

## **PENENTUAN TEGANGAN *MOORING LINE* SUBMERGED FLOATING TUNNEL (SFT) MELALUI PENGUJIAN MODEL**

Arifin

Pusat Teknologi Rekayasa Industri Maritim - BPPT

Email: [arifinsah03@gmail.com](mailto:arifinsah03@gmail.com)

### **ABSTRACT**

*The relationship between two or more regions separated by water / Strait in Indonesia is dominated by the use of aviation services, ships and bridges. Another alternative infrastructure is underwater tunnel that growing up rapidly which also has many drawbacks. Therefore, technology is needed to get an alternative other infrastructure in the form of a tunnel overpass in water (Submerged Floating Tunnel). SFT Tests conducted in the model test tank in order to determine the magnitude of the tension on the SFT mooring system. Based on the analysis of the test data, it can be determined the maximum tension mooring lines at some selected points. It is known that the mooring line tensions are still below the limit prescribed criteria.*

**Key words :** *Submerged Floating Tunnel, Model Test, Tension, Criteria*

### **ABSTRAK**

Hubungan antara dua wilayah atau lebih yang terpisah dengan perairan/selat di Indonesia lebih didominasi oleh penggunaan jasa penerbangan, kapal laut dan jembatan. Alternatif prasarana yang lain adalah terowongan bawah laut dalam (*undersea tunnel*) berkembang dengan pesat yang juga memiliki banyak kelemahan. Oleh karena itu, diperlukan teknologi untuk mendapatkan alternatif prasarana lainnya yang berupa terowongan layang dalam air (*Submerged Floating Tunnel*). Pengujian model dilakukan di tangki uji guna menentukan besarnya tegangan pada sistem tambat SFT. Berdasarkan pada analisis data hasil pengujian, maka dapat ditentukan tegangan maksimum tali tambat pada beberapa titik yang dipilih. Diketahui bahwa tegangan tersebut masih berada di bawah batas kriteria yang ditentukan.

**Kata Kunci :** *Submerged Floating Tunnel, Pengujian Model, Tegangan Tali Tambat, Kriteria*

### **PENDAHULUAN**

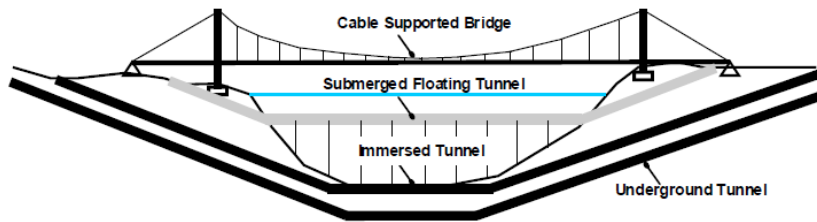
Sebagaimana diketahui bahwa Indonesia merupakan negara yang sebagian besar wilayahnya merupakan perairan dan memiliki ribuan pulau-pulau kecil. Untuk mendukung kehidupan sosial dan mendukung pertumbuhan ekonomi antar beberapa wilayah di kepulauan tersebut sudah barang tentu diperlukan sarana penghubung untuk perpindahan/pergerakan orang dan barang.

Menghubungkan 2 buah daratan yang berseberangan pada suatu danau, sungai atau laut, menjadi tugas utama yang harus dilakukan oleh seorang insinyur sipil, yang merupakan kebutuhan mendasar untuk pengembangan wilayah yang berada di sekitar perairan. Saat ini, isu tersebut masih menjadi bahasan penting yang dibuktikan oleh banyaknya infra struktur besar yang telah atau akan dibangun dalam beberapa tahun terakhir.

Secara umum, ada beberapa pilihan teknologi yang dapat digunakan untuk menghubungkan dua wilayah daratan yang terpisah oleh perairan seperti: Jembatan, terowongan bawah tanah ataupun terowongan yang tenggelam di dasar laut. Kerumitan desain tersebut berhubungan dengan teknologi yang digunakan, dimana semakin besar jarak bentangan maka penggunaan konstruksi penghubung menjadi semakin sulit atau bahkan tidak memungkinkan. Oleh karena itu, dengan adanya kelemahan pada teknologi konvensional tersebut, maka perlu adanya alternatif teknologi.

Salah satu terobosan teknologi yang cukup besar yang diharapkan dapat mengatasi kelemahan teknologi konvensional adalah *Submerged Floating Tunnel* (SFT), dimana idenya didasarkan atas pemanfaatan daya dukung air sesuai Hukum Archimedes, [1]. Dalam kenyataannya, SFT merupakan suatu struktur berbentuk tabung yang ditempatkan di kedalaman tertentu di bawah permukaan air, sehingga beban diam atau beban bergerak diimbangi oleh gaya apung. Adapun

stabilitas arah vertikal dan horisontal dijamin oleh adanya sistem tambat yang memadai sepanjang SFT (Gambar 1).



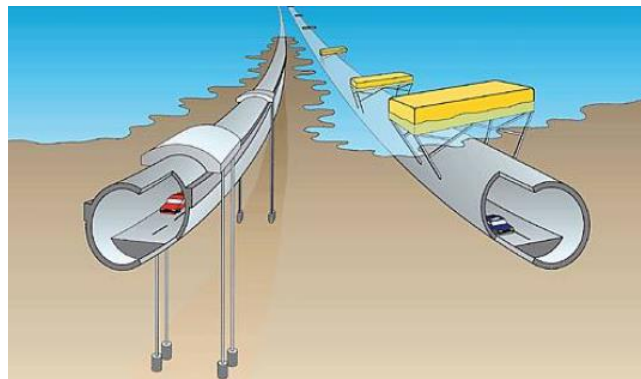
Gambar 1. Beberapa Pilihan Teknologi Struktur Penghubung Antar Daratan

Prototipe SFT yang pertama di dunia, [2] merupakan hasil kerjasama Sino-Italian dan mulai diproduksi dan dirakit modulnya di Qiandao (RRC).

## TINJAUAN PUSTAKA

### Konsep SFT

*Submerged Floating Tunnel* (SFT) atau lebih dikenal dengan sebutan Jembatan Archimedes, pada dasarnya terdiri atas struktur berbentuk tabung yang terapung pada kedalaman tertentu dari permukaan air, dengan memberikan ruang untuk perlintasan kapal yang lewat di atasnya. Struktur tersebut dipertahankan posisinya pada titik yang direncanakan dengan menggunakan kabel, penegar dan tiang pancang yang dihubungkan ke dasar laut atau bisa juga dihubungkan ke struktur terapung (Gambar 2).



Gambar 2. Sistem Pengikatan SFT

*Tunnel* tersebut mengalami pembebanan dari berat *tunnel* itu sendiri dan gaya apung *tunnel*. Pada umumnya tunnel direncanakan sedemikian rupa hingga gaya apung yang terjadi mampu mengimbangi gaya berat tunnel. Pada kasus sistem tambat ke dasar laut, maka sistem tambat bisa berupa sistem kabel pra-tegang (*tension legs*). Dengan sistem ini, *displacement tunnel* dan tegangan yang disebabkan oleh beban lingkungan dapat diminimalkan.

Ide SFT lahir di awal abad ke-19 di Norwegia, namun masih terdapat banyak kelemahan pada teknologi SFT, dan perbaikan yang cukup signifikan bisa dirasakan di bidang teknologi bangunan lepas pantai. Demikian halnya dengan perkembangan teknologi *immersed tunnel* juga mengalami perkembangan yang cukup pesat. Salah satu kesamaan antara Struktur SFT dan *Immersed Tunnel* adalah keduanya sama-sama mensyaratkan kedekatan terhadap kebocoran. Namun, dari sisi perilaku dinamis struktur, teknologi SFT masih lebih rumit sehingga diperlukan penelitian-penelitian yang mendalam.

Sebagai salah satu solusi pilihan, SFT memberikan gambaran kelebihan-kelebihan dari sudut pandang konstruksi, ekonomi dan dampak lingkungan. Akan tetapi, hingga saat ini konstruksi nyata dari sebuah SFT masih merupakan tantangan karena masih sangat sedikit negara yang menerapkan teknologi tersebut. Hal ini disebabkan salah satunya oleh tidak tersedianya data hasil pengujian yang dapat memberikan gambaran perilaku nyata sebuah perencanaan SFT secara menyeluruh.

Berdasarkan pertimbangan di atas jelaslah bahwa langkah awal yang diperlukan dalam pengembangan SFT adalah mengumpulkan data untuk mendukung kajian-kajian teoritis dan numerik serta melengkapi data perilaku sebenarnya dari struktur yang sejenis. Celakanya, data-data SFT sebagai hasil suatu penelitian terkait masih sangat sedikit jumlahnya.

### Konfigurasi SFT

Pilihan konfigurasi struktur terowongan dan pendefinisian geometri serta rencana umum dari penampang melintang *Submerged Floating Tunnel* (SFT) merupakan aspek utama dalam perencanaan SFT.

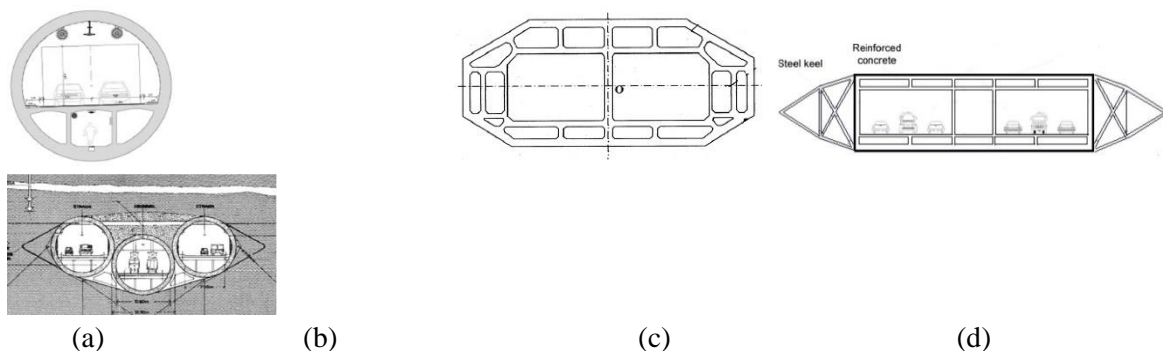
Perencanaan konstruksi terowongan dan geometri SFT harus dibuat berdasarkan pada beberapa kebutuhan sbb:

1. Ukuran penampang melintang SFT sisi dalam harus cukup besar untuk menampung infrastruktur, fasilitas-fasilitas dan peralatan pelengkap (sistem keamanan dan kebakaran, sistem kelistrikan) untuk menjamin operasional terowongan.
2. Konstruksi penampang melintang terowongan harus direncanakan sedemikian rupa hingga mempunyai kekakuan dan kekuatan yang dapat memenuhi kinerja konstruksi dalam hal kemampuan operasi dan keamanan. Terlebih, masalah kekedapan dan daya tahan pakai terowongan harus juga dijamin.
3. Penampang melintang terowongan harus direncanakan sedemikian rupa hingga *buoyancy ratio* (perbandingan antara gaya apung terowongan dengan jumlah berat tetap dan beban dinamis) lebih besar dibanding harga minimum yang ditentukan. Dalam kondisi operasional, perlu diperhitungkan besarnya daya apung cadangan agar sistem tambat tidak kendur akibat beban lingkungan.
4. Semua isu yang berhubungan dengan proses fabrikasi dan penyambungan bagian-bagian terowongan harus dipertimbangkan dalam perencanaan.

Berkenaan dengan perencanaan geometri, bentuk penampang lintang SFT menjadi sangatlah penting. Dalam kenyataannya sifat-sifat geometri penampang SFT sangat mempengaruhi interaksi struktur terhadap fluida yang ada di sekitarnya. Demikian halnya dengan pertimbangan aspek statis dan dinamis serta tahapan produksi modul-modul SFT nantinya.

Konfigurasi geometri penampang SFT dapat berupa, Gambar 3a-3d :

- a. Lingkaran
- b. Poligon atau *elips*
- c. Segi empat
- d. *Circular tube*



Gambar 3a-3d. Bentuk Penampang Melintang SFT

Bentuk penampang (a sebagai bentuk awal SFT ) sering dianggap sebagai bentuk yang memiliki sifat yang cocok dalam kaitannya dengan gaya hidrostatik, [3]. SFT dengan bentuk penampang lingkaran sudah dicoba digunakan di selat Sulafjord Norwegia, [4].

**METODE**

**PENGUJIAN MODEL**

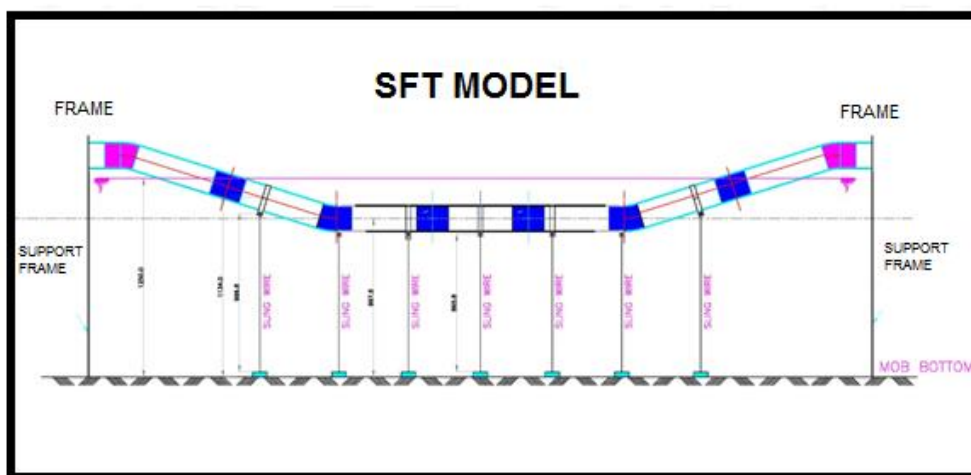
Untuk mensupport kegiatan penelitian, kajian dan desain terowongan layang dalam laut (Submerged Floating Tunnel – SFT) maka dilakukan pengujian model di Laboratorium Hidrodinamika. Untuk pengujian di UPT BPPH, kegiatan pengujian model dilakukan untuk mengukur besaran gaya gaya hidrodinamika yang terjadi pada tali tambat (mooring system) dan struktur SFT.

**Model**

Model dibuat dari bahan pipa PVC dengan skala 1 : 29,7 dengan ukuran utama sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 1. Pada model diberikan tambahan kerangka penegar dari kayu sehingga model cukup rigid saat dilakukan pembebanan seperti terlihat pada gambar 4. Kedua sisi model diberi tutup yang berfungsi sebagai kedapn dan sebagai support untuk pemasangan transducer pada ujung model. Model ditambat dengan sistem mooring yang ditambatkan ke dasar dengan bantuan support frame seperti pada gambar dibawah.

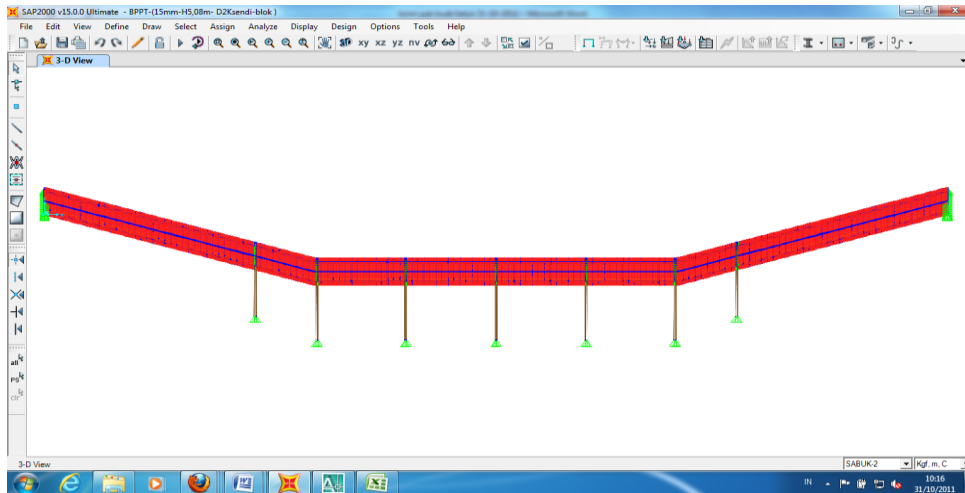
Tabel 1. Ukuran Utama SFT

Besaran	Full Scale	Model
Panjang keseluruhan, L (m)	150	5.05
Diameter SFT, D (m)	5	0.168
Massa SFT	2834	0.106
Gaya Apung	1523	0.057



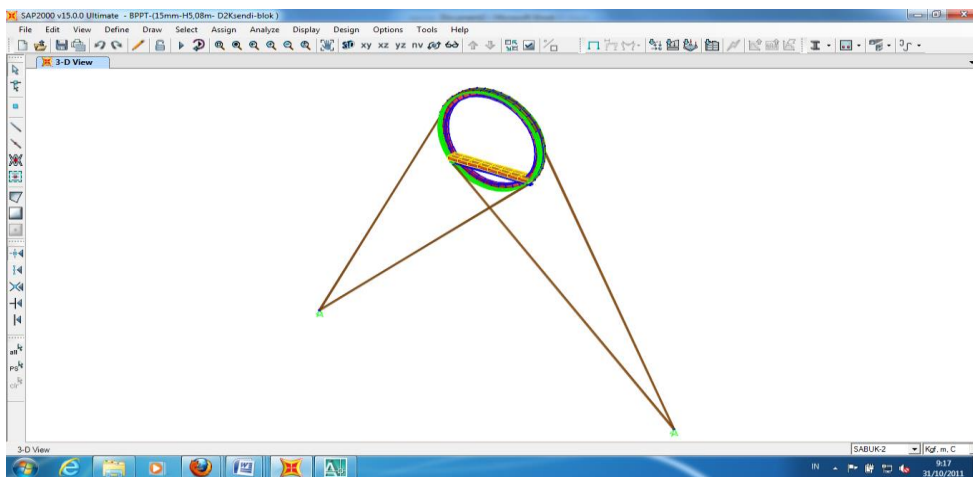
Gambar 4. Model SFT

Konfigurasi bentuk tali tambat yang akan diujikan mengacu ke desain tali tambat yang direncanakan, seperti dijelaskan pada Gambar 5 sebagai berikut.



Gambar 5 Pemodelan Konfigurasi Kabel Tambat SFT

Adapun setup pengujian model bila dilihat dari penampang melintangnya seperti ditunjukkan pada Gambar 6 berikut.

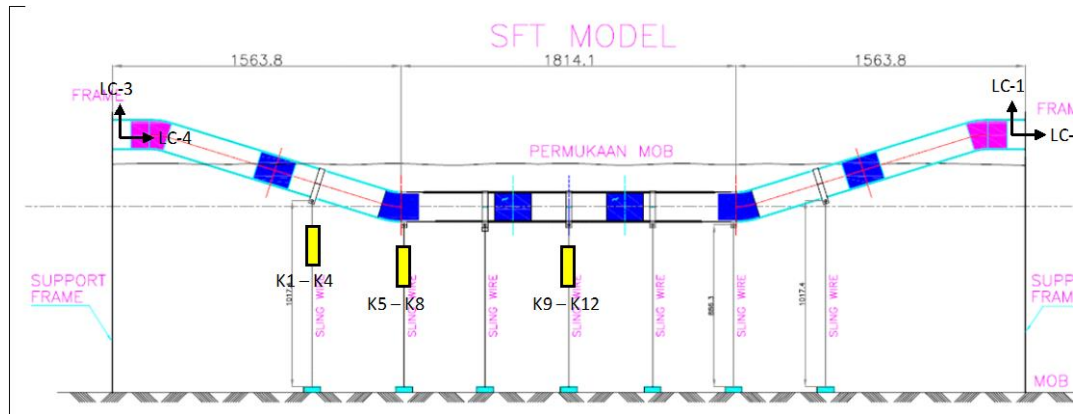


Gambar 6. Penampang Melintang

### ***Tranducer, Load Cells dan Wave Probe***

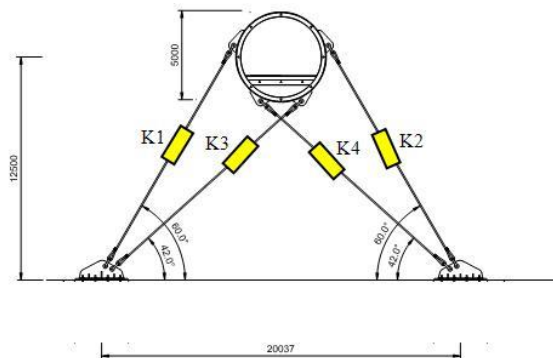
Dalam pengujian model SFT ini, gaya tegangan pada tali tambat diukur dengan menggunakan *tranducer* tipe PVDF. Sedangkan untuk pengukuran gaya-gaya reaksi yang terjadi pada tumpuan digunakan *load cells*. Sensor PVDF digunakan untuk mengukur beban aksial pada *mooring line* adalah sensor berbasis material *piezoelectric*.

Adapun penempatan kedua jenis sensor tersebut sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7 . Penempatan *tranducer* dan *load cell* pada model SFT

Dalam arah melintang, penempatan sensor PVDF sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Penempatan PVDF pada Potongan Melintang Model SFT

Variasi pengujian terdiri dari 2 kasus pembebanan, dengan matriks variasi pengujian sbb :

Tabel 3. Variasi Pengujian Model SFT di MOB

No Kasus	Kondisi	Wave	Model		Prototype	
			Tinggi cm	Periode detik	Tinggi m	Periode detik
1	<i>Free Floating</i>	Wave 1	10.5	2.66	3.12	14.50
2	<i>Free Floating</i>	Wave 2	16.8	3	4.99	22.65
3	Jepit di ujung (Rx, Rz)	Wave 1	10.5	2.66	3.12	14.50
4	Jepit di ujung (Rx, Rz)	Wave 2	16.8	3	4.99	16.35
5	Jepit di ujung (Rz)	Wave 1	10.5	2.66	3.12	14.50
6	Jepit di ujung (Rz)	Wave 2	16.8	3	4.99	16.35

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian model SFT diberikan dalam kondisi skala penuh (full scale). Dengan demikian hasil analisa sudah dikalikan dengan faktor skala yang bersesuaian. Beberapa *tranducer* mengalami kerusakan yaitu K3 dan K4 sehingga pembacaan datanya kurang baik.

### Tegangan Tali Tambat

No. Kasus	Mooring lines											
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
	ton	ton	ton	ton	ton	ton	ton	ton	ton	ton	ton	ton
1	149.48	17.47	16.49	3.59	139.04	28.52	6.59	32.18	37.25	78.41	43.87	89.50
2	147.29	25.50	18.58	5.31	137.82	51.97	3.04	37.34	40.73	76.89	55.92	99.92
3	83.79	27.16	7.08	3.37	73.84	71.69	17.28	21.84	22.48	39.44	27.72	24.58
4	91.67	24.16	6.30	3.87	80.06	66.45	18.24	19.48	24.00	48.08	25.86	20.63
5	99.01	90.23	27.66	3.06	96.81	51.64	12.12	38.44	16.75	94.27	41.18	95.16
6	108.11	89.11	28.22	6.02	103.70	48.56	13.01	36.98	18.05	101.22	41.01	91.15

### Reaksi Tumpuan

No. Kasus	Gaya Reaksi			
	LC1	LC2	LC3	LC4
	ton	ton	ton	ton
1	-	0.00	8.80	11.44
2	-	0.00	40.81	9.42
3	-	2.17	13.17	2.60
4	-	9.38	23.94	2.41
5	-	1.41	12.88	3.53
6	-	6.43	21.64	3.02

**Catatan:**

- LC1, LC3 : Gaya tumpuan arah vertikal  
 LC2, LC 4 : Gaya tumpuan arah longitudinal  
 LC1 tidak tersedia

**KESIMPULAN**

1. Dalam perencanaan *Submerged Floating Tunnel* masih diperlukan lebih banyak data dari hasil penelitian diantaranya adalah data pengujian model.
2. Gaya-gaya tegangan pada sistem tali tambat SFT (K1-K12) dibandingkan dengan *Maximum Breaking Loads* (MBL) dengan menggunakan *Safety Factor* (SF) yang ditentukan sebelumnya. Adapun gaya-gaya LC1-LC4 dapat digunakan untuk merencanakan sistem tumpuan di ujung-ujung SFT.
3. Oleh karena adanya keterbatasan pada pemodelan material SFT di kolam uji, maka perlu ada penelitian lebih lanjut untuk mengetahui besarnya regangan yang terjadi pada SFT akibat beban lingkungan tertentu.

**DAFTAR PUSTAKA**

[1]. Faggiano B., Martire G., Mazzolani F.M. , “*Cable supported immersed inverted bridge: A challenging proposal*”, *Procedia Engineering*, Volume 4, 2010, Pp. 283-291, ISAB-2010, First International Symposium on Archimedes Bridge (ISAB-2010).

[2]. Mazzolani F.M., Landolfo R., Faggiano B., Esposto M., Martire G., Perotti F., Di Pilato M., Barbella G., Fiorentino A.. “*The Archimede’s Bridge Prototype in Qiandao Lake (PR of China). Design Report*”. Contribution of the Italian Team. “Sino-Italian Joint Laboratory of Archimedes Bridge” (SIJLAB), Research project report, 2007.

- [3]. Grantz W. , “*Steel-Shell Immersed Tunnels-Forty Years of Experience*”, Tunneling and Underground Space Technology. Vol.12, No.1, pp.23-31, 1997.
- [4]. Jakobsen B., Haaland P., Haugerud S.A. , “*Crossing the wide and highly exposed Sulaffjord with an SFT*”, Proceedings of the 5th Symposium on Strait Crossings, Trondheim, Norway, 2009.