dengan konfigurasi kabel yang lain. Tegangan yang terjadi pada sudut inklinasi kabel  $54^0$  yaitu 1625 Mpa. Perpindahan yang terjadi pada sudut inklinasi kabel  $54^0$  yaitu 25mm. Selain itu, terlihat juga pada hasil verifikasi antara ABAQUS dan Sap 2000 menghasilkan nilai yang relatif dekat. Maka dapat disimpulkan ABAQUS dapat digunakan dalam pemodelan elemen apapun yang akan diaplikasikan dalam kehidupan sehari hari.*

**Kata Kunci :** SFT, *Submerged Floating Tunnel*, Kabel, Konfigurasi sudut kabel.

# ANALYSIS MOORING SYSTEM CONFIGURATION OF SUBMERGED FLOATING TUNNEL (SFT)

By Dita kamarul Fitriyah  
NRP 3114202008  
Supervisor 1. Budi Suswanto,S.T, M.T.,Ph.D  
2. Endah Wahyuni,ST,M.Sc,Ph.D

## ABSTRACT

*Submerged Floating Tunnel (SFT) is a tubular structure that is submerged and floated in the certain depths through the system of anchors consisting of a cable connected to the seabed. The tunnels are permanently subjected to its own weight and assisted by the buoyancy caused by the water, a cross-section of the tunnel is designed so that buoyancy can overcome the structural weight and experience the power of volume directed upwards. The cable system also plays a role which is to inhibit the tunnel, minimizing displacement and stress caused by environmental loads, such as earthquake loads and hydrodynamic that can be collapsed in the case of sea crossings with the system SFT (Submerged Floating Tunnel), therefore, the cable was instrumental in stabilizing position SFT (Submerged Floating Tunnel). Therefore, the SFT (Submerged Floating Tunnel) will be installed steel cables to hold the structure in order to remain solid. So that the structure did not experience excessive displacement due to the environmental burden. Cables modeled with various configurations, namely with the position angle of  $54^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $36^{\circ}$ ,  $27^{\circ}$ ,  $18^{\circ}$ ,  $9^{\circ}$  dan  $0^{\circ}$ .*

*In numerical modeling method using ABAQUS v6.14. which according to the environmental data on Kepulauan Seribu, it is between Panggang island and Karya island. The modeling was compared to a previous study using SAP2000. However, the modeling by ABAQUS using load incremental displacement is possible being yield.*

*The results show that the software output cable configuration is effective that the cable configuration at an inclination angle  $54^{\circ}$ . In this condition, the stress and the displacement showed the smallest value compared with other cable configurations. The stress of cable at an inclination angle  $54^{\circ}$  is 1625 Mpa and the displacement is 25 mm. Also the verification results between ABAQUS and Sap 2000 resulted in a relatively close value. It can be concluded ABAQUS can be used in the modeling of any elements that would be applied in their daily lives.*

**Key words:** SFT, *Submerged Floating Tunnel, Cables, Configuration Cables.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas Rahmat dan Limpahan KaruniaNya sehingga tesis yang berjudul Analisa Konfigurasi Mooring Sistem Pada Submerged Floating Tunnel (SFT) dapat terselesaikan tepat pada waktunya.

Tesis ini merupakan prasyarat kelulusan dan untuk memperoleh gelar Magister Teknik bagi mahasiswa S2 Jurusan Teknik Sipil Sub Bidang Struktur Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada :

1. Keluarga besar ayah, ibu, adik adik dan yang lain, yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu , atas setiap untaian doa yang senantiasa mengiringi penyusunan tesis ini.
2. Teman – teman yang ada dibelakang layar, yang *mensupport* dalam menyelesaikan tesis ini, terimakasih atas dukungannya.
3. Dosen konsultasi, Bpk Budi Suswanto dan Ibu Endah Wahyuni atas arahan dan bimbingannya selama proses penyusunan tesis ini.
4. Seluruh pihak yang telah membantu dalam penyusunan tesis ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam tesis ini, untuk itu saran dan masukan yang membangun sangat kami apresiasi untuk kemajuan dan perbaikan karya ini di masa mendatang.

Akhirnya, semoga tesis ini dapat bermanfaat demi penyusunan karya lain di masa mendatang.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

Halaman Judul	
Lembar Pengesahan .....	i
Abstrak .....	ii
Kata Pengantar .....	vi
Daftar Isi .....	vii
Daftar Tabel .....	ix
Daftar Gambar .....	x
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Manfaat .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Gambaran Umum.....	5
2.2 Tipikal Struktur SFT .....	5
2.3 Sistem Kabel Struktur SFT .....	6
2.4 Keuntungan Konstruksi Submerged Floating Tunnel .....	14
BAB III METODOLOGI .....	15
3.1 Umum .....	15
3.2 Diagram Alir .....	15
3.3 Studi Literatur . .....	16

3.4 Rencana Pembebanan pada Struktur SFT . . . . .	23
3.5 Analisa Struktur Menggunakan SAP2000 . . . . .	26
3.6 Pemodelan Struktur SFt dengan ABAQUS . . . . .	29
3.7 Verifikasi Pemodelan dengan Penelitian Terdahulu . . . . .	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN . . . . .	31
4.1 Umum . . . . .	31
4.2 Pemodelan dengan Program Bantu ABAQUS . . . . .	31
4.3 Hal – Hal yang perlu diperhatikan dalam Pemodelan . . . . .	34
4.4 Analisa Tegangan Pada Kabel SFT . . . . .	38
4.5 Perpindahan Pada Kabel SFT . . . . .	42
4.6 Verifikasi dengan Penelitian Sebelumnya . . . . .	44
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN . . . . .	47
5.1 Kesimpulan . . . . .	47
5.2 Saran . . . . .	47
Daftar Pustaka . . . . .	49

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tegangan Pada Ketiga Konfigurasi Kabel .....	11
Tabel 2.2 Perpindahan Pada Ketiga Konfigurasi Kabel .....	12
Tabel 2.3 Gaya Aksial Pada Ketiga Konfigurasi Kabel .....	12
Tabel 3.1 Parameter data lingkungan Kepulauan Seribu .....	17
Tabel 3.2 Konfigurasi Pemodelan Struktur SFT .....	18
Tabel 3.3 Periode Ulang Maximum Tinggi Gelombang .....	19
Tabel 3.4 Ukuran <i>prototype</i> SFT .....	20
Tabel 3.5 Spesifikasi Model Pipa PVC .....	20
Tabel 3.6 Tegangan pada pelat dinding SFT .....	27
Tabel 3.7 Gaya aksial kabel SFT .....	27
Tabel 3.8 Reaksi perletakan SFT .....	28
Tabel 3.9 Displacement maksimum struktur SFT .....	28
Tabel 3.10 Natural frequencies and period of the SFT .....	28
Tabel 4.1 Tegangan kabel (S11) akibat <i>Increment Displacement</i> .....	38
Tabel 4.2 Tegangan kabel (S22) akibat <i>Increment Displacement</i> .....	38
Tabel 4.3 Perpindahan pada Struktur akibat <i>Increment Displacement</i> .....	42
Tabel 4.4 Verifikasi Output SAP2000 dan ABAQUS terhadap Tegangan .....	45

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Beberapa SFT yang Diusulkan .....	2
Gambar 2.1 Perkembangan <i>Submerged Floating Tunnel</i> (SFT) .....	6
Gambar 2.2 Contoh jembatan kabel .....	6
Gambar 2.3 Stabilitas sistem kabel pada jembatan kabel .....	8
Gambar 2.4 Kemungkinan pengaturan sistem kabel SFT .....	9
Gambar 2.5 Posisi kabel pada arah horizontal .....	9
Gambar 2.6 Konfigurasi Kabel Prototipe SFT .....	10
Gambar 2.7 Konfigurasi Kelompok Kabel .....	10
Gambar 2.8 Geometrikal Konfigurasi SFT .....	11
Gambar 2.9 Penampang SFT Pada Bagian Dalam .....	11
Gambar 2.10 Sudut Inklinasi Kabel SFT .....	13
Gambar 3.1 Diagram Alir .....	16
Gambar 3.2 Model Uji Yang diskalakan .....	17
Gambar 3.3 Potongan Memanjang SFT .....	20
Gambar 3.4 Potongan A-A SFT .....	21
Gambar 3.5 Potongan B-B SFT .....	21
Gambar 3.6 Bentuk Penampang .....	21
Gambar 3.7 Potongan Melintang SFT .....	22
Gambar 3.8 Konfigurasi Kabel pada pemodelan ABAQUS v6.14 .....	23
Gambar 3.9 Beban Hidup Struktur SFT .....	24
Gambar 3.10 Beban hidrodinamik pada struktur SFT .....	25
Gambar 3.11 Model SFT .....	26
Gambar 3.12 Hasil <i>Input</i> Beban Gelombang dan Arus .....	26
Gambar 3.13 Hasil <i>input</i> beban hidrostatis .....	27
Gambar 4.1 Tampak Memanjang SFT .....	32
Gambar 4.2 Konfigurasi Sudut Kabel SFT dalam pemodelan ABAQUS .....	32

Gambar 4.3 Pemodelan Struktur SFT dengan Program Bantu .....	33
Gambar 4.4 Pemodelan SFT dengan ABAQUS .....	35
Gambar 4.5 Pemodelan Perletakan Dinding Tunnel Pada Bagian <i>Load</i> .....	36
Gambar 4.6 Input Increment Displacement Tunnel Pada Bagian <i>Load SFT</i> .....	37
Gambar 4.7 Tegangan (S11) yang Terjadi Akibat <i>Increment Displacement</i> arah x	39
Gambar 4.8 Tegangan (S22) yang Terjadi Akibat <i>Increment Displacement</i> arah y	40
Gambar 4.9 Output Tegangan (S11) Pada Saat <i>Initial Condition</i> .....	41
Gambar 4.10 Output Tegangan (S11) Pada kondisi maksimum .....	41
Gambar 4.11 Perpindahan Yang Terjadi Pada Struktur SFT .....	42
Gambar 4.12 Perpindahan (U1) pada Tunnel pada <i>Initial Condition</i> .....	44
Gambar 4.13 Perpindahan (U1) pada Tunnel pada Kondisi Maksimum .....	44

# BAB I

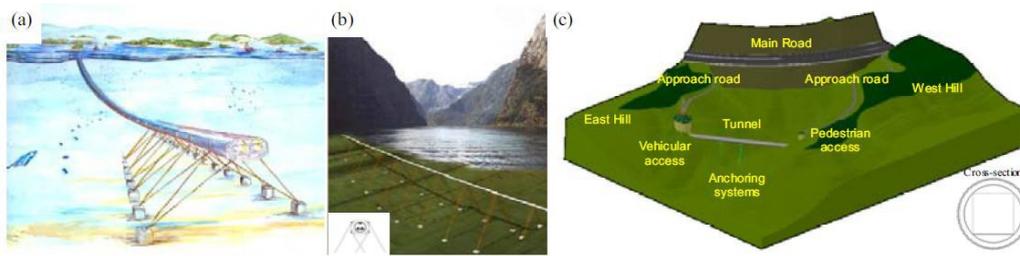
## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Jalur penyeberangan air merupakan salah satu isu yang paling penting di dunia teknik sipil modern ini, seperti dalam sistem penyeberangan merupakan tuntutan di beberapa tempat di seluruh dunia. Salah satu sistem jembatan tradisional yaitu jembatan kabel, seperti jembatan suspensi dan jembatan *Cable Stayed*, merupakan solusi yang paling cocok pada kasus di mana jarak jauh harus ditempuh. Dalam kasus ini, keberadaan jalur penyeberangan air dapat mewakili keadaan untuk mengambil keuntungan dari berbagai segi, ini adalah konsep baru pada jembatan kabel yaitu *Submerged Floating Tunnel* (SFT).

*Submerged Floating Tunnel* (SFT), juga dikenal sebagai *Archimedes Bridge*, tampaknya menjadi solusi teknis yang sangat cocok untuk jalur penyeberangan air. Terlepas dari itu, tidak ada SFT yang telah dibangun di dunia, dimungkinkan karena kurangnya data eksperimen terhadap perilaku aktual dari SFT dibawah permukaan laut dan dampak lingkungan, seperti arus, gelombang dan gempa bumi. (Mazzolani, 2010)

*Submerged Floating Tunnel* (SFT) merupakan sebuah struktur tubular yang terendam dan mengambang di kedalaman tetap melalui sistem angkur yang terdiri dari kabel yang terhubung ke dasar laut. Terowongan secara permanen, dimana SFT dikenakan berat sendiri dan dibantu dengan adanya daya apung yang ditimbulkan oleh air, penampang terowongan didesain sehingga daya apung dapat mengatasi berat badan struktural dan mengalami kekuatan volume yang diarahkan ke atas. Sistem kabel juga memainkan peran yaitu untuk menghambat terowongan, meminimalkan perpindahan dan tegangan yang disebabkan oleh beban lingkungan, seperti beban gempa dan hidrodinamik ( arus dan gelombang ) yang dapat menjadi parah dalam kasus penyeberangan laut dengan sistem SFT. Beberapa proposal SFT dikembangkan di masa lalu ditunjukkan pada Gambar 1.1 (Faggiano, 2010).



**Gambar 1.1** Beberapa SFT yang Diusulkan : (a) The Jintang Strait (China) crossing by the Ponte di Archimede S.p.A (2001); (b) The Stordfjorden (Norway) crossing by the NSFT Company (2009); (c) The Qiandao Lake (China) by the Sino-Italian cooperation project SIJLAB (2007, [2]) (Faggiano, 2010)

Dampak lingkungan dari *Submerged Floating Tunnel* (SFT) sangat kecil, karena struktur tersebut terendam di dalam air dan tak terlihat karena melayang dengan tambatan kabel. Oleh karena berhubungan dengan struktur yang ditempatkan pada kedalaman tetap di dalam air, maka juga mengurangi polusi udara yang dihasilkan (Mazzolani, 2010).

Terdapat beberapa keuntungan dari titik dampak struktural, ekonomi dan dampak lingkungan dapat ditujukan kepada suatu solusi struktural yaitu [1]. Secara khusus, *Submerged Floating Tunnel* (SFT) tampaknya sangat cocok untuk lintas saluran air yang terletak di zona kegempaan yang tinggi. Karena fleksibilitas transversal yang besar dari sistem angkur, tambahan redaman dan inersia telah dijamin oleh interaksi air dan struktur, Untuk mengevaluasi energi gempa struktur SFT pada peristiwa seismik, analisa respon spektrum dilakukan dengan mempertimbangkan pada eksitasi daya dukung tanah. (Martire, 2010).

Hal hal yang perlu diperhatikan dalam struktur utama dari *Submerged Floating Tunnel* (SFT) terkait dengan pemilihan bahan, definisi beban dan konfigurasi sistem penahan (*mooring system*), evaluasi perilaku dinamis di bawah beban hidup dan lingkungan, efek kelelahan, masalah keamanan struktural dalam kasus kejadian ekstrim (baik lingkungan: seperti gempa bumi, gelombang abnormal atau arus, atau kejadian yang disengaja seperti kebakaran, ledakan internal atau eksternal, serangan yang disengaja), identifikasi pemantauan dan pemeliharaan operasi yang memadai, definisi metodologi

konstruksi dan instalasi (Mazzolani, 2010).

Oleh karena, Stabilitas struktur *Submerged Floating Tunnel* (SFT) dijamin dengan adanya sistem penahan (*mooring system*) yang memadai, yang terbuat dari kabel baja yang berada pada kedalaman tetap di dasar laut dan terhubung ke terowongan dengan cara engsel bola. Sehingga, efek dari konfigurasi kabel pada perilaku struktural perlu dievaluasi atas dasar hasil analisis dinamis. (Mazzolani, 2010). Maka untuk mengurangi ketidakstabilan struktur *Submerged Floating Tunnel* (SFT) ditambahkan sistem *mooring* dengan konfigurasi terpilih. Dengan pertimbangan segala keuntungan dan kerugian serta konsekuensi yang akan diutarakan, Untuk mendukung perkembangan penelitian struktur *Submerged Floating Tunnel* (SFT), yang mana di Indonesia mulai dilakukan penelitian rencana pembangunan struktur *Submerged Floating Tunnel* (SFT) di daerah kepulauan seribu sebagai studi kasus dengan panjang 150 m pada kedalaman 10- 15 m di bawah permukaan laut.

## 1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka permasalahan yang dapat dikemukakan pada penelitian kali ini adalah

- Bagaimana konfigurasi *mooring system* yang optimal untuk *Submerged Floating Tunnel* (SFT) sesuai dengan perairan yang dimaksud.
- Bagaimana memodelkan ulang penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya dengan *software finite element* yang berbeda.
- Bagaimana pola tegangan dan perilaku struktur yang terjadi akibat *increment displacement* terhadap *Submerged Floating Tunnel* (SFT) dengan beberapa konfigurasi *mooring system*.

## 1.3 Tujuan

Adapun tujuan utama yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah

- Mendapatkan konfigurasi *mooring system* yang optimal untuk *Submerged Floating Tunnel* (SFT) sesuai dengan perairan yang dimaksud.
- Menentukan parameter-parameter yang digunakan dengan Program Bantu

*software finite element* dalam hal ini *ABAQUS v6.14*.

- Mencari pola tegangan dan perilaku struktur yang terjadi akibat *increment displacement* dengan beberapa konfigurasi *mooring system*.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Dalam penelitian ini agar permasalahan tidak meluas maka penulis membatasi permasalahan yaitu :

- Konfigurasi kabel yang dilakukan dalam penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya terkait kabel penambat (*mooring system*).
- Program bantu yang digunakan adalah *ABAQUS v6.14*.
- *Preliminary design* yang digunakan dalam memodelkan *Submerged Floating Tunnel (SFT)* berdasarkan pada penelitian yang dilakukan sebelumnya.
- Tidak membahas metode pelaksanaan di lapangan.

#### **1.5 Manfaat**

Dapat dijadikan suatu parameter dalam aplikasi permodelan *Submerged Floating Tunnel (SFT)*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Gambaran Umum**

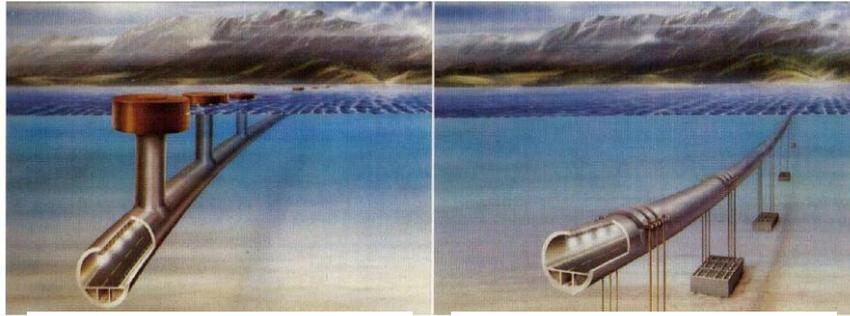
SFT bisa menjadi alternatif yang valid untuk jembatan bentang panjang dalam menyeberangi selat laut, perairan pedalaman. SFT pada dasarnya terdiri dari terowongan silinder mengambang di tertentu kedalaman di bawah permukaan air, tertambat dengan sistem angkur yang bergantung pada unsur-unsur yang ramping baik kabel atau ponton. SFT dapat diatur pada kedalaman tertentu di bawah permukaan air, mereka tidak perlu jalan raya yang panjang dan curam, seperti yang diperlukan untuk terowongan bawah tanah konvensional (*conventional underground tunnels*) atau tradisional terowongan (*traditional immersed tunnels*) yang tenggelam di dasar laut, dan dengan demikian lebih ekonomis dan ramah lingkungan. (Martinelly, 2011).

#### **2.2 Tipikal Struktur SFT**

Berikut adalah tipikal SFT yang terdiri dari :

1. Terowongan yang menyediakan ruang untuk lalu lintas jalan dan atau kereta api,
2. Sistem kabel yang diangkur pada dasar laut,
3. Struktur penghubung antara pantai dan tunnel, dan
4. Koneksi pantai di ujung terowongan.

Terowongan dapat dibangun dari baja, beton atau kombinasi dari keduanya. Bentuk lain seperti *eclips*, persegi panjang atau beberapa sisi mungkin juga relevan. Tethers dan ponton adalah cara alternatif untuk mengendalikan posisi vertikal dan gerakan dari tabung. Mereka juga dapat digunakan dalam kombinasi. Biasanya, tabung adalah struktur yang panjang dan sangat ramping sehingga membutuhkan langkah-langkah khusus untuk memberikan kekakuan horisontal yang cukup untuk sistem tersebut. Berikut tipikal SFT dalam dilihat pada Gambar 2.1 (Jakobsen, 2010).



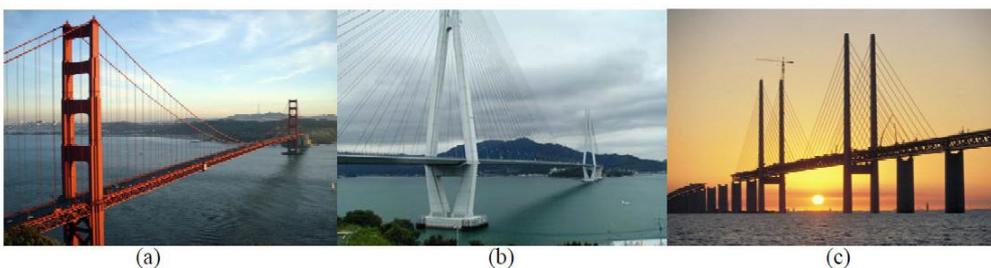
(a). Menggunakan Ponton

(b). Menggunakan Kabel

**Gambar 2.1** Perkembangan *Submerged Floating Tunnel (SFT)* (Jakobsen, 2010)

### 2.3 Sistem Kabel Struktur SFT

Sistem kabel juga memainkan peran guna menghambat terowongan, untuk meminimalkan perpindahan dan tegangan yang disebabkan oleh beban lingkungan, seperti tindakan seismik dan hidrodinamika (Mazzolani, 2009). Pada kebanyakan konstruksi jembatan kabel, klasifikasi alami didasarkan pada susunan sistem kabel. Sistem suspensi misalnya, terdiri dari kabel utama parabola yang mendukung kabel gantungan vertikal, pada saat tertentu, mendukung dek jembatan. Sistem *cable stayed* terdiri dari kabel hampir lurus mendukung kekakuan gelagar, sedangkan dalam sistem harpa mereka paralel dan dihubungkan dengan tiang pylon pada ketinggian yang berbeda. Gambar 2.2 menunjukkan beberapa contoh jembatan yang menampilkan sistem kabel dari jenis tersebut (Mazzolani *et al*, 2009).



(a)

(b)

(c)

**Gambar 2.2** Contoh jembatan kabel : (a) Golden Gate Bridge (San Francisco, USA, 1937); (b) Ta-tara Bridge (Japan; 1999) (c) Øresund Bridge (Denmark, 2000) (Mazzolani *et al*, 2009)

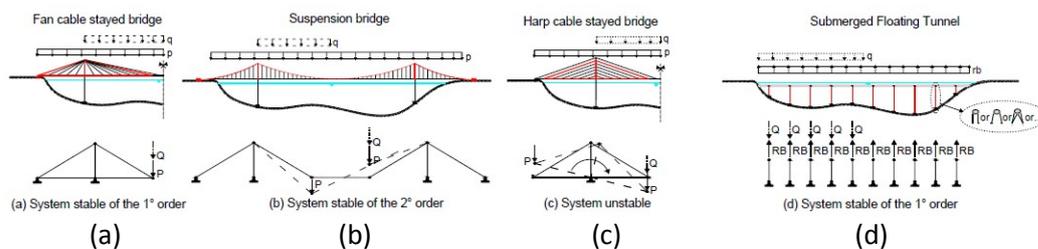
Pada studi kasus jembatan kabel, sistem kabel dirancang untuk menahan beban lalu lintas kendaraan, sistem kabel tersebut biasanya terdiri dari pesawat kabel vertikal sehingga hal ini mampu mentransfer beban vertikal yang terjadi. Umumnya disediakan dua kabel atau lebih pada bidang vertikal, sehingga juga mendukung torsi terhadap kekakuan gelagar. Jelas, penggunaan pesawat kabel vertikal menyiratkan bahwa resultan dari kekuatan kabel termasuk dalam bidang vertikal, sehingga tidak ada dukungan terhadap beban lateral, seperti beban angin (Mazzolani, 2009).

Masalah yang disebabkan oleh beban angin lateral pada jembatan bentang panjang dan girder ramping dapat diselesaikan dengan menggunakan inklinasi pada sistem kabel atau dengan menambahkan pesawat kabel horizontal terhadap yang vertikal (Faggiano *et al*, 2010). Solusi ini telah diadopsi di beberapa jembatan pipa, dimana belum ada jembatan yang mampu menahan beban lalu lintas kendaraan dengan sistem kabel lateral yang telah terealisasi sebelumnya. Selain itu, penggunaan sistem kabel spasial secara efektif dapat meningkatkan respon dinamik torsional dari jembatan tersebut (Mazzolani *et al*, 2009).

Selanjutnya, sistem kabel pada jembatan kabel dapat menawarkan berbagai tingkat kekakuan, tergantung pada konfigurasi kabel tersebut. Bahkan, sistem kabel di sini berarti ansambel kabel dan bagian dari gelagar dan tiang yang diperlukan untuk mentransfer kekuatan aksial yang disebabkan oleh kekuatan kabel, dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Gambar 2.3 – Mazzolani *et al*, 2009): (a) kestabilan dari urutan pertama, jika sistem ini mampu mencapai keseimbangan dan tidak ada perpindahan simpul yang terjadi; (b) kestabilan dari urutan kedua, jika keseimbangan dapat dicapai hanya melalui perpindahan sistem simpul; (c) tidak stabil, jika sistem kabel tidak dapat mencapai keseimbangan. Tipe fan pada sistem *cable stayed* menampilkan angkur pada kabel dan penahan diri dari kestabilan pada urutan pertama (Gambar 2.3a), sistem suspensi jelas lebih stabil dari urutan kedua (Gambar 2.3b), sedangkan biasanya tipe harpa dan tipe fan tidak akan stabil tanpa kabel jangkar (Gambar 2.3c) (Faggiano *et al*, 2010).

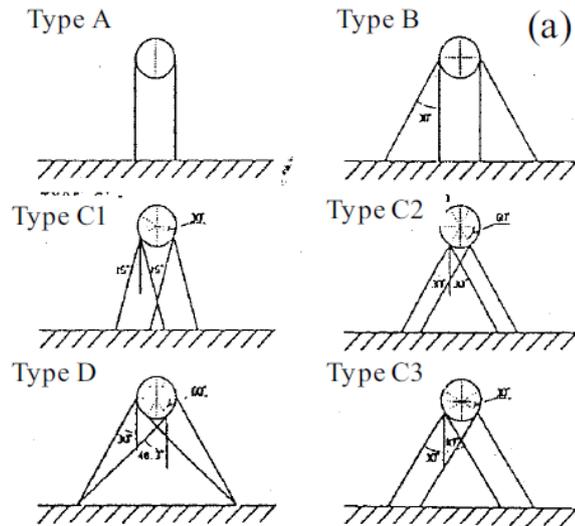
Sistem kabel untuk sistem SFT hingga kini dipahami tidak termasuk dalam satu tipologi yang digunakan untuk jembatan kabel tradisional, karena terdiri dari kelompok kabel, ditempatkan sepanjang terowongan dengan atau antar sumbu tertentu, yang menghubungkan terowongan langsung ke dasar laut. Setiap sistem kabel akan dikenai gaya tarik akibat daya apung sisa (*residual buoyancy*), beban lalu lintas dan berat sendiri, diringankan oleh adanya daya apung, dan diangkur ke dasar laut melalui pondasi dari kelompok kabelnya (Mazzolani *et al*, 2009).

Pertimbangan tersebut menunjukkan bahwa sistem kabel dari SFT stabil dari urutan pertama (Gambar 2.3d). Bahkan masing-masing kelompok kabel mampu mentransfer variasi beban apapun ke tanah dari kelompok kabel lainnya, tanpa memerlukan perpindahan sistem simpul. Jelas, intensitas beban hidup memiliki kenyamanan lebih rendah dari pada daya apung sisa, untuk menghindari kekenduran pada kabel (*slack*) (Mazzolani *et al*, 2009).

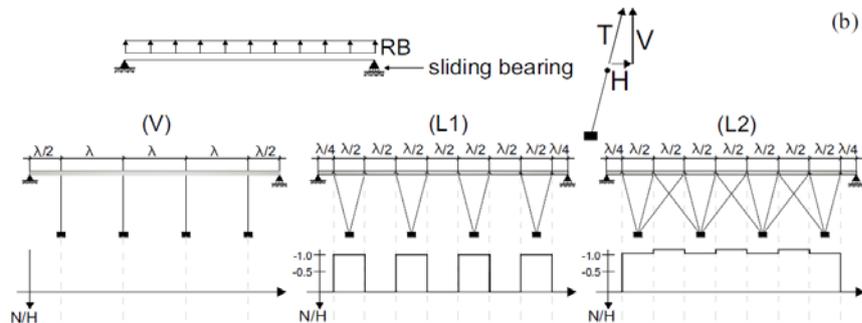


**Gambar 2.3** Stabilitas sistem kabel pada jembatan kabel (a), (b), (c) dan untuk struktur SFT (d) (Mazzolani *et al*, 2009)

Umumnya solusi yang diusulkan untuk sistem kabel SFT melibatkan kabel cenderung melintang terhadap sumbu terowongan, sehingga mewujudkan sistem kabel spasial. Namun hanya solusi yang memuat empat kabel per kelompok (lihat tipe B, C dan D pada Gambar. 2.3) mampu menerima dukungan torsi dan lateral dari terowongan dengan baik. Konfigurasi ini menjamin perilaku yang lebih baik dari sistem struktur terhadap beban lateral terowongan bentang panjang, meningkatkan juga respon terhadap / gelombang arus osilasi. Beberapa usulan lain hanya memiliki kabel vertikal, sehingga sistem kabel akan terasa kurang efektif dalam arah lateral.



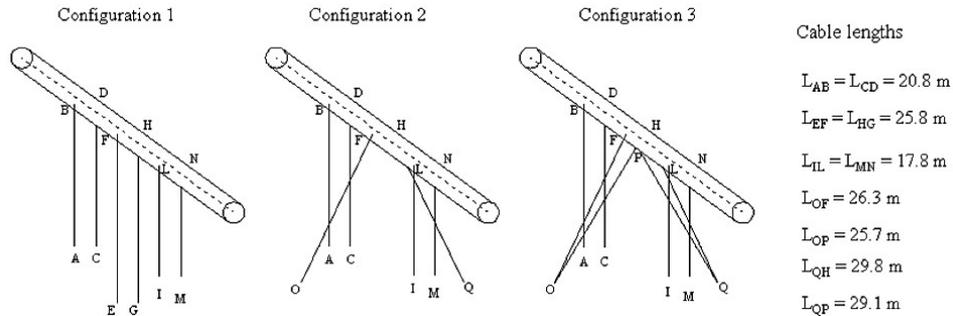
**Gambar 2.4** Kemungkinan pengaturan sistem kabel SFT (Faggiano, 2010) yang telah diuji oleh Maeda *et al.*



**Gambar 2.5** Posisi kabel pada arah horizontal (Faggiano *et al.*, 2010)

Pada prototipe desain awal dari lima konfigurasi kabel yang berbeda pada penelitian sebelumnya, telah dianalisis dan dievaluasi perilaku konfigurasi kabel yang diakibatkan oleh beban vertikal dan horizontal dengan cara analisis statik ekuivalen dan kemudian dibandingkan. Atas dasar hasil dicapai, tiga konfigurasi kabel ditunjukkan pada Gambar 2.7 ini dipilih. Konfigurasi hasil analisa tentang prediksi fisik, menunjukkan bahwa, kabel vertikal sangat efektif untuk menerima beban vertikal saja, sedangkan pertahanan diri dalam arah horisontal diabaikan. Kabel cenderung sangat efektif, baik dalam arah vertikal dan horisontal, hanya jika empat kabel dalam konfigurasi bentuk W, sedangkan dua inklinasi kabel memiliki kondisi pertahanan yang tidak terlalu efektif di kedua arah vertikal dan

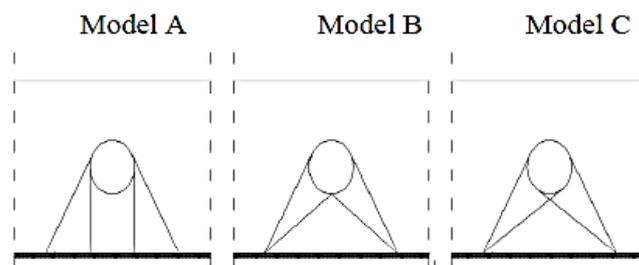
horizontal dan mereka menimbulkan tegangan torsi yang relevan di dalam *tunnel*, ketika mengalami tindakan horisontal.



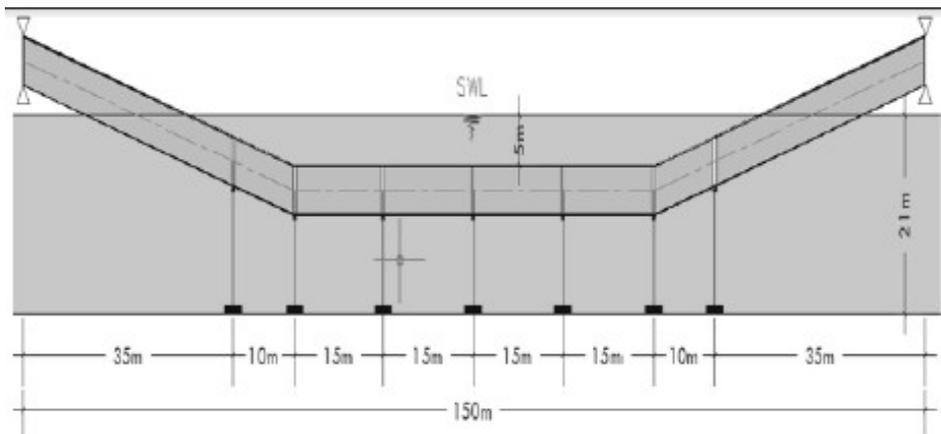
**Gambar 2.6** Konfigurasi Kabel Prototipe SFT (Mazzolani et al, 2010)

Persimpangan Kepulauan Seribu dianggap sebagai studi kasus. Namun, karena tujuan penulisan ini adalah untuk umum menyelidiki perilaku seismik SFT, pengaturan 3 (tiga) sistem kabel (Gambar 3.3). Model-A terdiri dari dua kabel vertikal dan dua kabel dengan kemiringan 360 tegak lurus terhadap sumbu horizontal dasar laut; Model-B terdiri dari dua simetri kabel dengan kemiringan 360 untuk kabel luar sama dengan model B dan kabel dalam bertemu di bagian tengah bawah tubuh SFT; dan Model-C adalah dengan kemiringan seperti Model- B tetapi kabel dalam bersinggungan dengan tubuh SFT (Wahyuni et al, 2012).

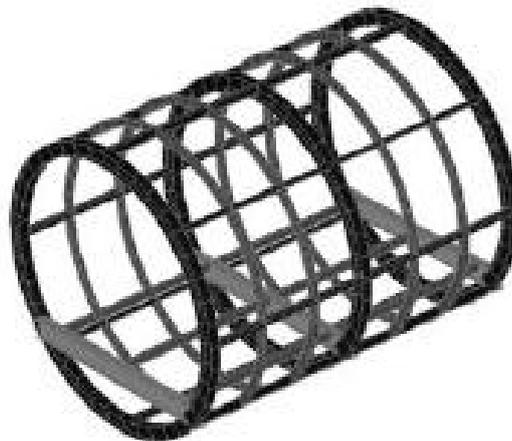
Studi kasus yang dianggap panjang persimpangan ( $L$ ) 150 m diasumsikan datar sepanjang 80 m di bagian tengah persimpangan dan cenderung sepanjang 35-m di kedua sisi ujungnya. Kedalaman dasar laut ditetapkan sebesar 21 m, yaitu kedalaman air rata-rata Nusantara persimpangan (Gambar 2.8). Terowongan tersebut terendam 5-m di bawah permukaan air dan hubungan antara SFT dan pantai yang ditetapkan sendi. penampang SFT terdiri dari kerangka baja dan plat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (Wahyuni et al, 2012).



**Gambar 2.7** Konfigurasi Kelompok Kabel (Wahyuni et al, 2012)



**Gambar 2.8** Geometrikal Konfigurasi SFT (Wahyuni et al, 2012)



**Gambar 2.9** Penampang SFT Pada Bagian Dalam (Wahyuni et al, 2012)

Beberapa hasil perbandingan ketiga model konfigurasi kabel SFT berdasarkan penelitian yang telah dilakukan (Wahyuni et al, 2012).

**Tabel 2.1** Tegangan Pada Ketiga Konfigurasi Kabel (Wahyuni et al, 2012)

Loading Combination	Model A Stresses			Model B Stresses			Model C Stresses		
	S11	s22	s12	S11	s22	s12	S11	s22	s12
comb-1	N/mm <sup>2</sup>								
comb-1	-92.27	-140.34	-64.37	104.75	-134.68	-57.51	105.06	-133.29	-57.28
comb-2	-87.58	-137.00	-62.83	94.51	-126.14	-53.58	94.85	-124.77	-53.33
comb-3	-97.48	-151.25	-70.06	109.13	-137.99	-59.08	108.56	-136.39	-58.79
comb-4	-92.79	-147.91	-68.52	97.89	-129.46	-55.15	98.34	-127.86	-54.84
Seismic	-5.22	-10.91	-5.69	3.38	-3.31	-1.57	3.50	-3.09	-1.51

**Tabel 2.2** Perpindahan Pada Ketiga Konfigurasi Kabel (Wahyuni et al, 2012)

Loading Combination	Model A			Model B			Model C		
	Displacement Max			Displacement Max			Displacement Max		
	U1	U2	U3	U1	U2	U3	U1	U2	U3
comb-1	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
comb-1	7.83	73.93	35.64	8.55	22.16	49.20	8.56	21.62	48.15
comb-2	6.89	73.93	32.77	7.29	20.98	43.14	7.29	20.45	43.22
comb-3	8.10	86.08	37.59	8.68	23.73	49.40	8.69	23.11	48.23
comb-4	7.17	86.08	34.71	7.41	22.55	43.34	7.42	22.02	43.28
Seismic	0.27	12.15	1.95	0.12	1.57	0.20	0.13	1.53	0.07

**Tabel 2.3** Gaya Aksial Pada Ketiga Konfigurasi Kabel (Wahyuni et al, 2012)

Loading Combination	Max force of Cable		
	Model A	Model B	Model C
	ton	ton	ton
comb-1	265.33	263.85	256.87
comb-2	243.04	242.42	235.56
comb-3	280.27	269.12	261.15
comb-4	257.97	247.69	239.84
Seismic	14.94	5.26	4.28

Tekanan dan perpindahan dari SFT, yang disebut sisi lurus dan sisi miring, yang terjadi karena beban yang diterapkan seperti yang disebutkan di bagian sebelumnya. Tabel 3.1 – 3.3 menunjukkan tekanan, yaitu tekanan memanjang (S11), transversal tekanan (s22) dan tegangan geser (s12), perpindahan maksimum, dan gaya aksial maksimum pada kabel masing-masing. Nilai-nilai ini pada tabel menunjukkan hasil dari empat kombinasi pembebanan dan hanya beban gempa dari model. Tekanan maksimum yang terletak di sekitar sambungan antara kabel luar dan tubuh SFT sebagai beban hidrodinamik, yang gelombang dan arus, mendominasi beban. Perpindahan maksimum struktur terjadi di tengah-tengah SFT (Wahyuni et al, 2012).

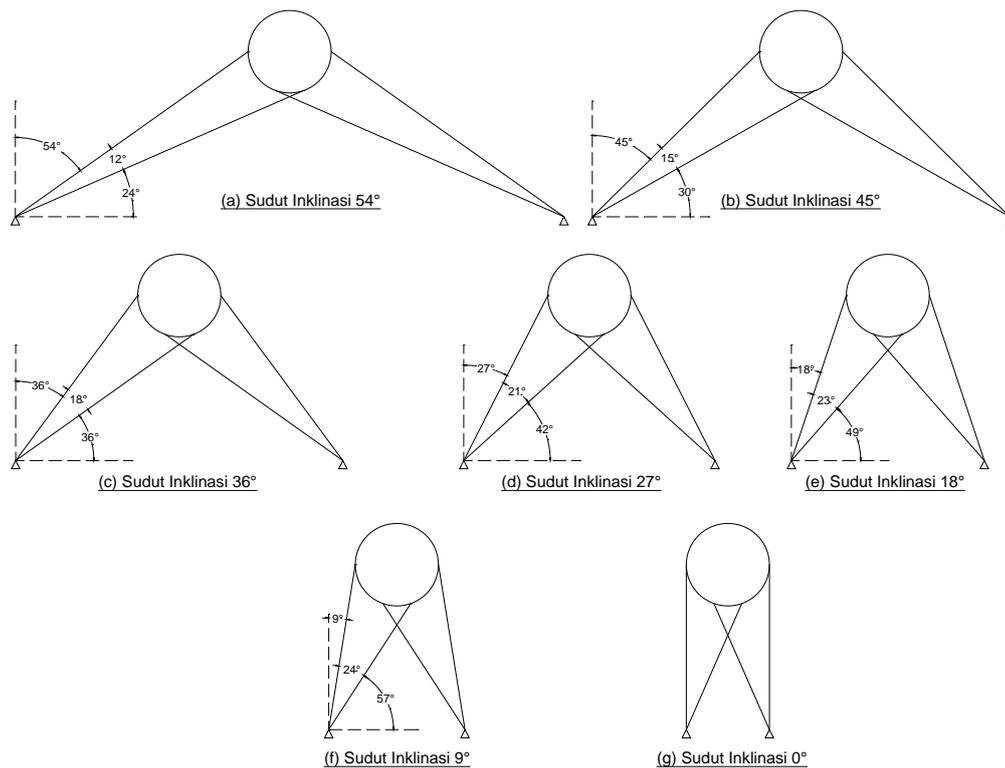
Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1-3.3, model C memiliki nilai terkecil dibandingkan dengan yang lain kecuali tekanan dalam arah transversal (s22) pada model A. tekanan dikenai beban gempa sekitar 2,4% menjadi 8,3% dari tekanan dari kombinasi beban ke-4 (Wahyuni et al, 2012).

Perpindahan dari model-C umumnya lebih kecil daripada yang lain yaitu model-A dan -B. Karena beban gempa, perpindahan dari SFT sekitar 0,17% sampai 6,96% dari kombinasi beban ke-4 kecuali perpindahan horizontal 14% pada model-A. Alasannya adalah bahwa Model-A memiliki kabel vertikal yang tidak bisa menahan beban horizontal (Wahyuni et al, 2012).

Gaya aksial Model-C lebih kecil dari model-A dan -B. Gaya aksial dikenai beban gempa sekitar 1,8% sampai 5,8% dari kombinasi beban ke-4 (Wahyuni et al, 2012).

Berdasarkan tekanan, perpindahan dan gaya aksial kabel, pemuatan gempa di SFT tidak mempengaruhi banyak pada total nilai kombinasi beban dibandingkan dengan beban lain (Wahyuni et al, 2012).

Model C ( konfigurasi sudut bentuk W) diambil sebagai acuan penentuan penggunaan kabel pada SFT, yang selanjutnya dilakukan analisa sudut inklinasi efektif yang akan digunakan dalam aplikasi SFT di lapangan sesuai dengan wilayah yang ditentukan. Berdasarkan keefektifian kabel tersebut dicari nilai posisi kabel yang mampu menahan struktur SFT dan mampu menahan gaya yang bekerja dengan maksimal dan optimum. Berikut konfigurasi posisi kabel yang dimodelkan: (Indra dan Endah, 2014).



**Gambar 2.10** Sudut Inklinasi Kabel SFT (Indra dan Endah, 2014)

## 2.4 Keuntungan Konstruksi Submerged Floating Tunnel (SFT)

Beberapa keuntungan dalam konstruksi SFT selain lebih ekonomis :

### 2.4.1 Konstruksi Kabel Sebagai Pengganti Pilar Pada jembatan

Stabilitas struktur *Submerged Floating Tunnel* (SFT) dijamin dengan adanya sistem penahan (*mooring system*) yang memadai, yang terbuat dari kabel baja yang berada pada kedalaman tetap di dasar laut dan terhubung ke terowongan dengan cara engsel bola (Mazzolani, 2010).

Sistem kabel juga memainkan peran yaitu untuk menghambat terowongan, meminimalkan perpindahan dan tegangan yang disebabkan oleh beban lingkungan, seperti beban gempa dan hidrodinamik yang dapat menjadi parah dalam kasus penyeberangan laut dengan sistem SFT (Faggiano, 2010).

### 2.4.2 Ramah Lingkungan

Dampak lingkungan dari *Submerged Floating Tunnel* (SFT) sangat kecil, karena mereka terendam di dalam air dan tak terlihat. Oleh karena berhubungan dengan struktur yang ditempatkan pada kedalaman tetap di dalam air, maka juga mengurangi polusi udara yang dihasilkan (Mazzolani, 2010).

### 2.4.3 Konstruksi Lebih pendek

SFT dapat diatur pada kedalaman tertentu di bawah permukaan air, mereka tidak perlu jalan raya yang panjang dan curam, seperti yang diperlukan untuk terowongan bawah tanah konvensional (*conventional underground tunnels*) atau tradisional terowongan (*traditional immersed tunnels*) yang tenggelam di dasar laut, dan dengan demikian lebih ekonomis dan ramah lingkungan. (Luca Martinelly, 2011)

## BAB III

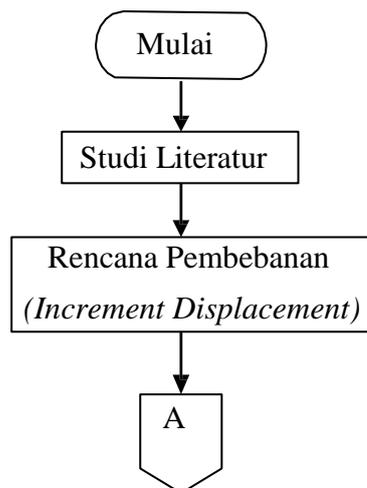
### METODOLOGI

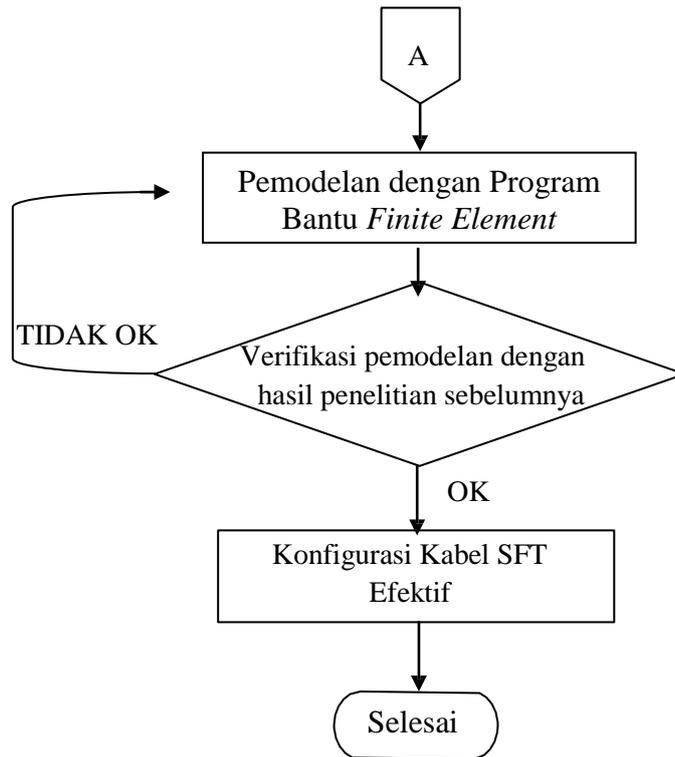
#### 3.1 Umum

Bab ini menjelaskan dan menguraikan tahapan pengerjaan. Diawali dengan studi literatur mengenai SFT yang telah diteliti pada penelitian sebelumnya khususnya konfigurasi kabel. Kemudian melakukan pemodelan dengan program bantu ABAQUS v6.14. Langkah selanjutnya yaitu membebani struktur berdasarkan *prototype* yang telah dibuat. Setelah semua data diolah, langkah selanjutnya adalah menganalisa konfigurasi posisi kabel dengan program bantu *finite element* yang dalam hal ini menggunakan ABAQUS v6.14. Dari analisa yang dilakukan akan didapatkan nilai konfigurasi posisi kabel efektif dalam permodelan SFT (*Submerged Floating Tunnels*). Untuk mencapai tujuan yang diinginkan maka diperlukan langkah – langkah dalam menyelesaikan masalah yang telah dirumuskan dalam Bab 1 dan berikut akan ditampilkan diagram alir untuk menyelesaikan masalah tersebut.

#### 3.2 Diagram Alir

Tahapan ini menguraikan urutan pelaksanaan dalam menyelesaikan proposal tesis. Berurutan dari studi literatur, analisa struktur, pemodelan SFT, hingga menghasilkan konfigurasi posisi kabel efektif.





**Gambar 3.1** Diagram Alir

### 3.3 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mendalami materi yang relevan dengan penelitian terdahulu. Studi kepustakaan ini meliputi berbagai jurnal ilmiah yang terkait dengan konfigurasi kabel pada struktur SFT.

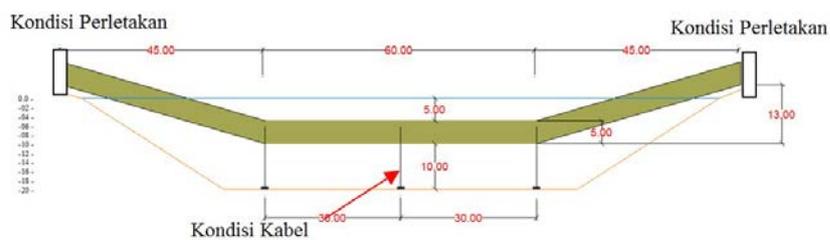
Sebelum prototipe SFT dibangun di lintas Kepulauan Seribu, perlu untuk mendapatkan data yang dibutuhkan, terutama data lingkungan. Parameter struktur SFT dan hidrodinamika lingkungan Selat Kepulauan Seribu tercantum pada Tabel 3.1, yang digunakan dalam perhitungan. Kriteria desain SFT (Long, 2009) yaitu memberikan gaya apung tertutup antara batas atas sebesar 130% dari berat permanen dan batas bawah sebesar 120% dari Jumlah beban berat permanen dan lalu lintas (Wahyuni et al, 2009).

**Tabel 3.1** Parameter data lingkungan Kepulauan Seribu (Wahyuni et al, 2009)

Fluid dynamic environmental	Symbol	Unit	Value	Structural Property	Symbol	Unit	Value
Fluid density	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1,025	Tunnel equivalent density	$\rho T$	kg/m <sup>3</sup>	2,018
Water depth	$h$	m	20	Tunnel outer diameter	$D$	m	5.5
Wave height	$H$	m	1.2	Tunnel inner diameter	$d$	m	4.7
Wave period	$T$	m	3.58	Tunnel equivalent Young	$ET$	N/m <sup>2</sup>	$3.2 \times 10^{10}$
Surface current velocity	$UO$	m/s	1.2	Cable density	$\rho C$	kg/m <sup>3</sup>	7,850
Drag coefficient	$CD$	1	1	Cable diameter	$dC$	m	0.1
Mass/inertia coefficient	$Cm$	1	2	Cable young modulus	$EC$	N/m <sup>2</sup>	$1.4 \times 10^{11}$
Added-mass coefficient	$Ca$	1	1	Kinetic viscosity coefficient	$U$	m <sup>2</sup> /s	$1.067 \times 10^{-6}$

Pada studi di Kepulauan Seribu, gaya uplift adalah 31.563,5 KN dan total berat struktural adalah 25.770 KN, sehingga rasio kekuatan gaya angkat dan berat struktur adalah 1.22. Rasio ini akan memenuhi kriteria, yaitu antara 1,2-1,3. Sehingga ukuran dari penampang struktur SFT dengan material baja berdiameter 5m dengan sling 75mm digunakan sebagai studi SFT ini. Untuk analisis struktur, model Finite Element (FE) dari struktur ini dibuat menggunakan Abaqus v6.14.

Data-data penunjang lainnya untuk menyusun penelitian ini berdasarkan data *prototype* yang telah dianalisa sebelumnya. Berikut data Penampang struktur model uji yang diskalakan berdasarkan *prototype*.



**Gambar 3.2** Model Uji Yang diskalakan

Pemodelan dibagi kedalam berbagai kondisi yang salah satu kondisinya dijadikan sebagai parameter pemodelan. Konfigurasi pemodelan *prototype* rencana sesuai Tabel 3.2. Dari tabel tersebut dapat diketahui kemungkinan konfigurasi dari tiap variabel. Berikut konfigurasi yang diteliti khususnya untuk

analisa sudut inklinasi kabel dengan berbagai konfigurasi posisinya berbasis pada pangujian model uji.

**Tabel 3.2** Konfigurasi Pemodelan Struktur SFT

No.	Parameter	Hs	Ts	BWR	SIK	Kekangan	Diameter	KET
		Cm	detik	ND	sudut	ND	mm	
1	<b>Hs</b>	1	1.2	1.5	C	S-S	0.65	
		3	1.2	1.5	C	S-S	0.65	
		5	1.2	1.5	C	S-S	0.65	
		7	1.2	1.5	C	S-S	0.65	
		<b>9</b>	<b>1.2</b>	<b>1.5</b>	<b>C</b>	<b>S-S</b>	<b>0.65</b>	Dianalisa
3	<b>Ts</b>	11	1.2	1.5	C	S-S	0.65	
		9	1.4	1.5	C	S-S	0.65	
		9	1.0	1.5	C	S-S	0.65	
		9	0.8	1.5	C	S-S	0.65	
		9	0.6	1.5	C	S-S	0.65	
4	<b>BWR</b>	9	0.4	1.5	C	S-S	0.65	
		9	1.2	1.9	C	S-S	0.65	
		9	1.2	1.8	C	S-S	0.65	
		9	1.2	1.7	C	S-S	0.65	
		9	1.2	1.6	C	S-S	0.65	
6	<b>Kekangan</b>	9	1.2	1.4	C	S-S	0.65	
		9	1.2	1.3	C	S-S	0.65	
		9	1.2	1.2	C	S-S	0.65	
		9	1.2	1.1	C	S-S	0.65	
		9	1.2	1.5	C	J-J	0.65	
5	<b>SIK</b>	9	1.2	1.5	C	J-S	0.65	
		9	1.2	1.5	C	J-B	0.65	
		9	1.2	1.5	C	S-B	0.65	
		9	1.2	1.5	C	B-B	0.65	
		9	1.2	1.5	A	S-S	0.65	Dianalisa
7	<b>Diameter Kabel</b>	9	1.2	1.5	B	S-S	0.65	Dianalisa
		9	1.2	1.5	E	S-S	0.65	Dianalisa
		9	1.2	1.5	D	S-S	0.65	Dianalisa
		9	1.2	1.5	F	S-S	0.65	Dianalisa
		9	1.2	1.5	G	S-S	0.65	Dianalisa
7	<b>Diameter Kabel</b>	9	1.2	1.5	C	S-S	0.40	
		9	1.2	1.5	C	S-S	0.45	
		9	1.2	1.5	C	S-S	0.50	
		9	1.2	1.5	C	S-S	0.8	

Keterangan:

- BWR = *Buoyancy Weight Ratio* (Gaya angkat keatas), berdasarkan persamaan 3.1, 3.2 dan 3.3
  - SIK = Sudut ingklinasi
  - Hs = Tinggi Gelombang
  - Ts = Periode gelombang
- Hs dan Ts ditentukan berdasarkan Tabel 3.3

Data gelombang yang digunakan pada pemodelan ini menyesuaikan dengan data dari BPPT yang diambil berdasarkan gelombang yang terjadi di perairan pulau panggang dan pulau karya. Berikut data gelombang yang

mempengaruhi struktur *tunnel*:

**Tabel 3.3** Periode Ulang Maximum Tinggi Gelombang Signifikan di utara teluk Jakarta, Laut Jawa (IHL-BPPT, 2011)

Periode Ulang (tahun)	Gelombang signifikan				Gelombang individual			
	Hs	Ts	Ls	(H/L) <sub>s</sub>	Hs	Ts	Ls	(H/L) <sub>s</sub>
	(m)	(detik)	(m)		(m)	(detik)	(m)	
1	2.04	5.81	52.59	0.04	3.67	7.55	89.92	0.04
5	3.92	8.00	97.71	0.04	7.06	10.40	168.84	0.04
10	4.27	8.34	105.36	0.04	7.69	10.84	183.63	0.04
25	4.63	8.68	112.95	0.04	8.33	11.28	198.82	0.04
50	4.87	8.90	117.85	0.04	8.77	11.57	208.93	0.04
<b>100</b>	<b>5.08</b>	<b>9.08</b>	<b>122.03</b>	<b>0.04</b>	<b>9.14</b>	<b>11.81</b>	<b>217.78</b>	<b>0.04</b>

Rasio gaya apung terhadap beban mati dan tambahan dapat dicari dengan menggunakan dengan rumus sebagai berikut :

$$r_u = \frac{U}{W} \tag{3.1}$$

Nilai  $U$  dan  $W$  didapatkan dengan menggunakan rumus berikut :

$$W = 1.3A_c\gamma_c \tag{3.2}$$

$$U = A_T\gamma_w \tag{3.3}$$

Dimana :

$U$  : gaya apung per satuan panjang SFT

$W$  : berat sendiri dan berat tambahan seperti kolom dan utilitas yang diasumsikan sebesar 30% dari berat mati

$A_c$  : luas penampang bahan yang digunakan

$A_T$  : luas total penampang SFT

$\gamma_c$  : berat jenis bahan

$\gamma_w$  : berat jenis air laut ( 10,25 KN/m<sup>3</sup>)

Data – data yang digunakan dalam pemodelan SFT (*Submerged Floating Tunnels*) menggunakan data data yang telah dibahas dalam penelitian sebelumnya. Data data inilah yang akan digunakan dalam pemodelan dengan program bantu ABAQUS v6.14. Penentuan jenis material ini digunakan untuk menganalisa struktur *tunnel* yang digunakan. *Prototype* yang dibuat dikepulauan seribu direncanakan dari berbagai elemen struktur (Gambar 3.4 dan 3.5), pada pemodelan SFT ini digunakan elemen baja karena mempertimbangkan kemudahan perencanaan dan aplikasi pemodelan. Pemodelan tersebut berupa analisa numerik menggunakan program bantu SAP 2000. Berikut data struktur SFT yang direncanakan:

**Tabel 3.4** Ukuran *prototype* SFT

Besaran	<i>Prototype</i>	Satuan
Panjang keseluruhan, L	150	m
Diameter SFT, D	5	m
Massa SFT, m	2834	ton
Gaya Apung, B	1523	ton

**Tabel 3.5** Spesifikasi Model Pipa PVC (Sumber PT.Wavin Duta Jaya)

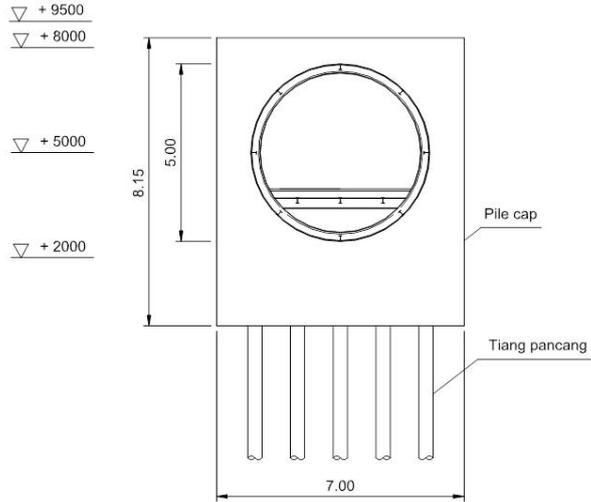
<i>Property</i>	Unit	Nilai
<i>Specific gravity</i>	gr/cm <sup>3</sup>	1,4
<i>Coefficient of linear expansion</i>	Mm/m,°K	8 x 10 <sup>-2</sup>
<i>Thermal Conductivity</i>	W/m,°K	0,15
<i>Modulus of Elasticity</i>	N/mm <sup>2</sup>	3000
<i>Surface resistance</i>	Ohm	>10 <sup>12</sup>

Berikut data–data yang diperlukan dalam penyusunan tesis yaitu berupa data dari penelitian sebelumnya. Berikut data yang digunakan :

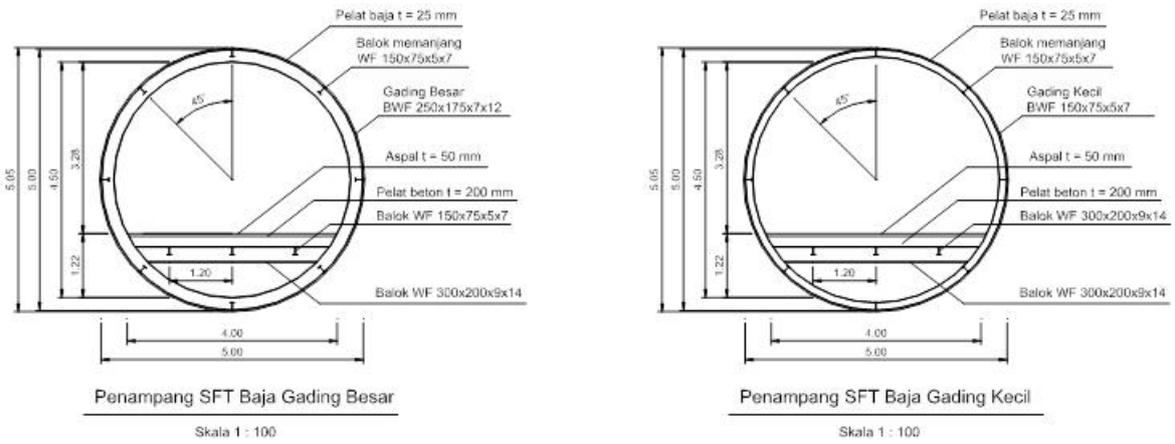
1. Struktur SFT memakai bentuk penampang lingkaran, deskripsi penampang dapat dilihat pada Gambar 3.3.



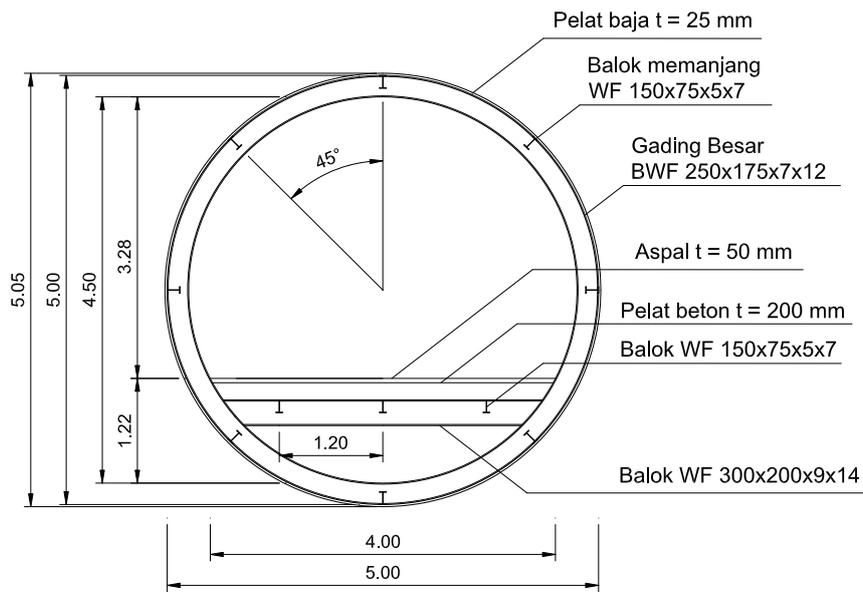
**Gambar 3.3** Potongan Memanjang SFT



**Gambar 3.4 Potongan A-A SFT**

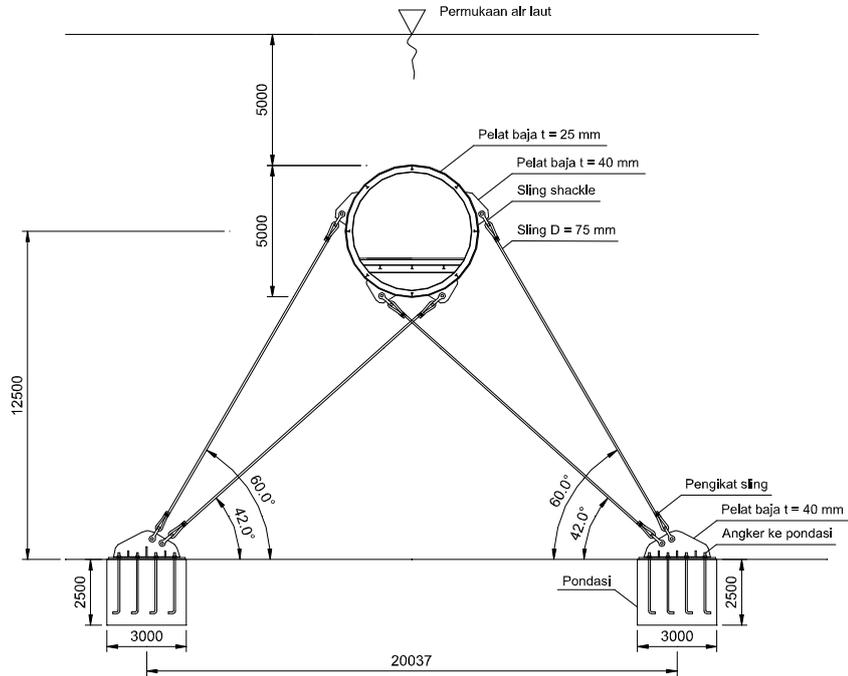


**Gambar 3.5 Potongan B-B SFT**



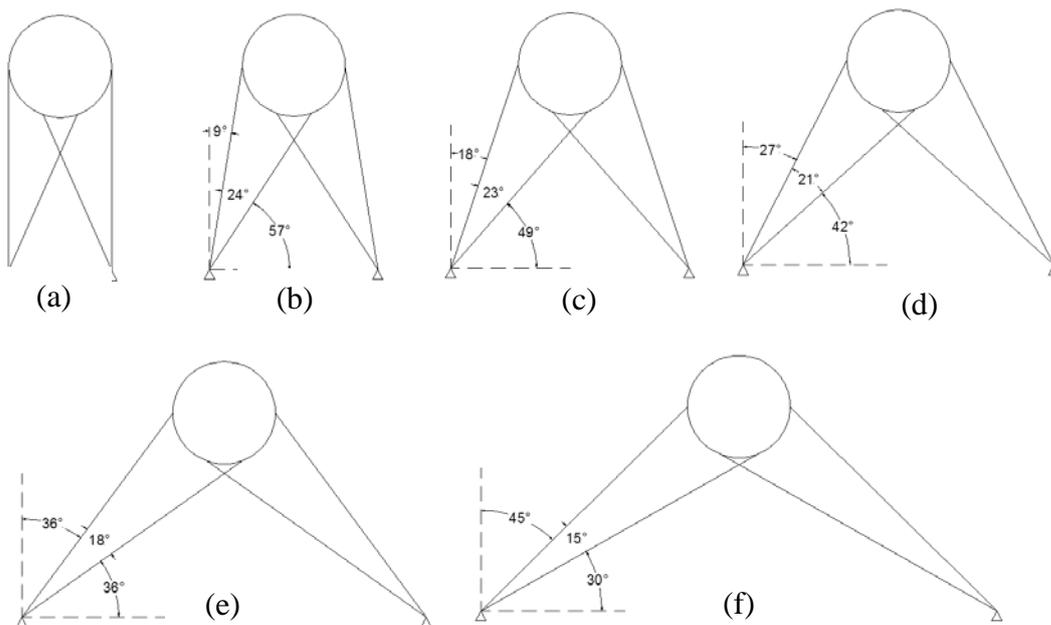
**Gambar 3.6 Bentuk Penampang**

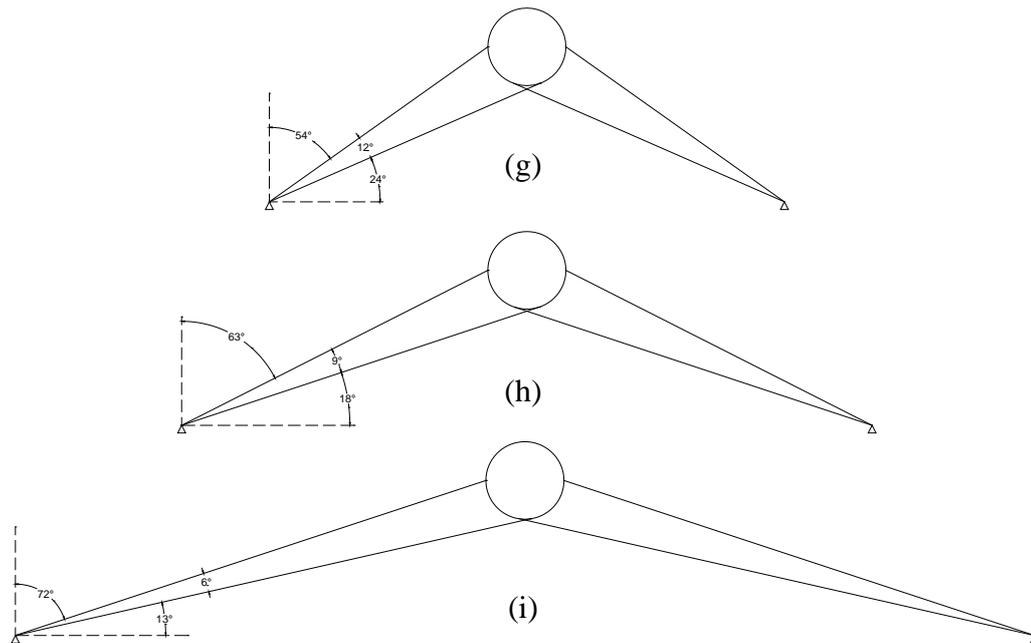
2. Bentuk konfigurasi kabel baja SFT menggunakan bentuk kabel segitiga (Gambar 3.8).



**Gambar 3.7** Potongan Melintang SFT

Setelah detail sambungan dibuat, untuk mengetahui perilaku struktur SFT digunakan program bantu dengan menggunakan software Abaqus. Berikut beberapa konfigurasi posisi kabel yang dimodelkan dengan program bantu Abaqus.





**Gambar 3.8** Konfigurasi Kabel pada pemodelan ABAQUS v6.14 yaitu : (a). SFT dengan sudut  $0^{\circ}$ , (b). SFT dengan sudut  $9^{\circ}$ , (c). SFT dengan sudut  $18^{\circ}$ , (d). SFT dengan sudut  $27^{\circ}$ , (e). SFT dengan sudut  $36^{\circ}$ , (f). SFT dengan sudut  $45^{\circ}$ , (g). SFT dengan sudut  $54^{\circ}$ , (h). SFT dengan sudut  $63^{\circ}$ , (i). SFT dengan sudut  $72^{\circ}$ .

Oleh karena, konfigurasi posisi kabel menjadi hal yang penting untuk diperhatikan agar tercipta kekakuan struktur yang berkaitan dengan biaya konstruksi yang dikeluarkan. Diharapkan dengan terciptanya kondisi yang efektif bisa meminimalisir biaya konstruksi. Berdasarkan hal tersebut penelitian ini dilakukan untuk mencari konfigurasi posisi kabel efektif yang nantinya akan digunakan sebagai dasar penelitian pada *prototype* yang akan di bangun di Indonesia.

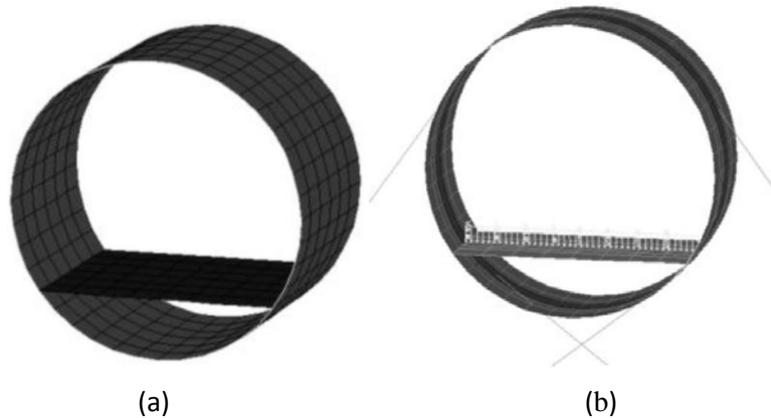
### 3.4 Rencana Pembebanan pada Struktur SFT

Beban adalah salah satu faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam pemodelan. Ada tiga jenis beban yaitu: beban tetap (termasuk beban hidrostatis), yang beban hidup karena lalu lintas, dan beban lingkungan akibat gelombang, arus dan gempa bumi. Kombinasi beban di analisis ini adalah:

1. Beban Mati + Beban Hidup + Beban Apung + hidrostatis + arus + Gelombang
2. Beban Mati + Beban Apung + hidrostatis + arus + Gelombang

3. Beban Mati + Beban Hidup + Beban Apung + hidrostatik + arus + Gelombang + gempabumi
4. Beban Mati + Beban Apung + hidrostatik + arus + Gelombang + gempa bumi

Beban hidup dalam struktur ini SFT dari beban lalu lintas ditunjukkan pada Gambar dibawah ini. beban hidup seragam berdasarkan standar yang berlaku untuk jembatan 6 kN/m<sup>2</sup> (Gambar 2.7(a)) dan beban garis adalah 5,72 kN/m (Gambar 2.7(b)).



**Gambar 3.9** Beban Hidup Struktur SFT (Mazzolani et al, 2010)

Beban lingkungan terdiri dari beban hidrostatik, *buoyancy*, dan beban gelombang.

#### 3.4.1. Beban Hidrostatik

Setiap permukaan yang terendam dalam cairan akan diberikan kekuatan di atasnya dengan tekanan hidrostatik, dan timbul adanya kekuatan dalam arah normal, atau tegak lurus ke permukaan; itu adalah, arah gaya tergantung pada orientasi tampak yang ditinjau. Tekanan meningkat secara linear dengan peningkatan kedalaman ke dalam cairan seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (1) (Wahyuni et al, 2009).

$$\rho = -\rho g z \tag{3.1}$$

Dimana  $\rho$  adalah kepadatan massa,  $g$  adalah percepatan gravitasi dan  $z$  adalah kedalaman.

### 3.4.2. Beban Bouyancy

Gaya apung sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh objek, dan di arah z positif (vertikal) (dan bertindak melalui pusat gravitasi dari cairan yang dipindahkan) (Wahyuni et al, 2009).

$$F_{Bouyancy} = \rho g V \quad (3.2)$$

Dimana :  $\rho$  adalah kerapatan massa,  $g$  adalah percepatan gravitasi dan  $V$  adalah volume dari fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut.

### 3.4.3. Beban gelombang

Kekuatan  $F_h$  per satuan panjang yang timbul dari interaksi air dengan SFT, karena gerak relatif keduanya, selama peristiwa seismik dapat dievaluasi melalui persamaan Morrison :

$$F_h = \rho_w \frac{\pi V^4}{4} [(C_t - 1)(a_w(t) - a_s(t))] + \frac{1}{2} C_D D (V_w(t) - V_s(t)) |V_w(t) - V_s(t)| \quad (3.3)$$

Dimana  $\rho_w$  adalah massa jenis air,  $D$  adalah diameter luar dari elemen struktur SFT (misalnya *tunnel* atau kabel),  $C_t$  adalah koefisien inersia,  $C_D$  adalah koefisien gesek,  $a_w$  dan  $a_s$  adalah partikel air dan percepatan struktur,  $v_w$  dan  $v_s$  adalah kecepatan air dan struktur. Masukan dari beban ini, tegak lurus terhadap sisi vertikal, dalam model dapat dilihat pada Gambar 3.10 (Wahyuni et al, 2009).

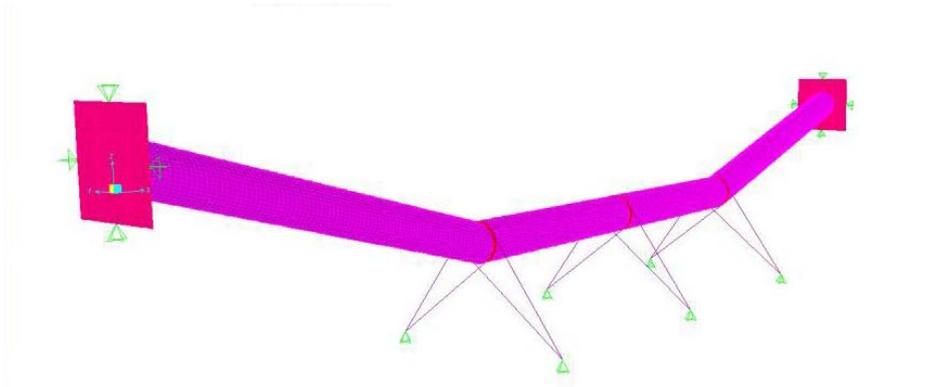


**Gambar 3.10** Beban hidrodinamik pada struktur SFT (Wahyuni et al, 2012)

Dalam pemodelan 9 (Sembilan) konfigurasi sudut inklinasi kabel SFT digunakan beban berupa *displacement control* , dimana beban ini diberikan pada struktur SFT untuk mengetahui pengaruh sudut inklinasi kabel SFT terhadap tegangan dan perpindahan pada struktur SFT.

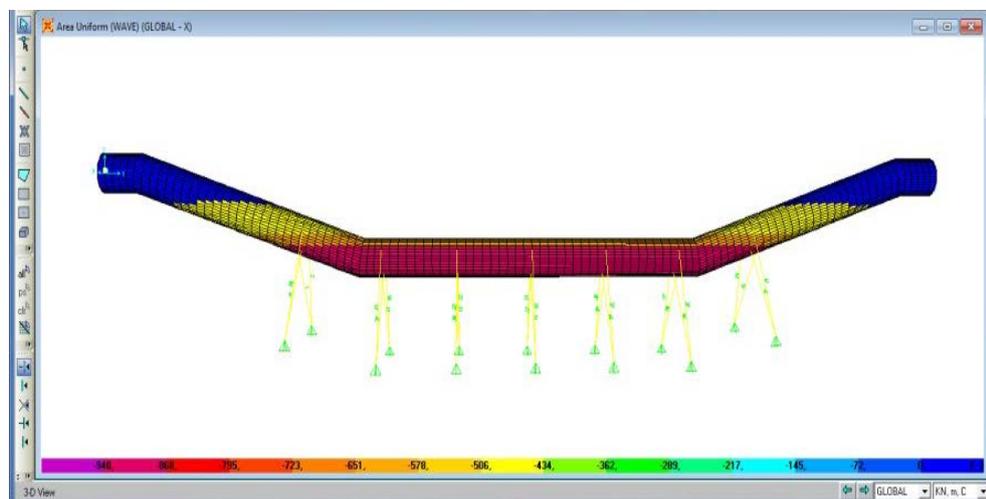
### 3.5 Analisa Struktur Menggunakan SAP2000

Program SAP2000 digunakan untuk memperoleh gaya-gaya aksial kabel dan tegangan yang terjadi di badan pipa akibat snap loading.

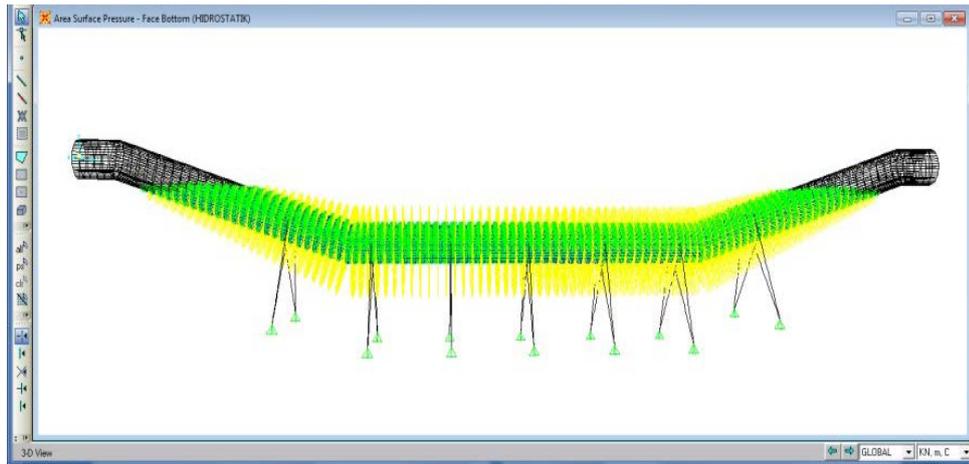


**Gambar 3.11** Model SFT

Hasil input beban gelombang dan arus secara manual pada SAP 2000 dapat dilihat pada gambar berikut ini :



**Gambar 3.12** Hasil *Input* Beban Gelombang dan Arus Secara Manual Pada SAP 2000 Pada Potongan Badan *Tunnel*



**Gambar 3.13** Hasil *input* beban hidrostatis

Beban hidrostatis yang telah dimasukkan, sudah otomatis termasuk gaya *bouyancy*. Karena selisih dari gaya ke atas dan ke bawah pada beban hidrostatis merupakan gaya *bouyancy*. Dari hasil analisa struktur SFT dengan SAP 2000 diperoleh tegangan pada pelat dinding, gaya aksial kabel, reaksi perletakan, displacement maksimum, dan natural frekuensi SFT seperti ditunjukkan pada Tabel 3.6 sampai Tabel 3.9.

**Tabel 3.6** Tegangan pada pelat dinding SFT

KOMBINASI	Tegangan (Mpa)		Tegangan ijin (Mpa)	Keterangan
Kombinasi 1 (D+BY+HS+W)	S11	-127,250	273,33	OK
	S22	-115,371	273,33	OK
	S12	58,051	164	OK
Kombinasi 2 (D+L+BY+HS+W)	S11	-110,438	273,33	OK
	S22	-98,223	273,33	OK
	S12	50,279	164	OK
Kombinasi 3 (D+BY+HS+W+BL)	S11	-127,463	273,33	OK
	S22	-110,287	273,33	OK
	S12	-55,665	164	OK
Kombinasi 4 (D+L+BY+HS+W+BL)	S11	-110,650	273,33	OK
	S22	-93,139	273,33	OK
	S12	47,920	164	OK

**Tabel 3.7** Gaya aksial kabel SFT

KOMBINASI GAYA	Gaya (ton)	Tegangan (Mpa)	Tegangan ijin (Mpa)
Kombinasi 1	268,4303	341,7761	1860
Kombinasi 2	250,2603	318,6413	1860
Kombinasi 3	254,6991	324,293	1860
Kombinasi 4	236,2565	300,8111	1860

**Tabel 3.8** Reaksi perletakan SFT

KOMBINASI GAYA	Gaya F2 (ton)	Gaya F3 (ton)
Kombinasi 1	-293,7062	-392,3665
Kombinasi 2	-294,0836	-392,8369
Kombinasi 3	-279,6154	-372,9589
Kombinasi 4	-279,974	-373,4069

**Tabel 3.9** Displacement maksimum struktur SFT

Jenis displacement	Displacement		Kombinasi	Displacement ijin (mm)
Translasi (mm)	U1	3,818175	Comb 1	416,6667
	U2	13,87623	Comb 2	416,6667
	U3	21,69783	Comb 1	416,6667
Rotasi (radians)	R1	0,032294	Comb 3	-
	R2	0,001539	Comb 3	-
	R3	0,001922	Comb 3	-

**Tabel 3.10** Natural frequencies and period of the SFT

Mode	Period Sec	Frequency Cyc/sec
1	0,135223	7,3952
2	0,132416	7,5519
3	0,124596	8,026
4	0,106154	9,4203
5	0,083199	12,019
6	0,076886	13,006
7	0,07461	13,403
8	0,065567	15,252
9	0,059746	16,737
10	0,056404	17,729
11	0,053157	18,812
12	0,052135	19,181

### **3.6 Pemodelan Struktur SFT Menggunakan Program Bantu ABAQUS**

Analisa pemodelan yang dibuat, dianalisa dan dimodelkan menggunakan program bantu Abaqus. Dalam pemodelan yang dilakukan mengacu kepada *prototype* SFT yang akan diaplikasikan. Berikut tahapan pemodelan struktur:

1. Pembuatan model SFT. Model dibuat realistik (ukuran sebenarnya dilapangan).
2. Penentuan tipe elemen badan SFT dan kabel disesuaikan dengan program bantu, mempertimbangkan kondisi aktual.
3. Memodelkan analisa efektif tiap tinjauan berdasarkan sudut inklinasi kabel memodelkan struktur efektif.

Pada studi ini akan menganalisis konfigurasi posisi kabel dengan berbagai variasi sudut inklinasi. Konfigurasi posisi kabel dapat dilihat pada gambar 3.8. Berdasarkan analisa numerik yang dibuat, diharapkan didapat konfigurasi posisi kabel yang efektif. Bukan hanya dari segi kemudahan aplikasi pelaksanaan dilapangan ataupun dari dimensi serta kemampuan menahan struktur SFT akan tetapi termasuk juga dari faktor biaya yang diharapkan lebih ekonomis.

Analisa dengan menggunakan Abaqus diharapkan dapat menghasilkan nilai yang menyerupai nilai yang terjadi pada *prototype* nantinya, hal tersebut dikontrol dengan hasil pemodelan dengan program bantu SAP2000 yang dibuat. Sehingga menjadi gambaran awal untuk diteliti lebih lanjut.

### **3.7 Verifikasi Pemodelan dengan Penelitian Terdahulu**

Pada tahap ini adalah evaluasi data dengan membandingkan hasil analisa numerik menggunakan software ABAQUS dengan hasil pemodelan SFT dengan *software* SAP2000 yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Kemudian ditabelkan agar terlihat persamaan atau perbedaan antara keduanya. Hasil tersebut diklasifikasikan penyebab terdapatnya persamaan dan perbedaan. Perbandingan pada studi ini hanya melihat perilaku struktur, kabel, dan perletakan dari hasil analisa numerik dengan pemodelan.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB IV**

### **ANALISA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1. Umum**

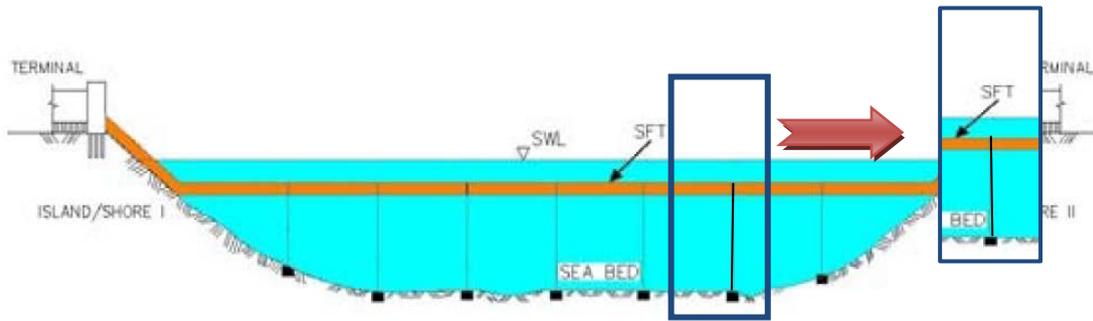
Pada bab ini dibahas terkait permodelan, analisa dan pembahasan hasil SFT (*Submerged Floating Tunnels*) dengan program bantu yang digunakan. Dalam hal ini program bantu yang digunakan adalah *ABAQUS v.6.14*. Permodelan SFT (*Submerged Floating Tunnels*) ini lebih difokuskan pada pengaruh konfigurasi kabel terhadap struktur SFT yang diakibatkan oleh *increment displacement*. Adapun konfigurasi kabel yang digunakan ada sembilan ( 9 ) macam konfigurasi kabel yaitu dari  $0^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $54^\circ$ ,  $63^\circ$  dan  $72^\circ$ .

#### **4.2. Permodelan dengan Program Bantu ABAQUS**

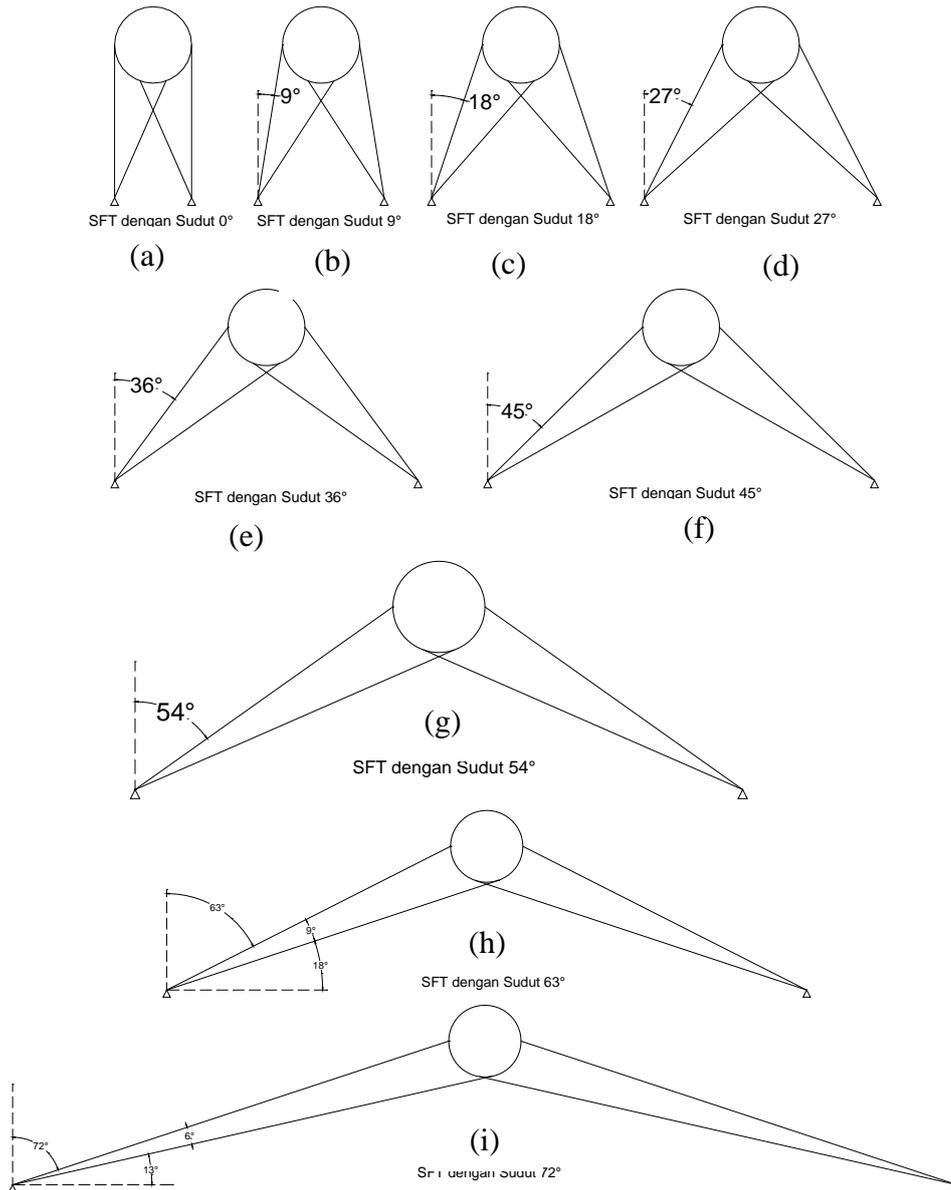
Permodelan SFT (*Submerged Floating Tunnels*) dengan analisa *ABAQUS v.6.14* akan mengacu pada penelitian sebelumnya. Namun dalam hal ini penulis menyajikan dengan salah satu *software finite element* yang berbeda dari penelitian sebelumnya. Program bantu *ABAQUS v6.14* mampu memberikan hasil yang lebih 3D dan lebih detail dalam menganalisa suatu elemen. Dimana elemen bisa dengan mudah diketahui kapan saat terjadi leleh dan *collapse*. Perlu diketahui bahwa dalam permodelan *ABAQUS v.6.14* tersebut hanya akan mengambil salah satu potongan dari bagian panjang struktur SFT yang sebenarnya, serta mampu mewakili struktur SFT secara keseluruhan. berikut data-data yang digunakan dalam permodelan:

##### **4.1.1 Bagian Struktur SFT**

Secara umum SFT (*Submerged Floating Tunnels*) terdiri dari *tunnel*, dinding *tunnel*, rangka *tunnel*, kabel dan pondasi yang terletak di dasar laut. Namun, pada Gambar 4.1 yang merupakan gambar tampak memanjang SFT (*Submerged Floating Tunnels*) dengan panjang 150 m, diperlihatkan bahwa permodelan SFT yang dimodelkan dengan *software*, hanya diambil potongan kecil dari struktur SFT keseluruhan.



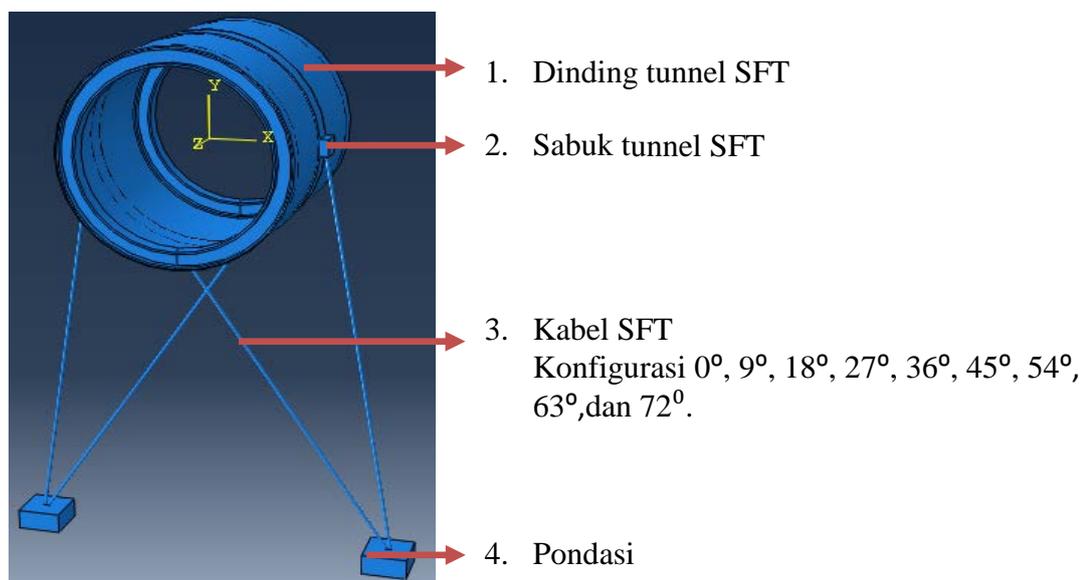
**Gambar 4.1** Tampak Memanjang SFT (Budiman et al, 2016)



**Gambar 4.2** Konfigurasi Sudut Kabel SFT dalam pemodelan ABAQUS, yaitu :  
 (a). SFT dengan sudut  $0^0$ , (b). SFT dengan sudut  $9^0$ , (c). SFT dengan sudut  $18^0$ , (d). SFT dengan sudut  $27^0$ , (e). SFT dengan sudut  $36^0$ , (f). SFT dengan sudut  $45^0$ , (g). SFT dengan sudut  $54^0$ , (h). SFT dengan sudut  $63^0$ , (i). SFT dengan sudut  $72^0$ .

Dengan program bantu ABAQUS v6.14 pemodelan dibuat agar menyerupai perilaku SFT secara keseluruhan. Pada bagian ini, dibahas lebih mendalam yaitu mengenai pengaruh sudut kabel terhadap struktur, dimana struktur diberikan *load* berupa *increment displacement* yang mengenai *tunnel* SFT. Dibawah ini adalah beberapa macam konfigurasi sudut kabel yang dimodelkan dengan analisa ABAQUS v6.14. seperti yang terlihat pada Gambar 4.2, perhitungan sudut dilihat dari sisi luar kabel SFT.

Sebelum kita membahas analisa dari hasil pemodelan tersebut, terlebih dahulu kita mengetahui bagian apa saja yang akan dimodelkan. Berikut tampilan bagian – bagian struktur SFT (*Submerged Floating Tunnels*) menggunakan program bantu ABAQUS v6.14.



**Gambar 4.3** Pemodelan Struktur SFT dengan Program Bantu

#### 4.1.2 Data – Data Struktur SFT dengan Program Bantu ABAQUS

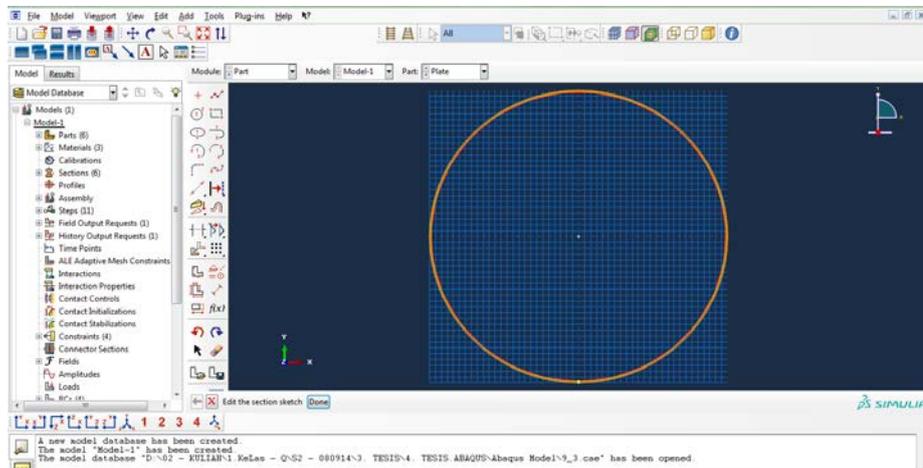
Berdasarkan penelitian sebelumnya, didapatkan bahwa *tunnel* SFT berdiameter 3 – 5 meter, namun dalam hal ini yang digunakan adalah 5 meter. Dinding *tunnel* SFT setebal 12 mm yang terdiri dari baja WF longitudinal dan transversal serta kabel SFT berdiameter 15mm (Budiman et al, 2016). Dalam hal ini WF (BJ41) yang digunakan WF 250.175.7.11 (Komara et al, 2014). Tipe kabel menggunakan *strand* dengan diameter 15mm.

### 4.3. Hal – Hal yang Perlu Diperhatikan dalam Pemodelan

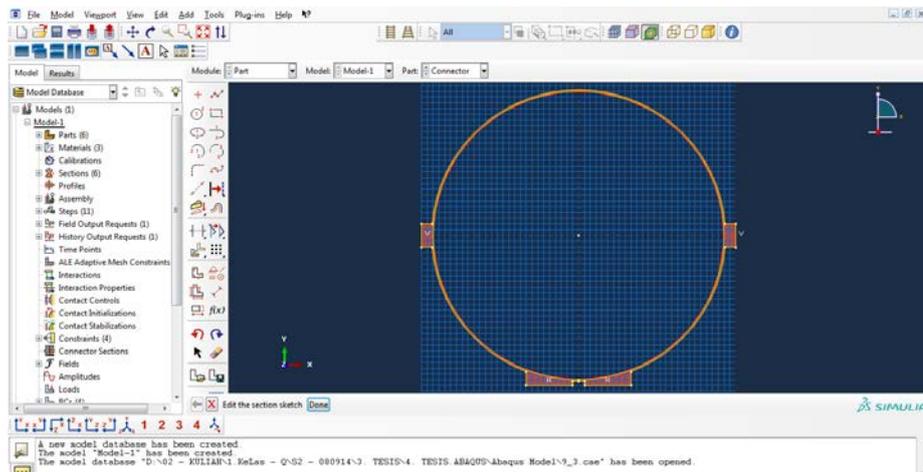
Beberapa hal yang harus menjadi perhatian dalam pemodelan SFT (*Submerged Floating Tunnels*) dengan *increment displacement*, berikut penjelasannya :

#### 4.2.1 Permodelan SFT dengan Program Bantu

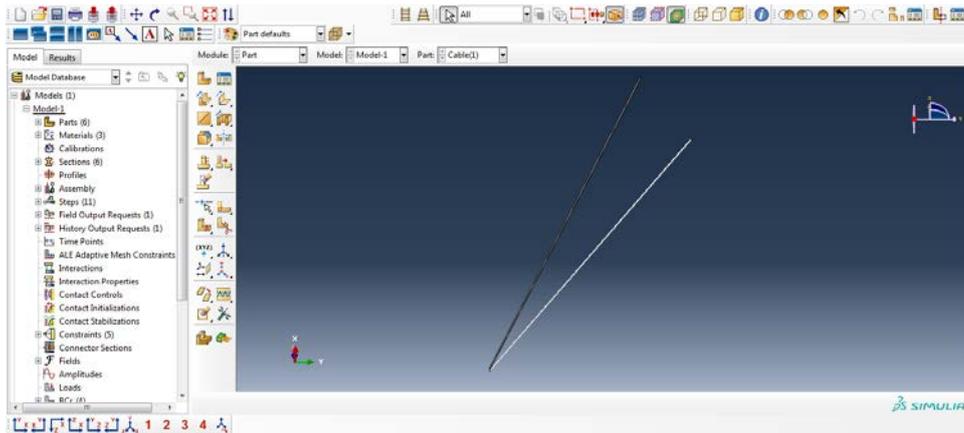
Pada program bantu ini dimodelkan struktur SFT pada bagian *Part*. Pemodelan sesuai pada sub bab 4.1.1 yaitu dinding tunnel, sabuk, kabel dan pondasi. Dalam hal ini, pemodelan kabel yang dimodelkan sesuai Gambar 4.2. Sedangkan untuk pemodelan yang lainnya sesuai penjelasan pada sub bab 4.1.2, berikut pemodelannya :



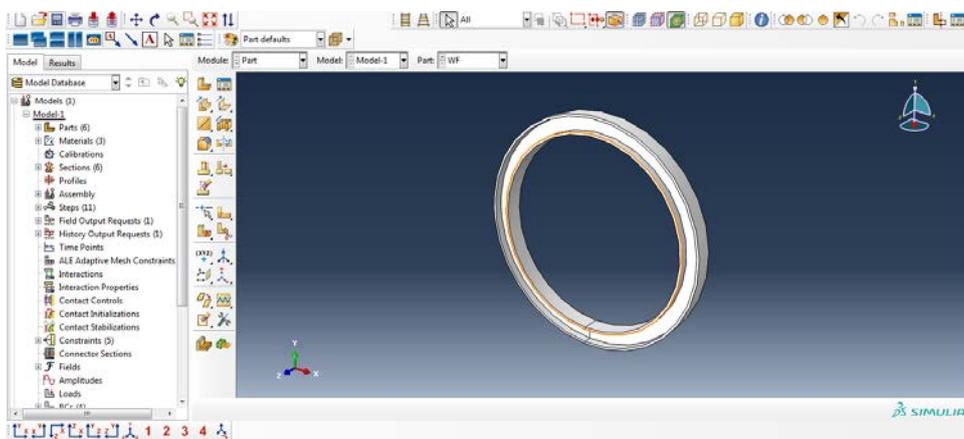
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 4.4** Pemodelan SFT dengan ABAQUS (a) dinding *Tunnel*, (b) Sabuk, (c) kabel dan (d) WF pada *Part*

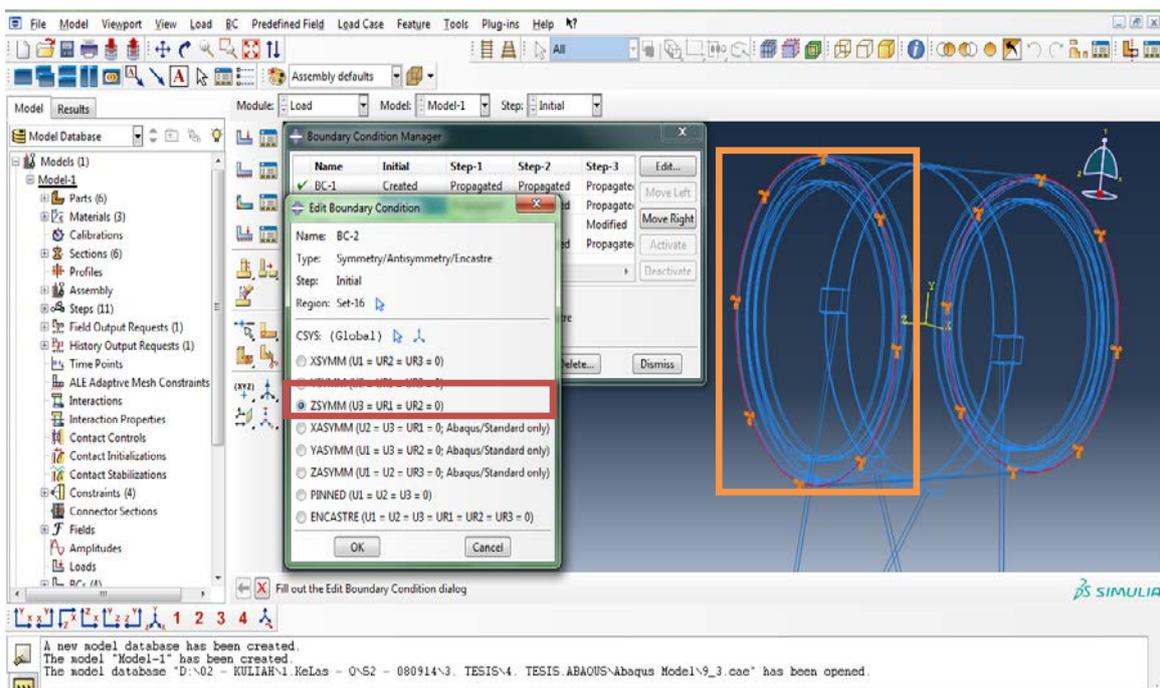
Kemudian pada bagian *Load*, diberi *Boundary Condition* sesuai dengan pemodelan yang telah dibahas diatas, yaitu pemodelan yang akan mewakili struktur SFT secara keseluruhan.

#### 4.2.2 Increment Displacement Pada SFT

Pada bagian *Load*, Struktur pondasi pada dasar laut dimodelkan dengan perletakan sendi atau *pinned*, sedangkan pada bagian dinding struktur SFT dimodelkan agar tidak mengalami perpindahan atau *displacement* pada bagian memanjang SFT. Yaitu dengan cara mengunci bagian dinding *tunnel*, kemudian pada bagian dinding *tunnel* dan sabuk akan diberi *increment displacement*.

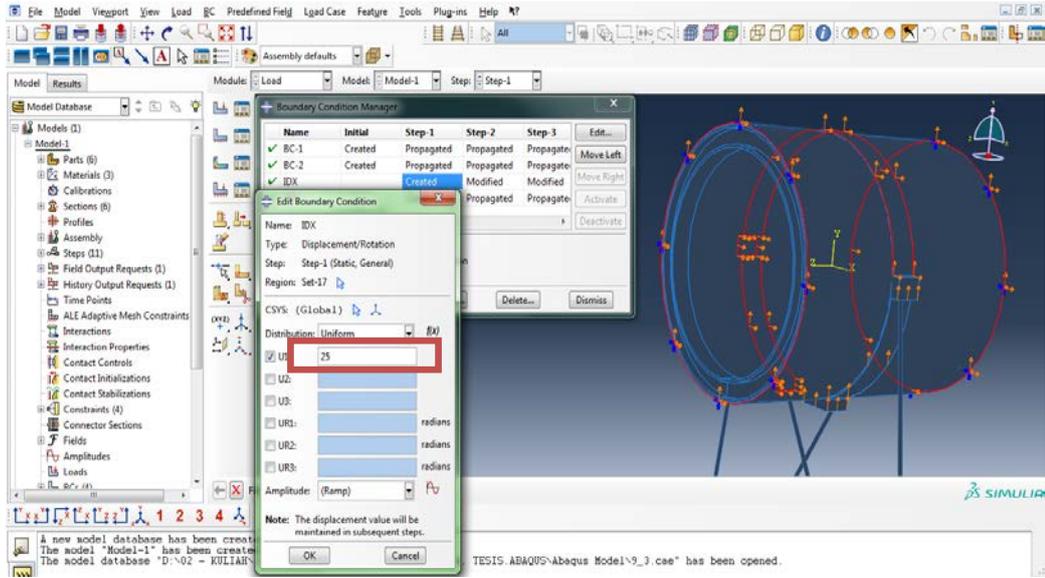
Yang mana dalam hal ini dilakukan langkah *trial*, pada bagian *Step* dilakukan percobaan, berapa *increment displacement* yang akan digunakan dalam meng-*input* beban pada pemodelan tersebut. Setelah dilakukan *trial increment displacement*, didapatkan bahwa 25 mm sampai 250 mm digunakan sebagai *load*, sehingga dimungkinkan struktur mengalami leleh. Berikut langkah langkah input *increment displacement*.

Pada Gambar 4.5 dibawah ini merupakan penjelasan bagaimana meng-*input boundary condition* (perletakan pada dinding *tunnel*) dan bagaimana memasukkan beban terhadap pemodelan tersebut. Berikut penjelasannya.

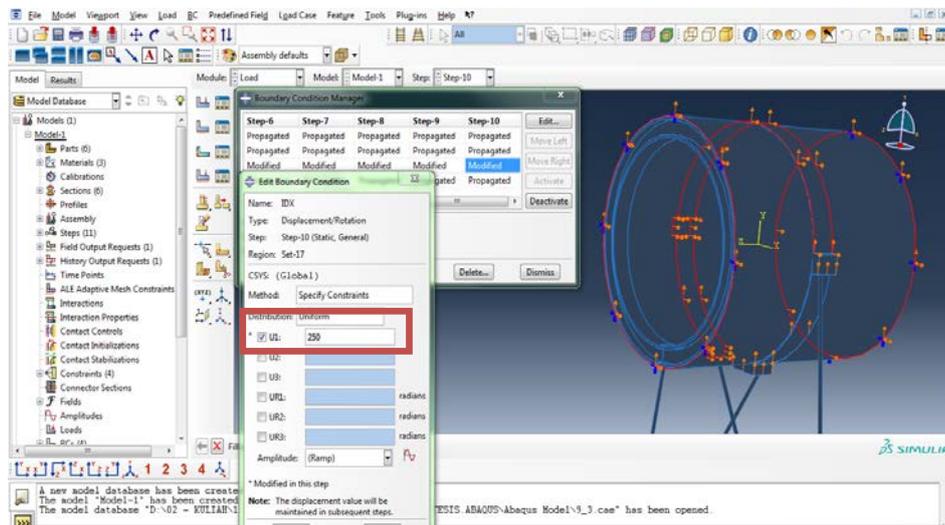


**Gambar 4.5** Pemodelan Perletakan Dinding Tunnel Pada Bagian *Load*

Terlihat pada Gambar 4.5 bahwa dinding *tunnel* dimodelkan bahwa tidak akan terjadi *displacement* kearah memanjang ( $U_3$ ) struktur SFT.



(a)



(b)

**Gambar 4.6** Input Increment Displacement Tunnel Pada Bagian *Load SFT*, (a) *Increment displacement* pada *Step 1*, (b) *Increment displacement* pada *Step 10*

Dari Gambar 4.6 terlihat bahwa struktur diberi *increment displacement* ke arah X (U1), arah horizontal tegak lurus *tunnel SFT* sebesar 25mm – 250mm dan arah Y (U2), arah vertikal tegak lurus *tunnel SFT* yaitu sebesar 7.5 mm. Kemudian dilakukan *meshing* pada seluruh pemodelan *SFT*, agar pada saat dilakukan *running job* dapat diketahui bagian struktur *SFT* yang mengalami leleh akibat *increment displacement* dan seberapa besar nilai tegangan dan perpindahan yang dihasilkan. *Increment displacement* akan

mengakibatkan struktur mengalami tegangan dan perpindahan terhadap struktur. Analisa mengenai pengaruh sudut kabel pada SFT dibahas pada sub bab berikutnya.

#### 4.4. Analisa Tegangan pada Kabel SFT

Didapat dari penjelasan pada sub bab 4.2.2 tentang *input load increment displacement* dan nilai besaran *increment displacement* yang diberikan pada pemodelan SFT, disimpulkan bahwa adanya pengaruh posisi sudut kabel terhadap struktur SFT yang diakibatkan oleh *increment displacement* yang menyebabkan terjadinya tegangan pada struktur SFT. Berikut hasil tegangan yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 dibawah ini :

**Tabel 4.1** Tegangan kabel (S11) akibat *Increment Displacement*

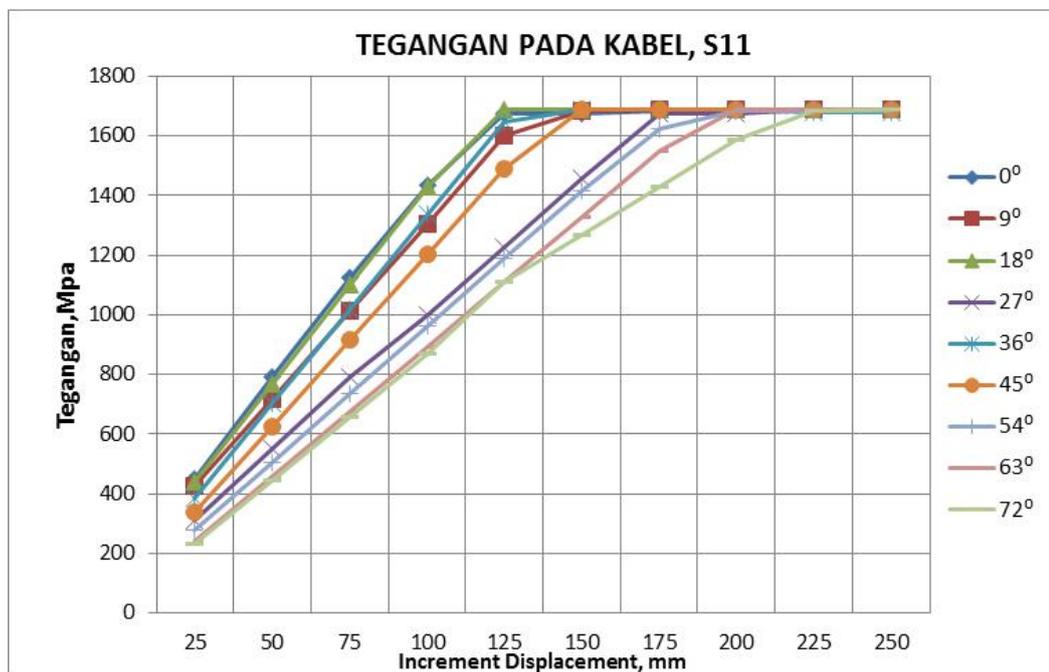
Sudut	Increment Displacement (mm)									
	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
0°	450.761	790.945	1123.15	1435.3	1675.21	1675.21	1685.21	1685.21	1689.91	1690
9°	424.847	718.843	1012.84	1306.84	1600.83	1682.81	1689.91	1689.91	1689.91	1690
18°	439.245	769.804	1100.38	1430.95	1689.91	1689.91	1689.91	1689.91	1689.91	1690
27°	309.767	553.267	790.766	998.266	1227.76	1459.59	1674.01	1674.46	1688.85	1690
36°	385.033	702.648	1020.26	1337.88	1645.46	1689.91	1689.91	1689.91	1680.91	1681
45°	337.599	625.945	914.291	1202.64	1490.98	1686.87	1689.68	1689.91	1689.91	1690
54°	277.00	505.00	734.00	962.00	1190.00	1418.00	1625.00	1684.00	1684.00	1684
63°	239.828	457.929	676.03	894.131	1112.23	1330.33	1548.43	1689.91	1689.91	1690
72°	232.78	444.49	657.50	872.33	1108.58	1268.18	1431.21	1585.24	1684.81	1688

**Tabel 4.2** Tegangan kabel (S22) akibat *Increment Displacement*

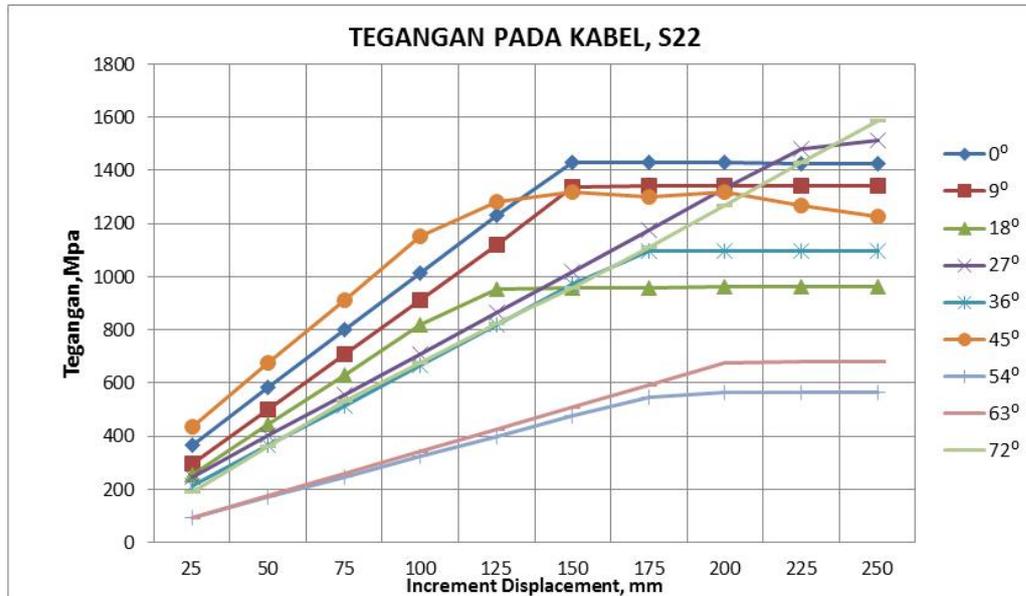
Sudut	Increment Displacement (mm)									
	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
0°	365.405	582.068	798.73	1015.39	1232.05	1430.22	1431.05	1428.16	1427.28	1427
9°	295.29	501.331	707.371	913.412	1119.45	1337.02	1343.37	1343.37	1340.37	1340
18°	254.492	442.598	630.705	818.812	953.255	958.637	959.75	960.563	961.251	962
27°	246.795	400.954	555.113	709.273	863.432	1019.44	1176.73	1334.05	1480.96	1513
36°	213.444	364.708	515.972	667.237	818.527	971.72	1096.82	1096.82	1096.82	1097
45°	436.598	675.155	913.71	1152.27	1280.18	1318.37	1301.63	1319.22	1266.85	1228
54°	93.200	170.000	246.000	323.000	400.000	476.000	546.000	565.700	565.807	566
63°	91.7345	175.311	258.889	342.466	426.043	509.62	593.198	676.254	681.281	681
72°	188.356	359.658	532.055	675.16	822.435	960.382	1108.58	1268.18	1431.21	1585

Dari Tabel 4.1 dan 4.2 diatas, didapat tegangan dengan nilai yang terlihat pada S11 berdasarkan kordinat sumbu x yaitu arah horizontal tegak lurus *tunnel* SFT, sedangkan S22 berdasarkan sumbu y yaitu arah vertikal tegak lurus *tunnel* SFT. Tegangan terbesar disebabkan oleh *increment displacement* kearah x yang terjadi cukup besar untuk mempengaruhi struktur. Jika dilihat pada Table 4.1, semakin tinggi nilai *increment displacement*-nya, semakin tinggi pula nilai tegangan yang terjadi. Begitu pula jika dilihat dari penambahan sudut yang terdapat pada Tabel 4.1, semakin besar sudut kabel SFT, semakin kecil nilai tegangan yang dihasilkan.

Seperti halnya jika diperhatikan pada Tabel 4.2, semakin tinggi nilai *increment displacement* – nya, semakin tinggi pula nilai tegangan yang dihasilkan. Namun jika kita lihat dari sisi penambahan sudut inklinasi kabel SFT, nilai tegangan S22 semakin kecil. Dari Gambar 4.7 dibawah ini dapat digambarkan seberapa besar pengaruh sudut kabel terhadap tegangan yang terjadi pada struktur SFT.



**Gambar 4.7** Tegangan (S11) yang Terjadi Akibat *Increment Displacement* arah x



**Gambar 4.8** Tegangan (S22) yang Terjadi Akibat *Increment Displacement* arah y

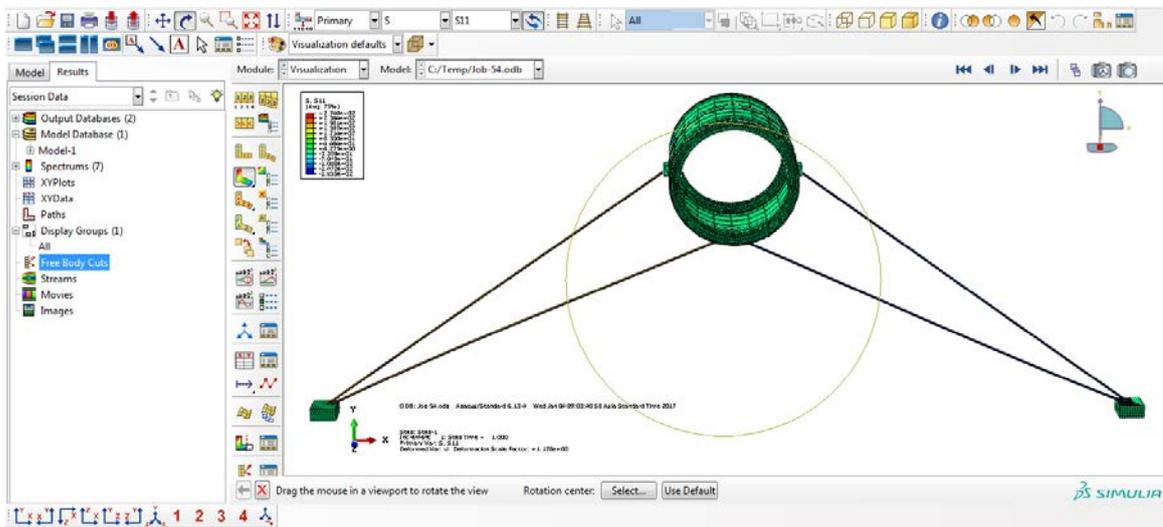
Pada Gambar 4.7 untuk analisa tegangan yang terjadi akibat *increment displacement* diambil dari kabel yang terletak pada bagian sambungan antara kabel dan sabuk. Pada area tersebut struktur mengalami tegangan maksimum. Pada beberapa konfigurasi diatas, konfigurasi 72° memberikan nilai tegangan yang relatif lebih kecil dari pada konfigurasi yang lain. Pada tabel tersebut, warna menyesuaikan dengan indeks pada tabel, didapat bahwa tegangan yang relatif kecil terjadi karena kondisi *tunnel* SFT dengan konfigurasi kabel 72° memberikan kekangan yang besar pada arah x, sehingga pada saat menerima *increment displacement*, kabel mampu menahan struktur dalam menerima tarik kearah x.

Sedangkan jika diperhatikan pada Gambar 4.8 untuk tegangan pada arah y (S22), sudut inklinasi kabel 54° dan 63° menghasilkan nilai yang kecil dibandingkan dengan konfigurasi sudut inklinasi kabel yang lain, hal ini terlihat bahwa sudut inklinasi pada kabel 54° dan 63° mampu menahan struktur saat diberikan beban kearah y. Sedangkan, sudut inklinasi kabel 72° menghasilkan nilai yang relatif lebih besar dari pada sudut 54° dan 63° karena semakin besar sudut yang diberikan, kekangan untuk arah y pada struktur SFT semakin kecil, tetapi mampu memberikan kekangan yang sangat besar pada arah x.

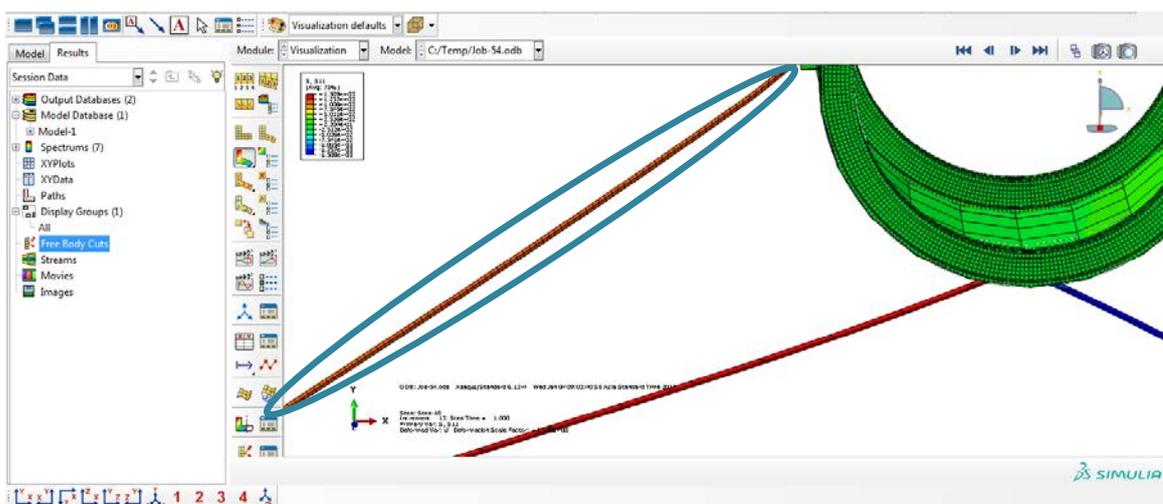
Terlihat pula pada Gambar 4.7 dan 4.8, didapatkan bahwa tegangan yang dihasilkan oleh konfigurasi kabel dengan sudut  $0^\circ$  memberikan nilai yang sangat ekstrim dikarenakan pada konfigurasi tersebut tidak mampu memberikan kekangan pada tunnel saat terjadi beban dari arah x maupun y.

Oleh karena itu, perlu adanya pemberian sudut inklinasi pada kabel lebih besar ( $>$ ) dari pada  $0^\circ$  (nol derajat). Maka dalam hal ini, tidak disarankan menggunakan sudut inklinasi pada kabel  $0^\circ$  dalam memodelkan struktur SFT.

Dibawah ini *view* yang didapat dari abaqus, memperlihatkan tegangan yang terjadi pada kabel SFT akibat *increment displacement*.



**Gambar 4.9** Output Tegangan (S11) Pada Saat *Initial Condition*

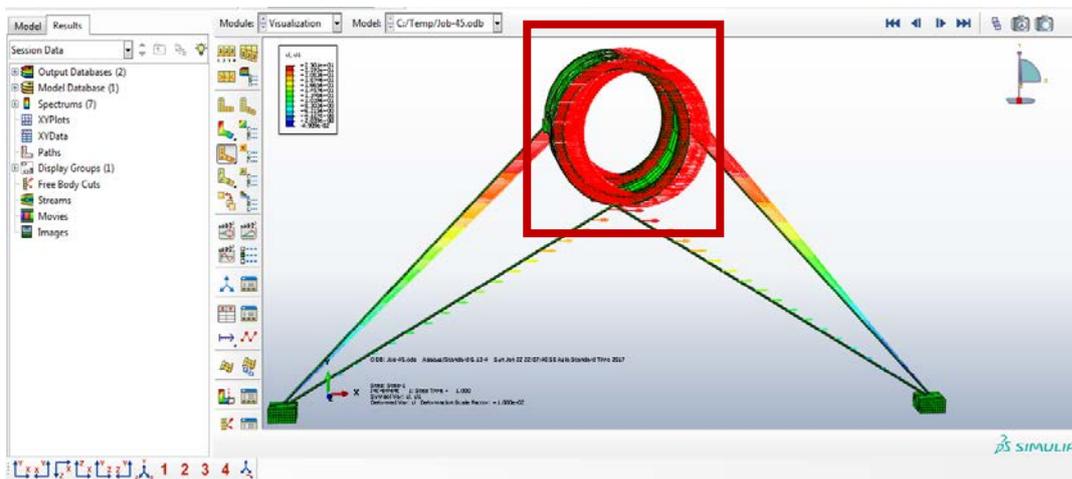


**Gambar 4.10** Output Tegangan (S11) Pada kondisi maksimum

Pada Gambar 4.9 dan 4.10 didapatkan bahwa pada kondisi maksimum struktur mengalami tegangan pada kabel, pada *display* diatas hanya menampilkan hasil analisa tegangan efektif yang dihasilkan oleh konfigurasi kabel dengan sudut 72°. Pada struktur konfigurasi yang lain menunjukkan perilaku sama terhadap struktur, tegangan maksimum dihasilkan pada area kabel.

#### 4.5. Perpindahan Pada Struktur SFT

Nilai perpindahan pada Tabel 4.3 diambil pada bagian sabuk SFT yaitu salah satu bagian sambungan antara dinding *tunnel* dan kabel SFT. Pada bagian sabuk terlihat seberapa besar perpindahan struktur SFT akibat *increment displacement* (Gambar 4.11).



**Gambar 4.11** Perpindahan Yang Terjadi Pada Struktur SFT

Dari berbagai macam konfigurasi kabel SFT, pada Tabel 4.3 didapatkan hasil perpindahan ke arah X (U1), Y (U2) dan Z (U3). Nilai U1 yaitu perpindahan yang terjadi akibat *increment displacement* arah x atau arah horizontal *tunnel*, tegak lurus struktur SFT. Dan nilai U2 yaitu perpindahan yang terjadi pada arah y atau arah vertikal *tunnel*, sedangkan nilai U3 yaitu perpindahan yang terjadi pada arah z atau arah memanjang *tunnel* SFT.

**Tabel 4.3** Perpindahan pada Struktur akibat *Increment Displacement*

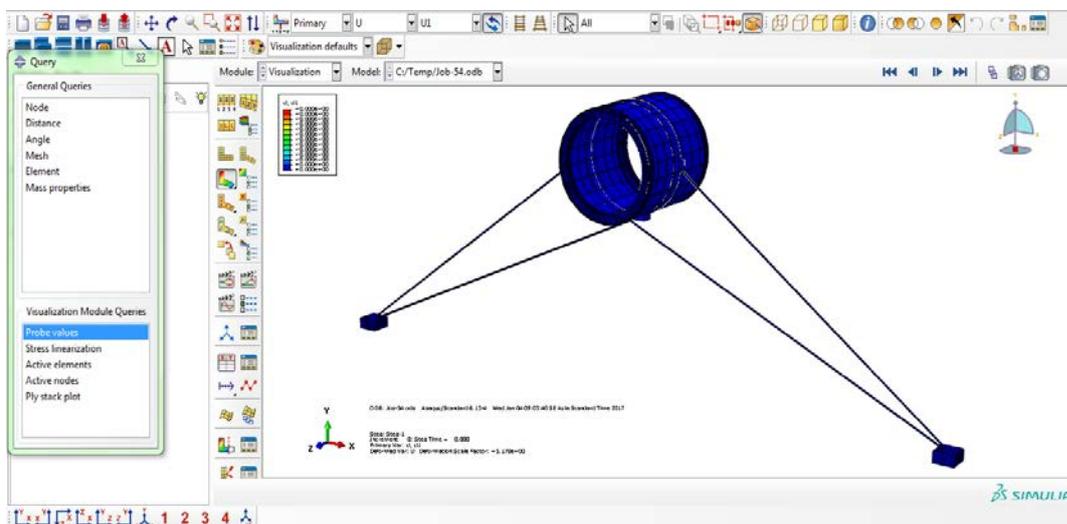
**x**

Terlihat pada Tabel 4.3 bahwa dari berbagai macam konfigurasi kabel SFT, konfigurasi dengan sudut 54°, 63°, dan 72° memiliki nilai *displacement* yang paling kecil yaitu sebesar 24,9946 – 25,000

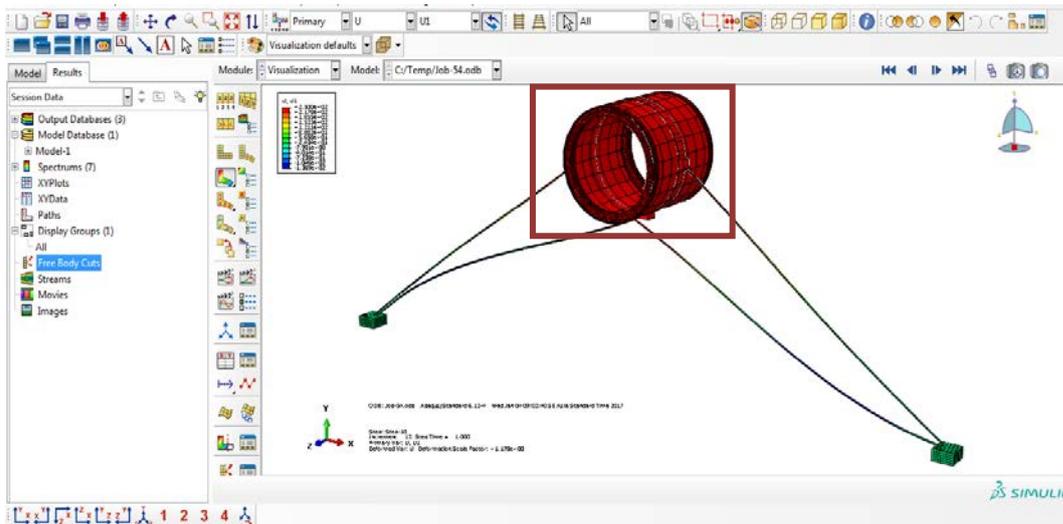
dibandingkan konfigurasi sudut lainnya. Hal ini terjadi dikarenakan konfigurasi dengan sudut  $54^\circ$ ,  $63^\circ$  dan  $72^\circ$  memiliki kekangan yang baik dalam menerima *increment displacement* dari arah x (U1) daripada konfigurasi lainnya. Sehingga struktur relatif stabil dalam menerima *increment displacement* kearah x (U1). Namun jika kita perhatikan nilai U1 dan U2 untuk ketiga konfigurasi sudut ( $54^\circ$ ,  $63^\circ$  dan  $72^\circ$ ) terjadi peningkatan nilai perpindahan, dan didapat bahwa konfigurasi sudut  $54^\circ$  memiliki nilai yang paling kecil dibandingkan konfigurasi sudut  $63^\circ$  dan  $72^\circ$ . Maka dapat diambil kesimpulan bahwa konfigurasi  $54^\circ$  merupakan konfigurasi yang efektif untuk digunakan dalam pemodelan struktur SFT.

Sedangkan pada konfigurasi  $0^\circ$  tidak disarankan dalam pemodelan struktur SFT dikarenakan perpindahan yang diakibatkan oleh *increment displacement* yang diberikan, menghasilkan perpindahan yang sangat besar terhadap struktur yaitu sebesar 28,101, Sehingga berbahaya dalam aplikasinya. Dari penjelasan paragraf diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa pemberian sudut inklinasi kabel yaitu  $54^\circ$  cukup memberikan dampak yang lebih stabil terhadap struktur saat menerima *increment displacement* yang diberikan, khususnya ke arah x atau arah horizontal, tegak lurus struktur SFT (*Submerged Floating Tunnels*).

Berikut perpindahan yang ditampilkan *ABAQUS v.6.14* untuk konfigurasi  $54^\circ$  ditampilkan pada Gambar 4.12 dan 4.13. Dari gambar terlihat warna merah menandakan bahwa dinding *tunnel* mengalami perpindahan pada kondisi ekstrim.



**Gambar 4.12** Perpindahan (U1) pada Tunnel pada *Initial Condition*



**Gambar 4.13** Perpindahan (U1) pada Tunnel pada Kondisi Maksimum

#### 4.6. Verifikasi dengan Penelitian Sebelumnya

Berdasarkan penelitian sebelumnya dengan menggunakan program bantu *software* SAP2000, disampaikan bahwa defleksi terbesar disebabkan oleh U1 yang dipengaruhi oleh efek gelombang dan arus dimana menimpa *tunnel* SFT yang sangat besar, sehingga *output* SAP2000 seperti pada penelitian tersebut disebutkan defleksi maupun tegangan terbesar terjadi pada konfigurasi posisi kabel dengan sudut inklinasi  $0^\circ$  dan defleksi terkecil yaitu konfigurasi posisi kabel dengan sudut inklinasi sudut  $54^\circ$ .

Dengan program bantu *ABAQUS v.6.14* didapatkan tegangan pada sub bab 4.4 Tabel 4.1 dan 4.2 serta defleksi terkecil pada sub bab 4.5 Tabel 4.3 dihasilkan oleh konfigurasi kabel dengan sudut  $54^\circ$ . Kedua program bantu *finite element* diatas baik SAP2000 maupun ABAQUS v6.14 memberikan hasil bahwa konfigurasi dengan sudut  $54^\circ$  merupakan konfigurasi efektif dalam pemodelan SFT (*Submerged Floating Tunnels*).

Berikut parameter yang dapat dilihat dari perbandingan hasil kedua *software* tersebut dengan konfigurasi sudut inklinasi kabel seperti pada gambar 4.2: **Tabel 4.4** Verifikasi Output SAP2000 dan ABAQUS terhadap Tegangan struktur.

Konfigurasi Posisi kabel	SAP2000 $\sigma$ (Mpa)	ABAQUS $\sigma$ (Mpa)	Selisih	$\sigma$ ijin Mpa	Keterangan
Kabel dengan Sudut $0^0$	1208.99	1113.73	95.26	1680	OK
Kabel dengan Sudut $9^0$	853.80	1024.14	170.33	1680	OK
Kabel dengan Sudut $18^0$	622.76	790.17	167.41	1680	OK
Kabel dengan Sudut $27^0$	507.20	930.02	422.82	1680	OK
Kabel dengan Sudut $36^0$	437.45	793.89	356.44	1680	OK
Kabel dengan Sudut $45^0$	410.88	1089.15	678.27	1680	OK
Kabel dengan Sudut $54^0$	384.93	395.16	10.23	1680	OK

Dari tabel 4.4 didapat bahwa *output* yang dihasilkan oleh SAP2000 dan ABAQUS v.6.14 memiliki selisih yang sangat kecil, hal ini dikarenakan adanya perbedaan BWR, pondasi dan element yang digunakan dalam pemodelan SFT pada program bantu yang digunakan.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Kesimpulan dari studi ini diambil berdasarkan pengaruh konfigurasi posisi kabel terhadap struktur dan pemilihan model efektif struktur dari analisa konfigurasi posisi kabel. Maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil *running* ABAQUS v6.14 didapatkan bahwa konfigurasi sudut kabel  $54^0$  merupakan konfigurasi yang efektif dalam memodelkan SFT.
2. Pada ABAQUS v6.14 memodelkan SFT hanya bagian potongan dari SFT, tapi memberikan perilaku struktur yang mewakili struktur secara keseluruhan.
3. Pemberian sudut inklinasi kabel  $54^0$ , memberikan nilai tegangan dan perpindahan yang dihasilkan relatif lebih kecil, dikarenakan kabel mampu mengekang *tunnel* SFT baik pada arah horizontal maupun vertikal *tunnel* SFT. Berbeda halnya dengan sudut inklinasi  $0^0$ , tidak mampu mengekang *tunnel* pada saat terjadi beban. Maka, sangat perlu adanya pemberian sudut pada kabel SFT.

#### 5.2. Saran

Saran yang dituangkan dalam studi ini dapat digunakan atau dikembangkan yaitu Pemodelan dengan menggunakan ABAQUS v6.14 sebaiknya menggunakan *meshing* dengan *seeds* yang relative kecil, agar nilai yang dihasilkan semakin detail.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR PUSTAKA

- ABAQUS. 2004. "ABAQUS Analysis User's Manual". ABAQUS Inc.
- Budiman, Ery., Wahyuni, Endah., Raka, I Gusti Putu., Suswanto, Budi. 2016. **Conceptual Study Of Submerged Pipeline Using Submerged Floating Tunnel**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Faggiano. 2010. **Cable Supported Immersed Inversed Bridge: A challenging proposal**. Itali : University of Naples Federico.
- Jackobsen, Bernt. 2010. **Design of the Submerged Floating Tunnel operating under various conditions**. Norway : Cowi AS, Grenseveien 88, 0605 Oslo.
- Martinelli, Luca. 2011. **A numerical procedure for simulating the multi-support seismic response of submerged floating tunnels anchored by cables**. Italy : University of Brescia
- Mazzolani, F.M., Faggiano, B., Esposito, M., Martire, G. 2009. **A new challenge for strait crossing : the emmersed cable supporting bridge**. *NSCC2009*.
- Wahyuni, Endah., Komara, Indra. 2014. **Studi Konfigurasi Posisi Kabel Submerged Floating Tunnel**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wahyuni, Endah., Raka, I Gusti Putu., Budiman, Eri. 2012. **Dynamic Behaviour of Submerged Floating Tunnels under Seismic Loadings with Different Cable Configurations**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wahyuni, Endah., Raka, I Gusti Putu., Budiman, Eri. 2012. **Structural Behaviour Of Submerged Floating Tunnels With Different Cable Configurations Under Environmental Loading**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BIODATA PENULIS



Putri Sulung dari tiga bersaudara ini dilahirkan di Sumenep, 16 Desember 1989. Menamatkan pendidikan dasar di SDN Pangarangan V Sumenep pada tahun 1996. Pendidikan lanjut diselesaikan di SMPN 2 Sumenep pada tahun 2005 dan di SMAN 1 Sumenep pada tahun 2008. Pada tahun 2011 mendapatkan gelar Ahli Madya di Jurusan Diploma 3 Teknik Sipil ITS dengan bidang transportasi.

Tak hanya disitu, dikarenakan banyak pihak yang mendorong untuk melanjutkan studi di ITS, akhirnya penulis tertarik untuk melanjutkan studi S2 di tahun 2014. Di awal tahun perkuliahan, penulis mempunyai keinginan untuk mengetahui lebih banyak tentang pemodelan salah satu prasarana transportasi yang sedang hangat dibicarakan, dibawah bimbingan Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D dan Endah Wahyuni, S.T., M.Sc., Ph.D, penulis mampu menyelesaikan studi S2 dengan baik. Penulis dapat dihubungi melalui telepon dan WA di nomor 085731640820 dan email ditaka.fitriyah@gmail.com.