

Perbandingan Tegangan Geser (*Shear Stress*) Perletakan Elastomer Bearing tipe HDRB, LRB dan NRB Pada Konstruksi *Submerged Floating Tunnel* (SFT)

Eki Irmaya Sari^{1,a}

¹Dosen Teknik Sipil, Politeknik Negeri Fakfak, Papua Barat, Indonesia

^abunayya1924@gmail.com

Abstract - This is the research of the placement of The Submerged Floating Tunnel, particularly those affected by hydrodynamic loads, such as waves and currents. Elastomer chosen as the placement of the SFT as having the ability to rotate (determined by the thickness) and can also be translation horizontally (limited which is also determined by the thickness), therefore it is expected to reduce shear forces and increase the period of the structure that will minimize the forces acting on the SFT structure. The elastomeric rubber bearing placed between the foundation and the piers of the SFT. There are three type of elastomeric bearing being modeled on these research. High Damping Rubber Bearing (HDRB), Lead Rubber Bearing (LRB) and Natural Rubber Bearing (NRB), modeled with the finite element method, Abaqus 6.14, to know how the element analyses of the elastomer and to determine which type is best employed as an additional bearing of the foundation. As the result, from the increment load applied to the elastomer rubber, the maximum shear stress show on the NRB with 105.50 N/mm² while the minimum one show on LRB with 52.22 N/mm².

LRB showed the best rubber quality, both in terms of reducing shear stress, because the LRB has the lead in the middle that serves to energy absorption, so it has the ability to withstand axial and lateral loads better than the two other types.

Keywords: Shear force, SFT, Finite element, Elastomer, Rubber Bearing

Abstrak - Penelitian ini adalah penelitian terhadap perletakan Submerged Floating Tunnel (SFT) khususnya akibat pengaruh beban hidrodinamik, yaitu gelombang dan arus. Elastomer dipilih sebagai perletakan dari SFT karena memiliki kemampuan berotasi (ditentukan oleh ketebalan) dan juga bisa bertranslasi horizontal (terbatas yang juga ditentukan oleh ketebalan), oleh karena itu kemampuannya untuk mengurangi gaya geser dan meningkatkan periode dari struktur akan mampu meminimalisir pengaruh gaya pada struktur SFT. Elastomer bearing ditempatkan diantara pondasi dan tiang dari struktur SFT. Ada tiga tipe elastomer bearing yang dimodelkan pada penelitian ini, yaitu *High Damping Rubber Bearing* (HDRB), *Lead Rubber Bearing* (LRB) dan *Natural Rubber Bearing* (NRB), dimodelkan dengan program bantu finite elemen, Abaqus 6.14, untuk mengetahui bagaimana analisa elemen dari elastomer dan juga untuk menunjukkan tipe mana yang paling baik dipakai

sebagai bantalan tambahan pada struktur pondasi. Hasilnya, dari pembebanan bertahap yang diberikan pada ketiga tipe bearing, menunjukkan bahwa tegangan geser maksimum terjadi pada tipe NRB yaitu 105.50 N/mm², dan tegangan minimum terjadi pada elastomer bearing tipe LRB yakni sebesar 52.22 N/mm². LRB menunjukkan kualitas terbaik dari rubber dalam hal mereduksi tegangan geser disebabkan LRB memiliki Lead (perunggu) di tengahnya yang berfungsi untuk menyerap energy sehingga mampu menahan beban aksial dan lateral jauh lebih baik daripada kedua tipe yang lain.

Kata Kunci : Tegangan Geser, SFT, Finite elemen, Elastomer, Bantalan Karet

I. Pendahuluan

Sebagai Negara kepulauan, Indonesia sangat berkepentingan untuk menghubungkan pulau-pulau yang ada, demi peningkatan pertumbuhan ekonomi serta pemerataan kesejahteraan rakyatnya. Untuk kepentingan tersebut diperlukan infrastruktur yang dapat menjadi alat penghubung antar pulau. Berbicara mengenai alat penghubung antar pulau, prasarana yang tengah berkembang dewasa ini adalah terowongan bawah laut. Salah satu tipe terowongan bawah laut tersebut adalah terowongan layang dalam air atau *Submerged Floating Tunnel* (SFT)

Submerged Floating Tunnel (SFT) adalah konstruksi *tunnel* (terowongan) sebagai pengembangan dari tipe sebelumnya yaitu *immersed tunnel* dan *underground tunnel*. Pada *immersed tunnel* dan *underground tunnel*, badan terowongan tertanam di dasar laut, sementara SFT adalah konsep baru yang digagas untuk melintasi perairan dalam, dimana struktur badan terowongan tidak tertanam di dasar laut, akan

tetapi melayang di dalam air. Konstruksi ini membutuhkan panjang bentang yang relatif lebih pendek dibanding dengan jembatan konvensional dan underground tunnel, sehingga dapat menjadi alternatif yang baik untuk mengurangi volume pekerjaan karena tidak memerlukan tiang-tiang pier dan pondasi tiang seperti halnya yang diperlukan pada konstruksi terowongan di bawah laut lainnya ataupun konstruksi jembatan konvensional di atas permukaan laut [1]

Submerged Floating Tunnel (SFT), sering disebut juga sebagai *Archimedes Bridge*, adalah teknologi inovatif yang memberikan solusi untuk melintasi jalan laut, dengan konstruksi berupa struktur tubular yang mengambang di kedalaman laut tertentu dan distabilkan oleh sebuah sistem angkur yang mengeksplotasi daya dukung yang berasal dari gaya angkat (*bouyancy*) Archimedes [2]. Dengan sistem ini, ada bantuan kekuatan dari pengaruh *uplift* struktur akibat berada dalam air yang disebabkan oleh pengaruh gaya apung [1]

Elemen struktur SFT diklasifikasikan menjadi beberapa bagian sebagai berikut:

1. Tube / badan SFT sebagai elemen yang menyediakan ruang bagi lalu lintas jalan dan atau rel.
2. *Theter* / pengikat SFT yang dijangkarkan pada dasar perairan baik secara vertical atau horizontal ataupun kombinasi keduanya. Disebut *pontoon*, jika menjangkarkan SFT pada permukaan perairan. Disebut *Grafiti anchor* jika menggunakan sistem pengikat yang dijangkarkan pada dasar perairan
3. *Shore connection*, bagian akhir SFT yang menghubungkan SFT dengan daratan. [3]

Telah banyak penelitian yang diarahkan pada pengembangan konsep dari struktur SFT ini, baik yang fokus pada perencanaan badan SFT, medesain angkur penahan badan SFT, sampai merencanakan pondasi untuk struktur SFT, namun sejauh ini belum ada yang meneliti mengenai perletakan yang dipakai pada struktur SFT, khususnya yang dipengaruhi oleh beban hidrodinamik.

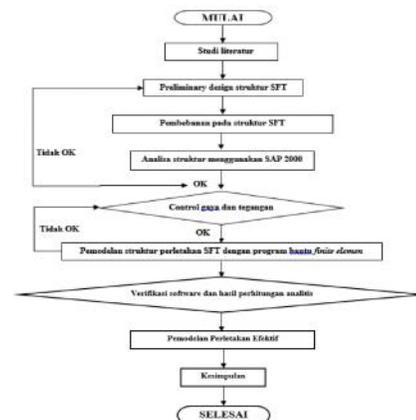
Elastomer adalah suatu elemen jembatan yang terbuat dari karet alam atau karet sintesis (*neoprene*) yang berfungsi untuk meneruskan

beban dari bangunan atas ke bangunan bawah. Bahan-bahan campuran karet yang digunakan dalam pembuatan bantalan ini berupa *polycholoprene* asli (*neoprene*) yang tahan kristalisasi [4].Kelebihan elastomer sendiri adalah kemampuannya untuk berotasi dan juga bertranslasi horizontal, sehingga fungsinya untuk pembebanan vertical pada konstruksi jembatan bisa seperti tumpuan sendi-rol.Dari fungsi tersebut, jika difungsikan sebagai tumpuan pada struktur SFT, yaitu antara struktur badan SFT dengan pondasinya, elastomer diharapkan mampu mengurangi geseran dan getaran yang disebabkan oleh beban kendaraan pada badan SFT serta pengaruh *uplift* yang ditimbulkan akibat beban hidrodinamik.

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui perbandingan nilai tegangan geser yang terjadi pada elastomer bearing pada perletakan SFT dengan melakukan analisa terhadap hasil pemodelan *finite element*. Disamping itu, penelitian ini juga akan menentukan tipe elastomer yang paling efektif untuk mengurangi respon struktur dari pembebanan hidrodinamik yang terjadi pada struktur SFT.

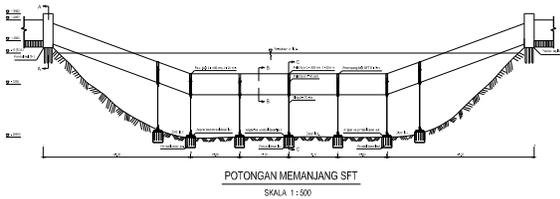
II. Metode Penelitian

Penelitian ini dikerjakan dengan tahapan seperti diagram alir dibawah. Hal ini dimaksudkan agar nantinya dapat dikerjakan dengan fokus dan terarah. Berikut ini adalah diagram alir dan tahapan-tahapannya :

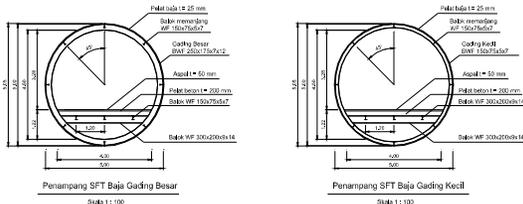


Gambar 1. Diagram Alir Metodologi

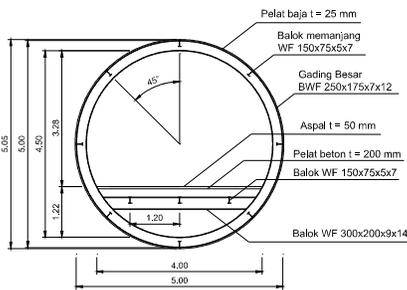
1. Potongan melintang dan memanjang SFT dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. Potongan memanjang SFT [5]



Gambar 3. Potongan B-B SFT [5]



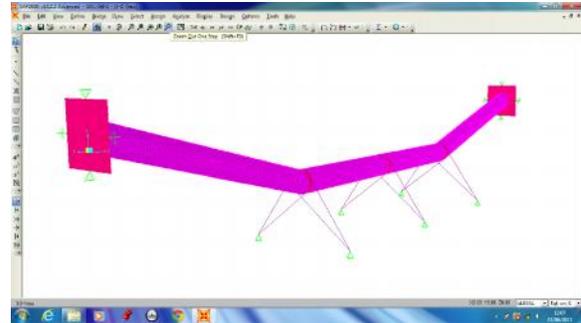
Gambar 4. Potongan Melintang Badan SFT [5]

Data dimensi, material, dan perairan gelombang menggunakan data dari model uji SFT yang telah diuji di laboratorium kelautan. Data-data tersebut dapat dilihat pada tabel-tabel berikut ini.

Tabel 1. Dimensi Struktur SFT [6]

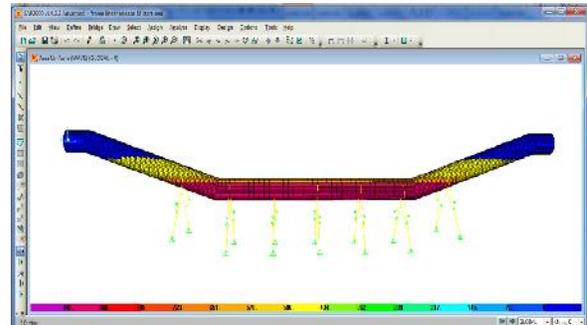
Besaran	Proto type	Satuan	Model Uji	Satuan
Panjang keseluruhan, L	150	m	1.5	M
Diameter SFT, D	5	m	0.05	M
Massa SFT, m	2834	ton	867	gram
Gaya Apung, B	1523	ton	3131.5	gram

Program SAP2000 digunakan untuk memperoleh respon dinamik dari perletakan yang terjadi pada koneksi ujung (*shore connection*) struktur SFT.

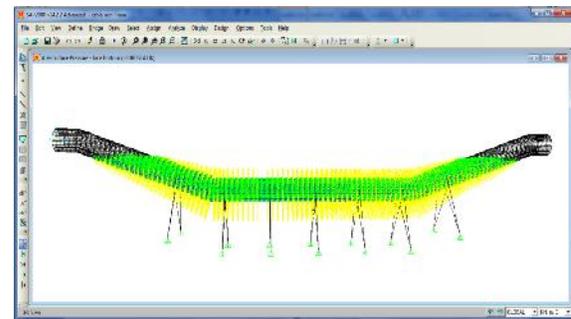


Gambar 5. Pemodelan SFT Program SAP 2000

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



Gambar 6. Hasil Input Beban Gelombang dan Arus Secara Manual Pada SAP 2000 Pada Potongan Badan Tunnel



Gambar 7. Hasil input beban hidrostatis

Beban hidrostatis yang telah dimasukkan, sudah otomatis termasuk *gayabouyancy*. 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-tabel berikut ini:

Tabel 2. Reaksi perletakan SFT

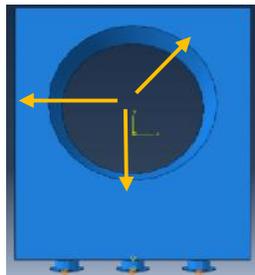
Kombinasi Gaya	Gaya F2 (ton)	Gaya F3(ton)
Kombinasi 1	-293,7062	-392,3665
Kombinasi 2	-294,0836	-392,8369
Kombinasi 3	-279,6154	-372,9589
Kombinasi 4	-279,974	-373,4069

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan analisa terhadap SFT dengan menggunakan program SAP, dan didapatkan besarnya reaksi perletakan pada SFT seperti pada tabel berikut:

Tabel 3.Reaksi perletakan pada SFT

Kombinasi	F (KN)		
	F1	F3	F2
D+L+H+W	844.7285	4902.177	1172.752
D+H+W	861.52	4969.186	1197.269
D+H+L	312.0889	1630.254	463.4155
D+H	338.7328	1738.254	512.4089

Dipakai kombinasi pembebanan kedua (D+H+W) karena merupakan beban maksimum



Gambar 8. Gaya Aksial dan Horisontal pada Perletakan SFT

Dari analisa SAP didapatkan: Gaya geser maksimum yang mampu dipikul tiap rubber adalah:

$$P_{max} (shear) = 1475.015 / 5 = 295 \text{ KN}$$

Dengan hasil perhitungan di atas, dapat ditentukan dimensi *rubber* yang dipakai dengan melihat tabel spesifikasi rubber dari *brigetone seismic isolation product*, antara lain sebagai berikut: $P_{max} (compress) = 1092.52 \text{ KN}$
 $P_{max} (shear) = 295 \text{ KN}$

Maka, dipakai dimensi rubber 1300 mm (P compress = 19900 KN, P shear = 335 KN)

Data lainnya dari rubber dimensi 1300 mm yang dibutuhkan dalam perencanaan selanjutnya dirangkum dalam tabel 4.2 di bawah ini:

Tabel 4. Dimensi dan Karakteristik Rubber Bearing

Karakteristik	Tipe Rubber		
	HRB	LRB	NRB
Outer diameter (mm)	1300	1300	1300
Inner diameter (mm)	55	240	30
Thickness of one rubber layer (mm)	8.7	8.7	8.7
Number of rubber layer	23	23	30
Total Rubber Thickness (mm)	200	200	261
Diameter of flange (mm)	1700	1700	1700
Thickness of Flange (mm)	40	40	40
Thickness of steel (mm)	4.4	4.4	4.4

Tabel 5. Pembebanan pada SFT

Beban hidup UDL (qL)	=	10.8 KN/m
Bban hidup KEL (P)	=	49 kN/m
Tebal aspal (d)	=	50 mm
Massa jenis aspal (y)	=	2.2 T/m3
Lebar efektif (beff)	=	1200 mm
Panjang bentang (L)	=	5500 mm
Beban mati tambahan dari asphalt	=	0.132 T/m
Tinggi gel. Signifikan (H)	=	5.08 m
Periode gel. Signifikan (T)	=	0.08 s

Tabel 6. Hasil analisa kecepatan arus akibat angin [7]

h(m)	y (m)	V _{c_{ow}} (m/s)	V _{c_w} (m/s)
21	0	1.2	0.00
21	2	1.2	0.11
21	4	1.2	0.23
21	6	1.2	0.34
21	8	1.2	0.46
21	10	1.2	0.57
21	12	1.2	0.69
21	14	1.2	0.80
21	16	1.2	0.91
21	18	1.2	1.03
21	20	1.2	1.14
21	21	1.2	1.20

Keterangan tabel :

h = Kedalaman laut dihitung pada saat pasang

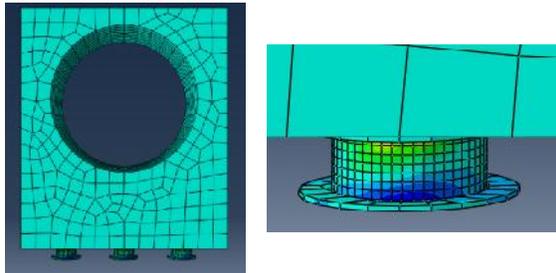
y = Tinggi air laut dari *seabed*

V_{c_{ow}} = Kecepatan arus di permukaan laut

V_{c_w} = Kecepatan arus menurut kedalamannya dari *seabed*

III. Hasil Dan Pembahasan

Nilai tegangan geser (*shear stress*) yang didapatkan dari proses running program abaqus terhadap pemodelan perletakan elastomer rubber bearing dari SFT adalah sebagai berikut:

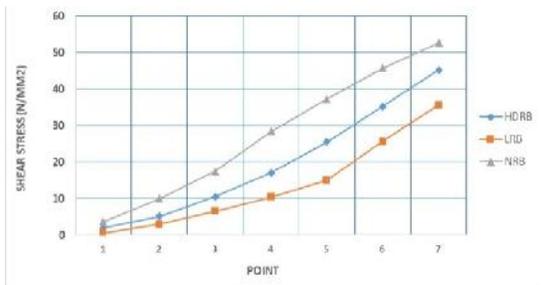


Gambar 9. Pemodelan Rubber Bearing Pada Struktur SFT

Nilai tegangan geser yang terjadi pada ketiga tipe elastomer dapat dilihat pada tabel dan grafik berikut ini.

Tabel 10. Perbandingan *Shear Stress* pada ketiga jenis elastomer

TYPE OF ELASTOMER	POINT						
	1	2	3	4	5	6	7
HDRB	1.931	5.17	10.54	17.04	25.57	35.24	45.22
LRB	0.628	3.012	6.573	10.46	15.025	25.68	35.62
NRB	3.73	10.01	17.46	28.44	37.34	45.73	52.73

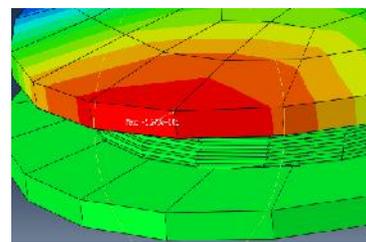
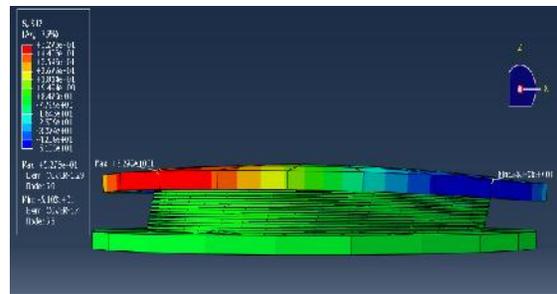


Gambar 10. Perbandingan tegangan geser (*Shear Stress*) yang terjadi antara elastomer tipe HDRB, LRB dan NRB

Dari Grafik di atas tentang perbandingan nilai tegangan geser yang terjadi pada perletakan elastomer rubber bearing, tegangan geser maksimum terjadi pada cover baja. Tipe NRB memiliki nilai tegangan geser maksimum, yaitu sebesar 52.73 N/mm². Sementara LRB memiliki nilai tegangan paling kecil, yaitu 35.62 N/mm² dan HDRB memiliki tegangan geser sebesar 45.22

N/mm². LRB mampu meredam gaya dengan baik karena LRB memiliki *lead* (perunggu) yang terletak di tengah sebagai tempat penyerapan energi, sehingga memiliki kemampuan menahan beban aksial yang lebih baik dari kedua tipe lainnya.

Gambar 11 di bawah menunjukkan posisi terjadinya tegangan maksimum pada baja. Jika dilihat, nilai tegangan maksimum yang terjadi pada rubber tipe NRB tersebut masih memenuhi tegangan ijin baja, yaitu 250 N/mm². NRB memiliki nilai *equivalent damping ratio* yang rendah (2%-3%), terbuat dari karet standar tanpa tambahan bahan apapun sehingga tidak cukup mampu mengcover gaya-gaya yang bekerja padanya. Untuk mengatasi hal tersebut penggunaan NRB perlu dibantu dengan *damping device* atau dikombinasikan dengan HDRB atau LRB untuk meningkatkan nilai dampungnya.



Gambar 11. Tegangan Geser Maksimum pada Elastomer tipe NRB

VI. Kesimpulan Dan Saran

Kesimpulan dari penelitian ini diambil berdasarkan analisa terhadap tiga tipe rubber bearing pada hasil output pemodelan elastomer untuk struktur Submerged Floating Tunnel (SFT). Berikut kesimpulan yang di dapat:

1. Natural Rubber Bearing (NRB) menunjukkan nilai maksimum pada tegangan geser yang terjadi. Hal ini karena NRB adalah jenis seismic isolation yang paling sederhana dan menggunakan tipe karet standar. Walau memiliki *restoring force* yang baik namun NRB memiliki nilai equivalent damping ratio yang rendah (2%-3%)
2. High Damping Rubber Bearing (HDRB) memiliki kekakuan horizontal yang relatif kecil dengan damping ratio yang tinggi, sehingga tegangan yang terjadi relatif kecil dibanding pada NRB.
3. Lead Rubber Bearing (LRB) merupakan tipe *seismic isolation* yang disarankan untuk diterapkan pada struktur perletakan SFT karena memiliki *lead* (perunggu) di bagian tengah yang berfungsi sebagai tempat penyerapan energi sehingga mampu mengurangi gaya yang bekerja dan meminimalkan terjadinya perpindahan.

Saran yang dapat diberikan pada penelitian tentang perletakan elastomer pada struktur Submerged Floating Tunnel (SFT) ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu adanya analisa lanjut terhadap pemodelan Abaqus untuk mengkombinasikan elastomer rubber bearing tipe Natural Rubber Bearing (NRB) dengan elastomer tipe lain dalam satu struktur, misal tipe High Damping Rubber Bearing (HDRB) ataupun Lead Rubber Bearing (LRB) agar penerapan prinsip isolator pada SFT dapat diketahui lebih detail
2. Perlu analisa lebih lanjut terhadap pemodelan dengan Abaqus untuk beban arus dan gelombang yang dinamis, agar beban arus dan gelombang dapat langsung diterima oleh element-elemen elastomer baik rubber maupun steel.
3. Perlu dilakukan studi dengan parameter yang lain sehingga data pembandingan dari model uji bisa dikaji lebih banyak sehingga validasi perilaku model uji dan analisa numerik lebih variatif.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada keluarga, teman-teman, pembimbing dan seluruh pihak yang membantu hingga penelitian ini bisa diselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] Aspar, Wimpie Agoeng N., Prio Utomo, Djoko., Hendriyawan, Alternatif Pondasi Terowongan Layang Dalam Laut Untuk Prasarana Transportasi, *Institute Teknologi Bandung, 2010*
- [2] Mazzolani, F. M., Landolfo, Raffaele., Faggiano, Beatrice., Esposito, Matteo, A Submerged Floating Tunnel (Archimedes Bridge) prototype in the Qiandao Lake (PR of China): research development and basic design, *Department of Structural Engineering, University of Naples "Federico II", Naples, Italy 2007*
- [3] Jacobsen B., Design of Submerged Floating Tunnel Operating Under Various Condition, *ScienceDirect.com, 2010*
- [4] SNI 3967:2008 Spesifikasi bantalan elastomer tipe polos dan tipe berlapis untuk perletakan jembatan, *Badan Standar Nasional 2008*
- [5] Suswanto, Budi., Wahyuni, Endah., Pengaruh Snap Loading Kabel Pada Respon Dinamik Struktur Submerged Floating Tunnels Akibat Beban Hidrodinamik Pada Perairan Dangkal, *Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Institute Teknologi Sepuluh November Surabaya, 2015*
- [6] Wahyudi, Agus., Studi Permodelan Perletakan Ujung (*Shore Connection*) Pada Submerged Floating Tunnel ((SFT), *Institute Teknologi Sepuluh November Surabaya, 2014*
- [7] Komara, Indra, Studi Konfigurasi Posisi Kabel Submerged Floating Tunnel, *Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2014*