

Stress Assessment on Layered Bonding Tube under Hydrostatic External Pressure

(Stress Assessment pada Bonding Tube dengan Beban Tekanan Eksternal)

ASNAWI LUBIS, JAMIATUL AKMAL, MUHAMMAD RAHARDIAN PUTRA, NOVRI TANTI, AHMAD SU'UDI

ABSTRACT

Cylindrical structures are widely used in engineering applications, such as pressure vessels, piping systems and underground transport structures. Another application of cylindrical structures (tubes) is for inter-island transportation constructed as a submerged floating tunnel (SFT). The main structure of the SFT is a layered bonding tube and a mooring rope to resist buoyancy. For this application, the tubes (tunnels) subjected to external (hydrostatic) pressure and buoyancy force from seawater. This paper presents the results of a stress assessment on a layered cylindrical tube under an external hydrostatic pressure load from seawater. Modeling and analysis were carried out using the ANSYS finite element method. The tube material consists of three layers: the innermost layer is steel with a thickness of 30 mm, the middle layer is concrete with a thickness of 450 mm and the outermost layer is aluminum with a thickness of 150 mm. The inner and outer diameters of the tube are 5m and 6.26m, respectively, and the length of the tube is 25m. The element types used are SOLID186, CONTA174, TARGET170, and SUFR154. The boundary conditions are fully-fixed at both ends of the tube. The working load is internal pressure of 101 kPa and external hydrostatic pressure at a depth of 500m 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 structure, layered cylinder, SFT, hoop stress, radial stress, shear stress.

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, di antaranya biaya konstruksi yang rendah dan waktu konstruksi yang singkat (Budiman, 2017)

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 (Østlid, 2010). Hingga saat ini penelitian 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 penelitian yang dilakukan di Indonesia tentang SFT (Budiman, 2017).

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 penelitian yang dapat digunakan sebagai material SFT adalah beton, baja, material komposit dan paduan aluminium (Faggiano et al., 2005)

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 (*weld ability*). 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*) (Saveur, 1997).

Untuk menutupi kekurangan baja yang dapat mengalami korosi, sebagai pelapis anti korosi dapat digunakan paduan aluminium di bagian luar SFT (Faggiano et al., 2005). Konsep material komposit baja-beton-aluminium telah digunakan pada pembuatan prototipe SFT di Danau Qiandao, China (Mazzolani et al., 2008). Makalah 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 500m 700m dan 900m di bawah permukaan laut. Distribusi stress sepanjang ketebalan dianalisis untuk stress radial, hoop, dan geser menggunakan ANSYS Mechanical post-processor.

METODE PENELITIAN

Stress assessment pada penelitian 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 penelitian ini merupakan salah satu konfigurasi geometri prototipe SFT di danau Qiandaw, China (Mazzolani et al., 2008). Panjang tube adalah 25m, dengan diameter dalam dan luar masing-masing adalah 5m dan 6.26m. Tebal lapisan baja, beton, dan aluminium masing-masing adalah 30mm, 450mm, dan 150mm. Dengan data ini diameter dalam dan luar setiap lapis material diberikan pada Tabel 1.

TABEL 1. Diameter dalam dan diameter luar setiap lapis material

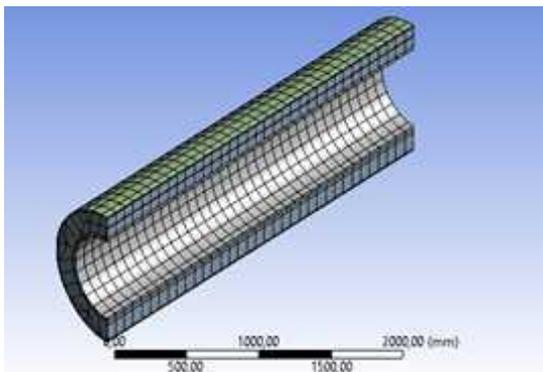
D_i , m	D_{12} , m	D_{23} , m	D_o , m
5.0	5.06	5.96	6.26

Material properties (MP) yang diperlukan pada penelitian ini adalah modulus Young E , dan Poisson's ratio . Nilai kedua material properties ini diberikan pada Tabel 2.

TABEL 2. Material properties baja, concrete, dan aluminium

MP	Baja	Concrete	Aluminium
E , MPa	2×10^5	3×10^4	7.1×10^4
	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 $h_1 = 500\text{m}$, $h_2 = 700\text{m}$ dan $h_3 = 900\text{m}$ di bawah permukaan laut. Massa jenis air laut yang digunakan pada simulasi ini adalah 1070 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
h_1	500	5.349	0.101
h_2	700	7.449	0.101
h_3	900	9.548	0.101

Selain beban pressure, pada tube juga bekerja gaya apung F_b sebesar berat fluida yang dipindahkan:

$$F_b = m_w g \quad (1)$$

dimana, 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 sebagai berikut:

$$m_w = \rho_w V \quad (2)$$

dengan ρ_w adalah massa jenis air laut dan V adalah volume tube silinder yang dihitung dengan persamaan:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (3)$$

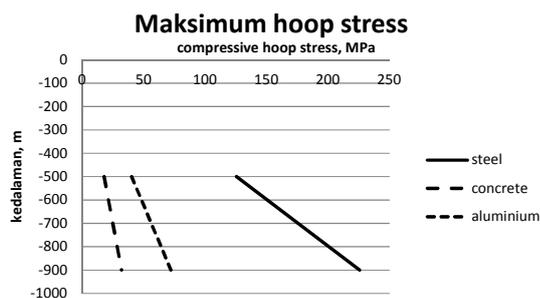
Gaya apung pada SFT akan dilawan oleh tali tambat, dan gaya ini tidak mempengaruhi distribusi stress pada tube. Dengan demikian gaya apung tidak termasuk sebagai beban yang diperhitungkan pada penelitian ini.

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.

1. Hoop stress

Gambar 3 menunjukkan maximum 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 vertical, 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, dimana pada penelitian ini, concrete pada lapisan tengah memiliki nilai modulus elastisitas E paling kecil seperti diberikan pada Tabel 2.



GAMBAR 3. Maksimum hoop stress

Secara teoritis (Timoshenko and Krieger, 1959), hoop stress pada sebuah tube silinder dengan beban external pressure dihitung dengan persamaan (4)

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

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. Persamaan (4) juga akan menghasilkan nilai stress yang bervariasi secara kuadratis 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, dimana stress pada lapisan beton (tengah)

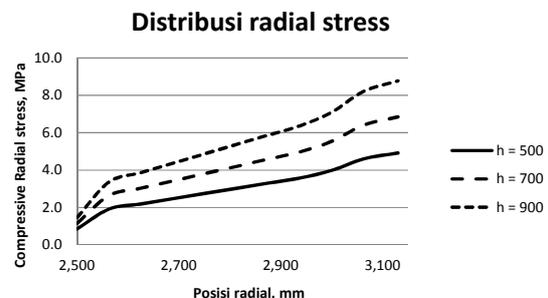
lebih rendah daripada lapisan baja (dalam) dan lapisan luar (aluminium). Hal ini barangkali dapat dipahami dari hubungan konstitutive stress-strain oleh hukum Hooke:

$$\tau = E \cdot \nu \quad (5)$$

dengan τ adalah tegangan normal dan ν adalah regangan normal.

2. Radial Stress

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):

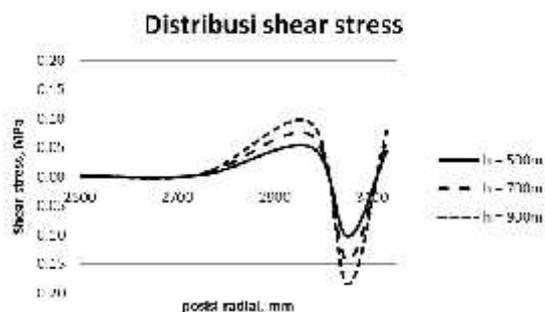
$$\tau_h = \frac{p_i r_1^2 - p_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{(p_i - p_o) r_o^2 r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2) r^2} \quad (5)$$

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

3. Shear Stress

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, tapi cukup signifikan antara lapisan beton dan aluminium. Gambar 5 juga menunjukkan bahwa nilai shear stress makin besar jika posisi tube silinder makin dalam. Yang 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.

KESIMPULAN

Dari stress assessment yang telah dilakukan pada tube silinder berlapis (layeted bonding tubes), dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Hoop stress merupakan stress terbesar dibandingkan dengan radial dan shear stress;
- Radial stress dalam bentuk compressive memiliki nilai terbesar pada lapisan aluminium (lapisan terluar) dan makin kecil nilainya menuju lapisan paling dalam (baja)
- 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 penelitian ini pada DIPA FT tahun 2021 dengan nomor kontrak penugasan 3954/UN26.15/LK.03/2021 tanggal 3 Juli 2021.

DAFTAR PUSTAKA

- Budiman, E. (2017). Construction challenge of submerged floating tunnel in Indonesiae. *Jurnal Teknik Sipil Vol 1(2)*, (pp.1-7).
- Faggiano, B., Landolfo, R., & Mazzolani, F. (2005). The SFT: an innovative solution for waterway strait crossing. *IABSE Symposium Report*, 90(10), 36-42.
- Mazzolani, F.M., Landolfo, R., Faggiano, B., Esposto, M., Perotti, F., & Barbella, G. (2008). Structural analysis of submerged floating tunnel prototype in Qiandau Lake (PR of Chine). *Advances in Structural Engineering*, 11(4), (pp.439-454).
- Østlid, H. (2010). When is SFT competitive? *Procedia Engineering*, 4, 3–11.
- Saveur, J. (1997). Structural Design of Immersed Tunnels, Tunneling and Underground Space Technology. 12, 93–109.
[https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(97\)90015-8](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(97)90015-8)
- Timoshenko, S., and Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of Plates and Shells*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.

PENULIS:

Asnawi Lubis

Structural Mechanics Research Group, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Lampung

Email: asnawi.lubis@eng.unila.ac.id

Jamiatul Akmal

Structural Mechanics Research Group, Jurusan
Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas
Lampung

Muhammad Rahardian Putra

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik
Universitas Lampung

Novri Tanti

Structural Mechanics Research Group, Jurusan
Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas
Lampung

Ahmad Su'udi

Kepala Laboratorium Komputasi Mekanik,
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik
Universitas Lampung

Diskusi untuk makalah ini dibuka hingga
tanggal dan akan diterbitkan dalam jurnal
edisi (diisi oleh editor).