

## ***Stress assessment pada bonding tube dengan beban tekanan eksternal***

**Asnawi Lubis<sup>1</sup>, Muhammad Rahardian Putra<sup>1</sup>, Jamiatul Akmal<sup>1</sup>, Novri Tanti<sup>1</sup>, Ahmad Su'udi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung  
Jalan Professor Soemantri Brojonegoro No.1, Bandar Lampung, 35345  
Email korespondensi: asnawi.lubis@eng.unila.ac.id

### **Abstrak**

*Struktur silinder (tabung) dapat digunakan untuk sistem transportasi antar pulau, dibangun sebagai terowongan terapung terendam (SFT). Struktur utama SFT adalah tabung berlapis yang digabung dan tali tambat untuk menahan gaya apung. Kajian ini menyajikan hasil stress assessment pada tabung silinder berlapis dengan beban tekanan eksternal dari air laut. Pemodelan dan analisis dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan ANSYS. Tabung terdiri dari tiga lapisan: lapisan terdalam adalah baja setebal 30 mm, lapisan tengah adalah beton setebal 450 mm dan lapisan terluar adalah aluminium setebal 150 mm. Diameter dalam dan luar tabung masing-masing adalah 5 m dan 6,26 m. Beban yang diberikan adalah tekanan internal sebesar 101 kPa (1 atm) dan tekanan eksternal hidrostatik pada kedalaman 500 m sebesar 5,35 MPa. Hasil kajian menunjukkan bahwa hoop stress terbesar terjadi pada lapisan baja, diikuti oleh lapisan aluminium dan lapisan beton. Untuk radial stress yang merupakan tegangan tekan, nilai terbesar terdapat pada lapisan aluminium dan nilai yang lebih kecil terdapat pada lapisan terdalam (baja). Untuk tegangan geser, tegangan pada lapisan baja dan beton jauh lebih kecil dibandingkan dengan tegangan pada lapisan aluminium.*

**Kata kunci:** struktur silindris, SFT, hoop stress, gaya radial, gaya geser.

### **Abstract**

*Cylindrical structures (tubes) may be used for inter-island transportation system, constructed as a submerged floating tunnel (SFT). The main structure of SFT is a layered bonding tube and a mooring rope to resist buoyancy. This paper presents the results of a stress assessment on a layered cylindrical tube under external pressure from seawater. Modeling and analysis were carried out using the ANSYS FE method. The tube consists of three layers: the innermost layer is steel of 30 mm thick, the middle layer is concrete of 450 mm thick and the outermost layer is aluminum of 150 mm thick. The inner and outer diameters of the tube are 5 m and 6.26 m, respectively. The load applied is internal pressure of 101 kPa and external hydrostatic pressure at a depth of 500 m of 5.35 MPa. The results showed that the greatest hoop stress occurred in steel layer, followed by aluminum layer and concrete layer. For radial stress which is a compressive stress, the largest value is found in the aluminum layer and the smaller value goes to the innermost layer (steel). For shear stress, the stress was much smaller in the steel and concrete layers, compared to the stress in the aluminum layer.*

**Keywords:** cylindrical structures, SFT, hoop stress, radial stress, shear stress.

### **1. Pendahuluan**

Penyeberangan antar pulau adalah salah satu isu besar di negara-negara kepulauan, termasuk Indonesia. Berbagai ide dan gagasan telah diajukan sebagai sarana penyeberangan antar pulau, di antaranya adalah jembatan dan terowongan bawah laut. Jarak penyeberangan dan kedalaman laut merupakan faktor yang harus dipertimbangkan untuk merealisasikannya. Meningkatnya jarak dan kedalaman akan menyebabkan meningkatnya risiko keamanan dan biaya konstruksi.

Sebuah konsep penyeberangan antar pulau yang saat ini menjadi perhatian para peneliti adalah terowongan layang bawah air atau *submerged floating tunnel* (SFT). SFT adalah terowongan berupa struktur tabung terapung yang ditempatkan di bawah permukaan air pada kedalaman tertentu dan posisinya dipertahankan oleh tali tambat, ponton,

atau tiang pancang. SFT dapat digunakan untuk menyeberangi selat, sungai atau danau. Dibandingkan dengan jembatan dan terowongan konvensional, SFT memiliki keuntungan, diantaranya biaya konstruksi yang rendah dan waktu konstruksi yang singkat [1].

Ide tentang SFT pertama kali diajukan oleh Sir James Reed di Inggris pada tahun 1886, kemudian oleh Trygve Olsen Dale di Norwegia pada tahun 1924 [2]. Hingga saat ini kajian SFT terus berkembang di beberapa negara seperti Norwegia, Korea, China, Jepang dan Italia. Di Indonesia, terdapat beberapa tempat yang potensial untuk dibangun SFT, seperti di Selat Sunda, Selat Bali dan Selat Bangka. Namun belum banyak kajian yang dilakukan di Indonesia tentang SFT [1].

Pemilihan material yang tepat merupakan hal yang harus diperhatikan dalam merancang SFT. Pemilihan

material dilakukan berdasarkan performa struktural dan fungsional yang ingin dicapai. Beberapa faktor yang perlu mendapat perhatian untuk material SFT antara lain adalah ketahanan terhadap korosi, kemudahan fabrikasi, metode konstruksi, perawatan, dan waktu penyediaan serta biaya material.

Struktur lepas pantai umumnya dibangun menggunakan material beton dan baja karena sudah teruji dan tersedia banyak data-data pengujian. Beberapa material yang umum digunakan atau masih tahap kajian yang dapat digunakan sebagai material SFT adalah beton, baja, material komposit dan paduan aluminium [3]

Baja memiliki beberapa kelebihan yang membuatnya cocok digunakan sebagai material konstruksi SFT, seperti sifat mekanik yang baik, tahan abrasi, tahan terhadap *fatigue* dan dapat dilas (*weldability*). Namun demikian, baja juga memiliki kekurangan, seperti tidak tahan korosi dan rentan terhadap beban *fatigue* pada daerah sambungan.

Dari sisi biaya, penggunaan baja sebagai material keseluruhan struktur tabung SFT kuranglah tepat, karena dapat menghabiskan biaya yang besar. Kombinasi dengan beton merupakan pilihan yang tepat, karena beton termasuk material berbiaya rendah. Selain bersifat tahan api, beton juga berfungsi sebagai penyedia gaya berat untuk menyeimbangkan gaya apung. Penggunaan beton yang diperkuat oleh lapisan baja menjadi pilihan material yang tepat karena menyediakan kekuatan dan kekakuan struktur. Kombinasi beton dan lapisan baja yang menjadikan komposit baja-beton telah digunakan secara luas dan sukses pada pembangunan terowongan terbenam (*immersed tunnel*) [4].

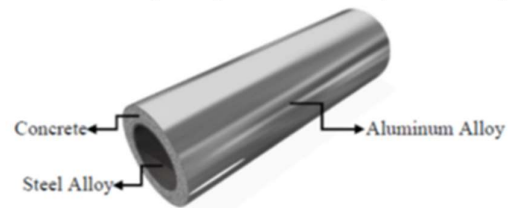
Untuk menutupi kekurangan baja yang dapat mengalami korosi, sebagai pelapis anti korosi dapat digunakan paduan aluminium di bagian luar SFT [3]. Konsep material komposit baja-beton-aluminium telah digunakan pada pembuatan prototipe SFT di Danau Qiandao, China [5]. Kajian ini menyajikan hasil *stress assessment* pada tabung silinder yang dikonstruksi dari tiga lapis material, masing-masing adalah baja pada lapisan dalam, beton (*reinforced concrete*) pada lapisan tengah dan aluminium pada lapisan luar. Beban utama yang diperhitungkan adalah tekanan (*hydrostatic*) eksternal pada kedalaman 500 m, 700 m dan 900 m di bawah permukaan laut. Distribusi *stress* sepanjang ketebalan dianalisis untuk *stress* radial, *hoop*, dan geser menggunakan ANSYS Mechanical post-processor.

**2. Metode**

*Stress assessment* pada kajian ini dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan ANSYS. Secara umum langkah-langkah analisis dengan

ANSYS terdiri dari tiga tahap utama, yaitu *pre-processing*, *solution*, dan *post-processing*.

Model geometri dibuat 3 *part* yang ketiganya merupakan *tube* silinder. Perbedaan ketiga *part* geometri tersebut terdapat pada diameter dan ketebalan dindingnya. Ketiga *part* geometri tersebut kemudian digabungkan (*assembly*), sehingga



menjadi satu model geometri yang terdiri dari 3 *part* (*bonding tube*) seperti Gambar 1.

**Gambar 1.** Silinder berlapis dengan bonding joint.

*Bonding tube* yang disimulasikan pada kajian ini merupakan salah satu konfigurasi geometri prototipe SFT di Danau Qiandaw, China [5]. Panjang *tube* adalah 25 m, dengan diameter dalam dan luar masing-masing adalah 5 m dan 6,26 m. Tebal lapisan baja, beton, dan aluminium masing-masing adalah 30 mm, 450 mm, dan 150 mm. Dengan data ini diameter dalam dan luar setiap lapis material diberikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Diameter dalam dan diameter luar setiap lapis material.

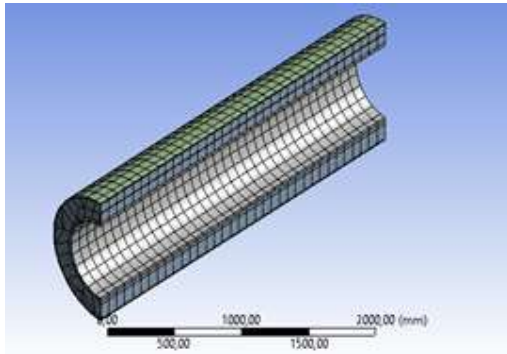
$D_i$ , m	$D_{12}$ , m	$D_{23}$ , m	$D_o$ , m
5,0	5,06	5,96	6,26

*Material properties* (MP) yang diperlukan pada kajian ini adalah Modulus Young  $E$ , dan Poisson's Ratio  $\nu$ . Nilai kedua *material properties* ini diberikan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Material properties baja, concrete, dan aluminium.

MP	Baja	Concrete	Aluminium
$E$ , MPa	$2 \times 10^5$	$3 \times 10^4$	$7,1 \times 10^4$
N	0,3	0,18	0,33

Tipe elemen yang digunakan pada pemodelan ini dipilih secara otomatis oleh ANSYS program. Untuk ketiga lapis material digunakan elemen SOLID186, yang merupakan elemen solid tiga dimensi (*brick element*) orde tinggi 20 *node* yang memiliki tiga derajat kebebasan per *node* yaitu perpindahan nodal arah sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . sedangkan untuk *bonding* antar lapisan yang melibatkan kontak, dipilih elemen CONTA174, TARGE170, dan SURF154. *Typical finite element mesh* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Typical finite element mesh.

Kondisi batas yang diterapkan adalah *fixed support* pada kedua ujung *tube* silinder, sedangkan beban yang bekerja adalah tekanan *external* oleh air laut pada kedalaman  $z$  (tekanan hidrostatik) dan tekanan internal sebesar 1 atm. Pada pemodelan ini tekanan *external* dievaluasi untuk tiga kedalaman, masing-masing adalah  $h1 = 500$  m,  $h2 = 700$  m dan  $h3 = 900$  m di bawah permukaan laut. Massa jenis air laut yang digunakan pada simulasi ini adalah  $1070 \text{ kg/m}^3$ . Tekanan *external* untuk setiap kedalaman diberikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Tekanan hidrostatik pada kedalaman 500, 700, dan 900 meter.

Notasi	Kedalaman, m	External pressure (MPa)	Internal Pressure (MPa)
$h1$	500	5,349	0,101
$h2$	700	7,449	0,101
$h3$	900	9,548	0,101

Selain beban *pressure*, pada *tube* juga bekerja gaya apung  $F_b$  sebesar berat fluida yang dipindahkan, dirumuskan oleh Persamaan 1.

$$F_b = m_w g \tag{1}$$

Di mana,  $m_w$  adalah massa air laut dan  $g$  adalah percepatan gravitasi bumi.

Massa fluida dapat dihitung dari definisi massa jenis, yaitu massa per satuan volume. Dengan demikian  $m_w$  dihitung seperti di Persamaan 2.

$$m_w = \rho_w V \tag{2}$$

dengan  $\rho_w$  adalah massa jenis air laut dan  $V$  adalah volume *tube* silinder yang dihitung dengan Persamaan 3 berikut.

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L \tag{3}$$

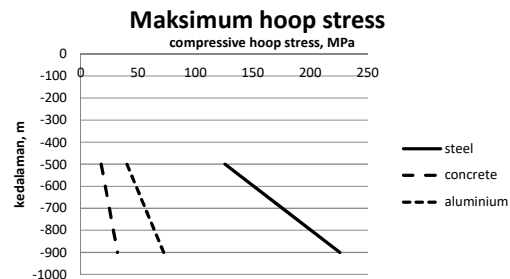
Gaya apung pada SFT akan dilawan oleh tali tambat, dan gaya ini tidak mempengaruhi distribusi *stress* pada *tube*. Dengan demikian gaya apung tidak

termasuk sebagai beban yang diperhitungkan pada kajian ini.

### 3. Hasil dan Pembahasan

*Stress assessment* pada *tube* silinder berlapis yang dibebani dengan internal dan/atau *external pressure* bertujuan untuk melihat distribusi *stress* sepanjang ketebalan yang diplot dari lapisan paling dalam menuju lapisan paling luar. Distribusi *stress* yang ditampilkan adalah *hoop stress*, *radial stress*, dan *shear stress*. Sedangkan aksial *stress* dianggap tidak ada karena tidak ada beban *bending* atau beban aksial yang bekerja.

Gambar 3 menunjukkan maksimum *hoop stress* pada lapisan baja, beton dan aluminium, masing-masing diplot untuk kedalaman 500, 700, dan 900 meter. Pada Gambar 3, kedalaman diplot sebagai ordinat untuk memperjelas arti kedalaman pada arah vertikal, dan *hoop stress* diplot sebagai absis. Dapat dilihat dari Gambar 3, bahwa *hoop stress* makin besar jika kedalaman bertambah, baik untuk lapisan baja, beton, maupun aluminium. Jika *hoop stress* dievaluasi secara radial, maka dapat dilihat dari Gambar 3 bahwa maksimum *hoop stress* terdapat pada lapisan dalam (baja), dan yang minimum terdapat pada lapisan tengah (*concrete*). Gambar 3 menunjukkan bahwa ada pengaruh sifat material terhadap nilai *hoop stress*, di mana pada kajian ini, *concrete* pada lapisan tengah memiliki nilai modulus elastisitas  $E$  paling kecil seperti diberikan pada Tabel 2.



Gambar 3. Maksimum hoop stress.

Secara teoritis seperti pada *textbook* oleh Timoshenko and Krieger [6], *hoop stress* pada sebuah *tube* silinder dengan beban *external pressure* dihitung dengan Persamaan 4.

$$\sigma_h = \frac{p_i r_1^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{(p_i - p_o) r_o^2 r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2) r^2} \tag{4}$$

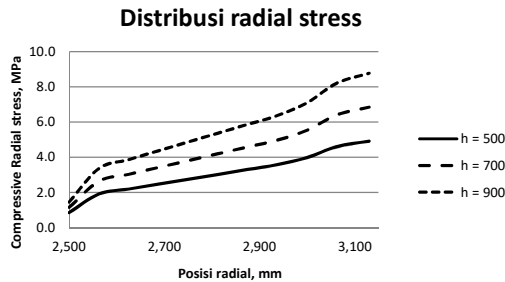
Persamaan 4 sekilas menunjukkan bahwa *hoop stress* pada *tube* silinder hanya fungsi tekanan dan radius penampang, tidak melibatkan sifat material seperti modulus elastisitas  $E$  dan Poisson's ratio  $\nu$ . Persamaan 4 juga akan menghasilkan nilai *stress* yang bervariasi secara kuadratik sepanjang ketebalan *tube*. Artinya *stress* pada lapisan tengah tidak akan

lebih rendah daripada kedua *stress* pada lapisan paling dalam dan luar. Hasil yang berbeda ditunjukkan oleh Gambar 3, di mana *stress* pada lapisan beton (tengah) lebih rendah daripada lapisan baja (dalam) dan lapisan luar (aluminium). Hal ini dapat dipahami dari hubungan konstitutif *stress-strain* oleh Hukum Hooke, ditunjukkan pada Persamaan 5.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5)$$

dengan  $\sigma$  adalah tegangan normal dan  $\varepsilon$  adalah regangan normal.

Gambar 4 menunjukkan distribusi radial *stress* yang diplot dari lapisan paling dalam menuju lapisan paling luar. Dapat dilihat bahwa radial *stress* makin besar jika posisi kedalaman *tube* silinder bertambah. Radial *stress* adalah *compressive*, tapi pada Gambar 4 telah diplot pada ordinat positif untuk memudahkan pembacaan grafik.



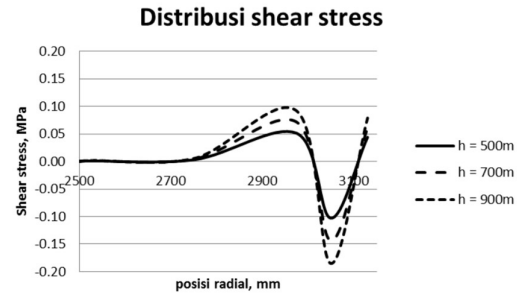
Gambar 4. Distribusi radial stress.

Gambar 4 menunjukkan bahwa radial *stress* memiliki nilai terkecil pada lapisan paling dalam, dan makin besar nilainya menuju lapisan paling luar. Secara teoritis, radial *stress* pada *tube* silinder dengan beban tekanan internal dan tekanan *external* dihitung dengan Persamaan 5.

$$\sigma_h = \frac{p_i r_1^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{(p_i - p_o) r_o^2 r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2) r^2} \quad (5)$$

Radial *stress* adalah *compressive*, tapi pada Gambar 4 telah diplot pada ordinat positif untuk memudahkan pembacaan dan pemahaman grafik.

*Shear stress* memiliki nilai absolut paling kecil dibandingkan dengan *hoop stress* maupun radial *stress*. Gambar 5 menunjukkan distribusi *shear stress* yang diplot dari lapisan paling dalam (baja) menuju lapisan paling luar (aluminium).



Gambar 5. Distribusi shear stress.

Gambar 5 menunjukkan bahwa *shear stress* tidak signifikan antara lapisan baja dan beton, tetapi cukup signifikan antara lapisan beton dan aluminium. Gambar 5 juga menunjukkan bahwa nilai *shear stress* makin besar jika posisi *tube* silinder makin dalam. Hal menarik dari Gambar 5 adalah bahwa *shear stress* pada lapisan aluminium berubah tanda dari tarik pada lapisan paling luar, kemudian tekan pada tengah-tengah lapisan aluminium, dan kembali tarik pada *interface* aluminium-concrete.

#### 4. Kesimpulan

Dari *stress assessment* yang telah dilakukan pada *tube* silinder berlapis (*layered bonding tubes*), dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut: (1) *Hoop stress* merupakan *stress* terbesar dibandingkan dengan radial dan *shear stress*, (2) Radial *stress* dalam bentuk *compressive* memiliki nilai terbesar pada lapisan aluminium (lapisan terluar) dan makin kecil nilainya menuju lapisan paling dalam (baja), (3) *Shear stress* merupakan *stress* terkecil dibandingkan dengan *hoop stress* dan radial *stress*. *Stress* ini tidak signifikan pada lapisan antara baja dan beton, tapi cukup signifikan antara lapisan beton dan aluminium.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik, Universitas Lampung yang telah mendanai kajian ini pada DIPA FT tahun 2021 dengan nomor kontrak penugasan 3954/UN26.15/LK.03/2021 tanggal 3 Juli 2021.

#### Daftar Pustaka

- [1] E. Budiman, 2017, Construction challenge of submerged floating tunnel in Indonesiae. *Jurnal Teknik Sipil Vol 1(2)*, (pp.1-7).
- [2] H. Østlid, 2010, When is SFT competitive? *Procedia Engineering*, 4, 3–11.
- [3] B. Faggiano, R. Landolfo, F. Mazzolani, 2005, The SFT: an innovative solution for waterway strait crossing. *IABSE Symposium Report*, 90(10), 36-42.
- [4] J. Saveur, 1997, Structural Design of Immersed Tunnels, Tunneling and

- Underground. Space Technology, vol.12, 93–109.
- [5] F.M. Mazzolani, R. Landolfo, B. Faggiano, M. Esposito, F. Perotti, & G. Barbella, 2008, Structural analysis of submerged floating tunnel prototype in Qiandau Lake (PR of Chine). *Advances in Structural Engineering*, 11(4), (pp.439-454).
- [6] S.P. Timoshenko, and S. Woinowsky-Krieger, 1959, *Theory of Plates and Shells*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.