

DIPA FT 2021

LAPORAN PENELITIAN



**STRESS ASSESSMENT PADA LAYERED BONDING
TUBE DENGAN BEBAN TEKANAN EKSTERNAL**

TIM PENELITIAN

**Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph.D. (NIDN. 0012047002)
Ahmad Su'udi, S.T., M.T. (NIDN. 0016087403)**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2021**

HALAMAN PENGESAHAN
DIPA PENNELITIAN FT UNIVERSITAS LAMPUNG TAHUN 2021

Judul : Stress Assessment pada Layered Bonding Tube dengan beban Tekanan Eksternal

Jenis Hibah : DIPA FT tahun 2021

Tim Peneliti :

No	Nama Lengkap beserta Gelar	NIDN	Jabatan Fungsional	Jurusan	No. HP dan E-mail
2.	Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph.D.	0012047002	Lektor	Teknik Mesin	08127456211 asnawi.lubis@eng.unila.ac.id
3.	Ahmad Su'udi, ST, MT	0016087403	Lektor	Teknik Mesin	081272190617 ahmad.suudi@eng.unila.ac.id

Jumlah Mahasiswa yang terlibat : Satu (1 orang)
Nama dan NPM : Muhammad Rahardian Putra (1315021058)

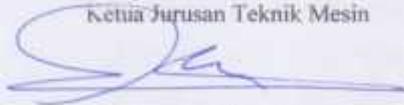
Lokasi Kegiatan : Laboratorium Mekanika Struktur
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNILA

Lama Kegiatan : 20 minggu
Anggaran Biaya : Rp.10.000.000

Sumber Dana : DIPA Fakultas Teknik UNILA tahun 2021

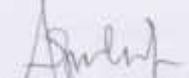
Bandar Lampung, 5-November-2021

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin



Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP.197103311999031003

Ketua Peneliti,



Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP.197004121997031006

Menyetujui,
a.n. Dekan Fakultas Teknik
Wakil Dekan Bid. Akademik dan Kerjasama



Irza Sukriana, ST, MT, PhD
NIP.197008122001121001

RINGKASAN

Struktur silinder banyak digunakan dalam aplikasi rekayasa, seperti bejana tekan, sistem perpipaan, dan struktur transportasi bawah tanah. Aplikasi lain dari struktur silinder (tabung) adalah untuk transportasi antar pulau yang dibangun sebagai terowongan terapung terendam (*Submerged Floating Tunnel, SFT*). Struktur utama sebuah SFT adalah tabung silinder berlapis dan tali tambat untuk menahan gaya apung. Untuk aplikasi ini, tabung (terowongan) mengalami tekanan eksternal (hidrostatik) dan gaya apung dari air laut. Laporan ini menyajikan hasil analisis tegangan pada tabung silinder berlapis di bawah beban tekanan hidrostatik eksternal dari air laut. Pemodelan dan analisis dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan ANSYS. Material tabung terdiri dari tiga lapisan: lapisan terdalam adalah baja dengan ketebalan 30 mm, lapisan tengah adalah beton dengan ketebalan 450 mm dan lapisan terluar adalah aluminium dengan ketebalan 150 mm. Diameter dalam dan luar tabung masing-masing adalah 5m dan 6,26m, dan panjang tabung adalah 25m. Sifat material yang dibutuhkan adalah Modulus Elastisitas E dan rasio Poisson ν . Modulus elastisitas material baja, beton dan aluminium yang digunakan masing-masing adalah 2×10^5 MPa, 3×10^4 MPa, dan $7,1 \times 10^5$ MPa, sedangkan rasio Poisson masing-masing adalah 0,3, 0,18, dan 0,33. Tipe elemen yang digunakan adalah SOLID186, CONTA174, TARGET170, dan SUFR154. Kondisi batas adalah *fully-fixed* pada kedua ujung tabung. Beban yang bekerja adalah tekanan internal sebesar 101 kPa dan tekanan eksternal sebagai simulasi tekanan hidrostatik pada kedalaman 500m sebesar 5,35 MPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hoop stress terbesar terjadi pada lapisan baja (lapisan dalam), diikuti oleh lapisan aluminium (lapisan luar) dan beton (lapisan tengah). Untuk tegangan radial yang merupakan tegangan tekan, nilai terbesar terdapat pada lapisan aluminium (lapisan luar) dan nilai yang lebih kecil terdapat pada lapisan terdalam (baja). Hal yang sangat berbeda ditemukan untuk tegangan geser, dimana tegangan ini jauh lebih kecil nilainya pada lapisan baja dan beton, dibandingkan dengan tegangan pada lapisan aluminium. Pada lapisan aluminium, tegangan geser juga berubah nilainya sepanjang ketebalan tarik, tekan, dan tarik. Dari ketiga tegangan tersebut, yang terbesar adalah nilai hoop stress berupa kompresi.

DAFTAR ISI

Halaman Pengesahan	2
Ringkasan	3
Daftar Isi	4
Daftar Gambar	5
Daftar Tabel	6
BAB 1. PENDAHULUAN	7
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Struktur SFT	8
2.2. Struktur Penyangga SFT	8
2.3. Material Konstruksi	9
2.4. Beban Tetap	11
2.5. Stress pada Tube Lingkaran	12
2.5.1. Hoop Stress	13
2.5.2. Radial Stress	14
2.6. Adhesive Bonding Joint	14
BAB 3. METODE PENELITIAN	17
3.1. Pre-Processing	17
3.2. Phase Solusi	24
3.3. Post-Processing	25
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1. Hoop Stress	26
4.2. Radial Stress	28
4.3. Shear Stress	31
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	35
5.1. Kesimpulan	35
5.2. Saran	35
DAFTAR PUSTAKA	36
LAMPIRAN A1: Makalah yang sudah diseminarkan pada SNTTM ke 19	37
LAMPIRAN A2: Slide Presentasi SNTTM ke-19	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Struktur penyangga SFT	8
Gambar 2.	Tampilan penampang dan material prototipe SFT	11
Gambar 3.	Stress pada sebuah tube silinder	12
Gambar 4.	Adhesive-bonded metal lap joint	15
Gambar 5.	Silinder berlapis dengan bonding joint	17
Gambar 6.	ANSYS element SOLID186	20
Gambar 7.	ANSYS element CONTAC174	21
Gambar 8.	ANSYS element type TARGET170	22
Gambar 9.	ANSYS element type SURF154	22
Gambar 10.	Typical finite element mesh	24
Gambar 11.	Proses modeling dan analisis elemen hingga dengan ANSYS	25
Gambar 12.	Contour hoop stress pada lapisan baja	26
Gambar 13.	Nilai maksimum stress pada lapisan bonding tube	28
Gambar 14.	Typical radial stress sepanjang ketebalan bonding tube	29
Gambar 15.	Distribusi radial stress pada lapisan bonding tube	31
Gambar 16.	<i>Path line</i> untuk analisis shear stress pada lapisan bonding tube	31
Gambar 17.	Typical distribusi shear stress pada arah aksial tube	32
Gambar 18.	Distribusi maks shear stress sepanjang ketebalan bonding tube	33

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Variasi Model Geometri	18
Tabel 2.	Material properties – structural steel,	19
Tabel 3.	Material properties – concrete	19
Tabel 4.	Material properties – aluminium	20
Tabel 5.	Element Matrix Formulation Times Bonding Pipe Analysis	23
Tabel 6.	Tekanan hidrostatik pada kedalaman 500,700, dan 900m	25
Tabel 7.	hoop stress pada lapisan bonding tube	27
Tabel 8.	Nilai radial stress sepanjang ketebalan bonding tubes	29
Tabel 9.	Shear stress pada beberapa posisi radial bonding tube	32

BAB1. PENDAHULUAN

Penyeberangan antar pulau adalah salah satu isu besar di negara-negara kepulauan, termasuk Indonesia. Banyak gagasan dan ide yang 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 baru penyeberangan antar pulau yang 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 laut, selat, sungai atau danau. Dibandingkan dengan jembatan dan terowongan konvensional, SFT memiliki banyak keuntungan, di antaranya biaya konstruksi yang rendah, waktu konstruksi yang cepat, ramah lingkungan, dapat dipindahkan dan digunakan kembali.

Pemilihan material untuk struktur SFT merupakan salah satu tahap yang perlu mendapat perhatian. Untuk aplikasi pada laut, maka faktor lingkungan, seperti potensi terjadinya korosi pada logam perlu diantisipasi. Untuk itu pada penelitian ini, SFT (tabung silinder) 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 diperhatikan pada penelitian ini adalah tekanan (hydrostatic) eksternal pada kedalaman tertentu di bawah permukaan laut.

Tujuan penelitian yang dilaksanakan adalah mengetahui distribusi stress sepanjang ketebalan tube berlapis tiga yaitu baja, beton dan aluminium yang menerima beban tekanan external. Tekanan eksternal yang disimulasikan adalah tekanan hydrostatic pada struktur SFT. Stress assessment dilakukan dengan pemodelan elemen hingga (*finite element modeling*) dengan menggunakan ANSYS

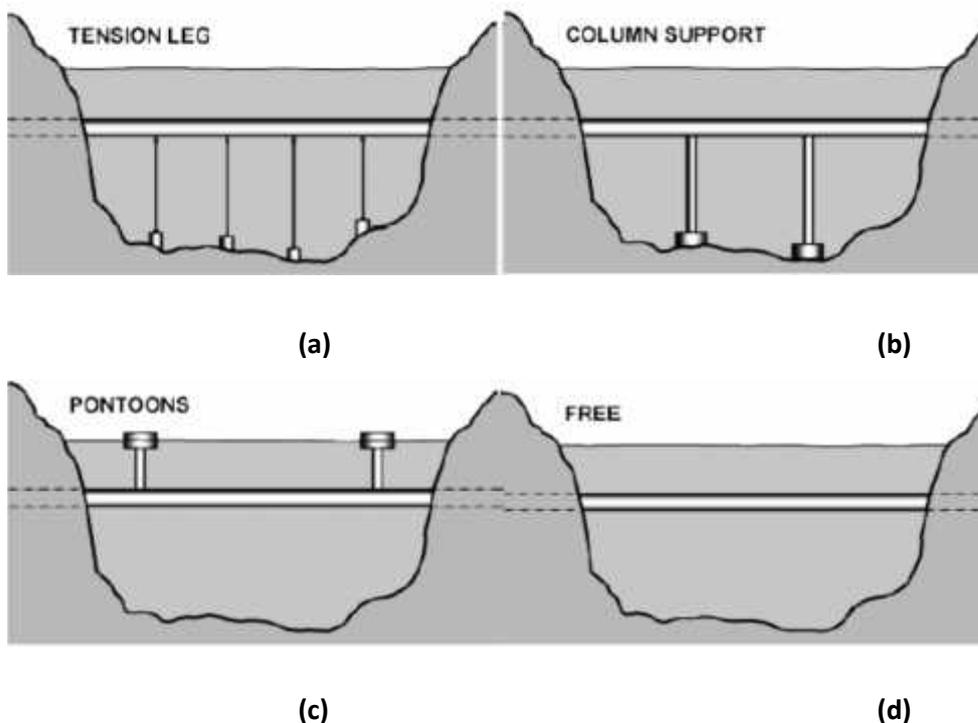
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Struktur SFT

SFT merupakan struktur tabung yang ditempatkan di bawah permukaan air pada kedalaman tertentu sebagai sarana penyeberangan selat, sungai atau danau. Bentuk penampang SFT pada umumnya adalah lingkaran, dapat juga berbentuk polygon atau persegi panjang. Karena lokasinya yang terletak di bawah permukaan air, kapal penyeberangan masih dapat melintas di sisi atas SFT. Keunikan lainnya adalah terdapat gaya apung yang membuatnya seolah-olah melayang di dalam air. SFT dilengkapi dengan struktur penyangga (*support*) yang berguna untuk mempertahankan posisinya dari pengaruh ombak, arus, gempa bumi dan pengaruh lingkungan lainnya.

2.2. Struktur Penyangga SFT

SFT memiliki 4 tipe struktur penyangga, yaitu tali tambat, tiang penyangga, ponton dan penyangga bebas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur penyangga, (a) Tali tambat, (b) Tiang penyangga, (c) Ponton, (d) Penyangga bebas (Østlid, 2010).

SFT pada Gambar 1(a) disangga oleh tali tambat (*tension leg*) dengan konfigurasi vertikal, miring atau kombinasi keduanya. Tipe ini memiliki rasio gaya apung terhadap berat (BWR) > 1 sehingga gaya angkat sisa diseimbangkan oleh tali tambat, akibatnya tali tambat mengalami tegangan awal pada setiap kondisi. Kekakuan SFT diperoleh dari kekakuan *bending* tabung dan tali tambat. Akibat berbagai macam beban lingkungan, dimungkinkan terjadinya fenomena kelendutan (*slack*). Hal ini harus dihindari karena fenomena kelendutan yang berulang dapat menyebabkan kegagalan *fatigue*. SFT jenis ini memiliki keunggulan dapat diterapkan pada kondisi laut dalam dengan kedalaman > 600 m dan panjang bentang > 4000 m (Østlid, 2010).

SFT pada Gambar 1(b) memiliki bentuk seperti jembatan bawah laut. SFT jenis ini memiliki nilai BWR = 1, sehingga tiang penyangga mengalami tegangan tekan. SFT tipe ini mendapatkan tambahan kekakuan dari tiang penyangganya. Penggunaannya dibatasi oleh kedalaman laut, karena konstruksi tiang penyangga tidak dapat menjangkau laut dalam.

SFT pada Gambar 1(c) memiliki nilai BWR < 1 atau dengan kata lain gaya berat lebih besar dari gaya apung sehingga membutuhkan ponton sebagai penyeimbang. Kelebihan SFT ini adalah tidak terpengaruh terhadap kedalaman air. Tipe ini sensitif terhadap beban angin, ombak, arus dan risiko ponton tertabrak oleh kapal.

SFT pada Gambar 1(d) adalah bentuk yang paling sederhana, karena tidak memiliki tambahan penyangga pada strukturnya. Dengan nilai BWR = 1 membuatnya netral terhadap gaya angkat maupun berat. Kekakuan SFT tipe ini hanya berasal dari kekakuan *bending* tabung sehingga memiliki bentang yang rendah, < 300 m (Østlid, 2010). Tipe ini digunakan untuk kebutuhan pejalan kaki atau lalu lintas intensitas rendah.

2.3. Material Konstruksi

Pemilihan material yang tepat merupakan hal yang harus diperhatikan agar kegagalan struktur dapat dihindari. Pemilihan material dilakukan berdasarkan performa struktural dan fungsional yang ingin dicapai. Selain itu, perlu diperhatikan beberapa faktor seperti ketahanan terhadap kondisi lingkungan, fabrikasi, metode

konstruksi, perawatan, waktu penyediaan dan biaya material dan konstruksi (Giulio Martire, 2010).

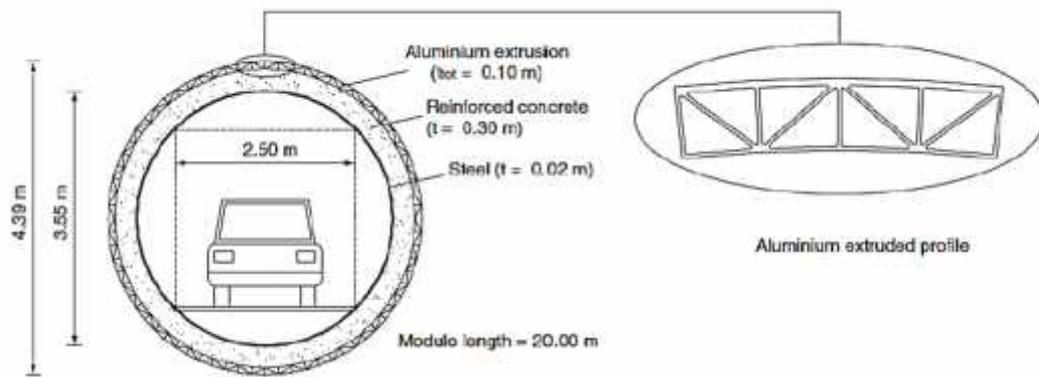
Struktur lepas pantai umumnya dibangun menggunakan beton dan baja sebagai material karena sudah teruji dan tersedia banyak data-data pengujian. Beberapa material yang umum digunakan atau masih tahap penelitian yang dapat digunakan sebagai material SFT adalah beton, baja, material komposit dan paduan aluminium (Faggiano et al., 2005)

Optimalisasi performa struktural, dapat dicapai dengan kombinasi penggunaan material yang berbeda. Setiap material ditujukan untuk memenuhi fungsinya masing-masing, sehingga secara keseluruhan diperoleh manfaat dari setiap material dan kekurangannya dapat saling ditutupi.

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*). Selain kelebihan, 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 membuatnya menjadi pilihan material yang layak dan cocok karena menyediakan kekuatan dan kekakuan struktur. Kombinasi beton dan lapisan baja yang menjadikan komposit baja-beton telah luas digunakan dan sukses pada pembangunan terowongan terbenam (*immersed tunnel*) (Saveur, 1997).

Untuk menutupi kekurangan baja yang rentan 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, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2 (Mazzolani et al., 2008).



Gambar 2. Tampilan penampang dan material prototipe SFT (Mazzolani et al., 2008).

2.4. Beban Tetap

Beban permanen adalah beban yang tetap ada pada SFT tanpa adanya pembebanan eksternal. Beban permanen terdiri dari berat struktur G_s , gaya apung F_b dan tekanan hidrostatik P_h . Berat struktur yang merupakan fungsi dari ketebalan dinding SFT dapat dihitung menggunakan persamaan (1):

$$G_s = \rho_s g \frac{D_o^2 - D_i^2}{4} L \quad (1)$$

$$D_o = D_i + 2t \quad (2)$$

dimana D_o , D_i , t , L dan ρ_s masing-masing adalah diameter luar, diameter dalam, ketebalan dinding, panjang SFT, dan massa jenis SFT.

Salah satu ciri khas dari SFT adalah menerima gaya apung menurut prinsip Archimedes. Besarnya gaya apung sama dengan berat air yang terpindahkan oleh volume SFT. Gaya apung dapat dihitung dengan persamaan (3):

$$F_b = \rho_w g \frac{D_o^2}{4} L \quad (3)$$

dimana ρ_w dan g masing-masing adalah massa jenis air dan percepatan gravitasi.

Tekanan hidrostatik termasuk ke dalam beban permanen yang diterima oleh SFT. Tekanan hidrostatik merupakan tekanan yang besarnya bergantung pada kedalaman. Semakin dalam posisi SFT dipasang, tekanan hidrostatik yang diterimanya semakin besar. Sehingga pada struktur SFT yang diletakkan pada kedalaman tertentu, tekanan hidrostatik harus dipertimbangkan. Tekanan hidrostatik dapat dihitung menggunakan persamaan (4):

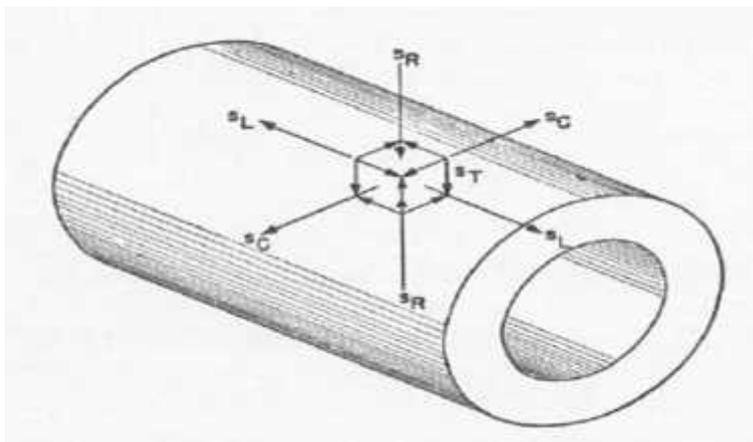
$$P_h = \rho_w g z \quad (4)$$

dimana z adalah posisi kedalaman diukur dari permukaan air.

2.5. Stress pada Tube Lingkaran

Sebuah dinding tube yang menerima beban *internal* dan *external pressure* akan mengalami empat *stress* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, yaitu:

- a. *Longitudinal Stress*, s_L
- b. *Circumferential or Hoop Stress*, s_C
- c. *Radial Stress*, s_R
- d. *Shear or Torsional Stress*,



Gambar 3. Stress pada sebuah tube silinder

Untuk aplikasi SFT dengan beban utama tekanan external dan gaya apung, longitudinal stress akibat internal pressure (tekanan atmosfer) sama dengan nol,

karena ujung-ujung SFT adalah terbuka, tidak seperti pipa dan bejana tekan pada industry petro kimia dan pembangkit daya. Longitudinal stress akibat bending juga sama dengan nol, karena seluruh permukaan tube menerima beban seragam baik beban dari gaya apung, maupun tekanan hydrostatis. Namun ketiga stress yang lain kemungkinan besar selalu ada dan akan dianalisis pada penelitian ini.

2.5.1 Hoop Stress

Hoop stress akibat dari *internal* atau *external pressure* dapat ditentukan dengan persamaan (5):

$$\sigma_h = p \frac{D-t}{2t} \quad (5)$$

dimana, D dan t masing-masing adalah diameter luar dan tebal tube

Persamaan (5) berlaku untuk shell tipis seperti pipa dan bejana tekan. Untuk aplikasi SFT dengan dinding yang tebal, hoop stress akibat tekanaan internal atau external ditentukan dari persamaan (6)

$$\text{Hoop stress,} \quad \sigma_h = A + \frac{B}{r^2} \quad (6)$$

dimana,

$$A = \left(\frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \right) \quad (7)$$

$$B = \left(\frac{(P_i - P_o) r_i^2 r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)} \right) \quad (8)$$

Keterangan symbol pada persamaan (7) dan (8):

- P_i = Internal pressure
- P_o = External pressure
- r_i = Jari-jari dalam
- r_o = Jari-jari luar
- r = posisi radial pada dinding tube ($r_i \leq r \leq r_o$)

2.5.2. Radial Stress

Radial stress pada sebuah tube yang menerima beban tekanan external dapat ditentukan dengan persamaan (9):

$$\tau_r = A - \frac{B}{r^2} \quad (9)$$

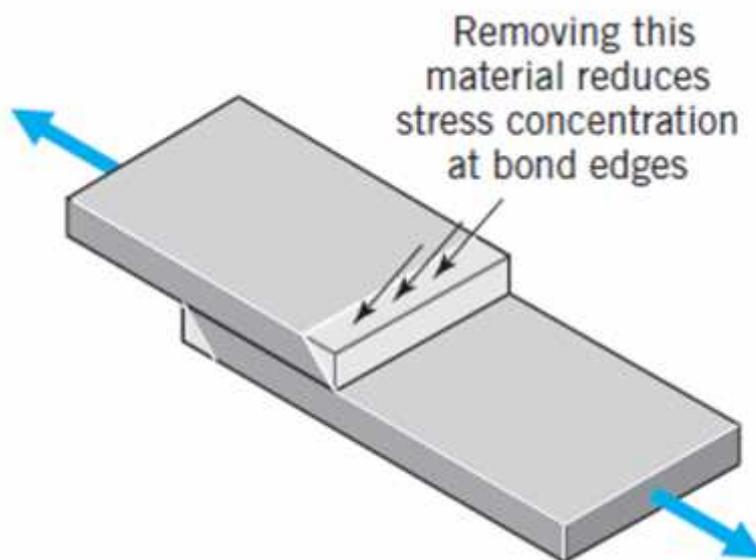
Dimana A dan B masing-masing dihitung dengan persamaan (7) dan (8)

2.6. Adhesive Bonding Joint

Adhesive Bonding untuk logam merupakan salah satu bidang yang berkembang pesat sehingga mempengaruhi hampir semua jenis desain produk. Penyambunan dengan *adhesive bonding* mempunyai beberapa keuntungan, antara lain tidak memerlukan lubang dalam menerapkannya serta tidak memerlukan sekrup dan paku keling. *Bonding* pun tidak memerlukan temperatur yang tinggi dan tidak menimbulkan *warping* atau tegangan sisa seperti pada pengelasan. Ketika lapisan *bonding* diaplikasikan, bahan perekat yang digunakan cenderung sedikit sehingga dapat mengurangi biaya produksi. Hal ini dapat terjadi karena tegangan yang terjadi pada material yang akan di-*bonding* tersebar pada area yang luas namun hanya terkonsentrasi pada bagian tepi kontak material.

Penggunaan *adhesive bonding* menghasilkan permukaan luar yang halus sehingga dapat mengurangi gesekan fluida dalam aplikasi yang melibatkan aliran fluida atau gas seperti pada sayap pesawat. Hampir semua material padat dapat diterapkan metode *bonding* menggunakan spesifikasi dan bahan perekat *bonding* yang sesuai. Ketika menerapkan *bonding* pada logam yang berbeda, lapisan *bonding* akan mengisolasi arus galvanik secara efektif. Fleksibilitas bahan perekat *bonding* dapat menahan ekspansi termal dari material yang di-*bonding*. Fleksibilitas ini membantu menyerap beban benturan. Ikatan perekat *bonding* juga dapat meredam dan mengurangi getaran atau transmisi suara serta dapat mengurangi kebocoran fluida atau gas yang dapat merusak lapisan *bonding*. Beberapa jenis perekat *bonding* membutuhkan temperatur pengeringan pada 95°C hingga 260°C selama beberapa jam.

Adhesive *bonding* seperti pada Gambar 4 berfungsi sebagai salah satu komponen pada sistem *bonding* komposit, dimana interaksi antara perekat *bonding* dengan bahan yang terikat akan mempengaruhi sifat dan karakteristik keduanya. Banyaknya jenis perekat *bonding* di pasaran dapat mempersulit pemilihan perekat terbaik untuk aplikasi tertentu. Pemilihan perekat perlu memperhatikan literatur teknis khusus, informasi dari pemasok perekat, dan hasil pengujian.



Gambar 4. *Adhesives-Bonded metal lap joint*

Faktor keamanan dan lingkungan menjadi pertimbangan penting bagi industri yang memproduksi perekat *bonding*. Peraturan federal di US, sebagai contoh, mengontrol penggunaan perekat *bonding* berbasis pelarut tertentu yang dapat mengeluarkan gas yang mudah terbakar atau beracun. Beberapa perekat *bonding* tidak dapat digunakan untuk aplikasi tertentu karena menimbulkan bau yang tidak sedap. Banyak perekat *bonding* menggunakan minyak bumi sebagai bahan baku utamanya sehingga banyak dilakukan penelitian untuk menemukan bahan baku alternatif untuk produksi perekat *bonding*. Selain itu dilakukan juga penelitian untuk mencari bahan perekat *bonding* yang hanya membutuhkan temperatur rendah serta untuk mempersingkat waktu pengeringan perekat *bonding* untuk mengurangi biaya

Struktur perekat *bonding* yang umum digunakan adalah *thermosetting*, berbeda dengan *thermoplastic* seperti perekat karet dan lem yang digunakan di pesawat. Perekat umumnya ditujukan untuk aplikasi tugas ringan yang membutuhkan kekuatan rendah. Kekuatan geser dari beberapa *epoxi* satu bagian yang bertekanan mencapai 70 MPa, tetapi sebagian besar perekat struktural memiliki kekuatan geser antara 25 hingga 40 MPa (Juvinall and Marshek, 2011).

BAB 3. METODE PENELITIAN

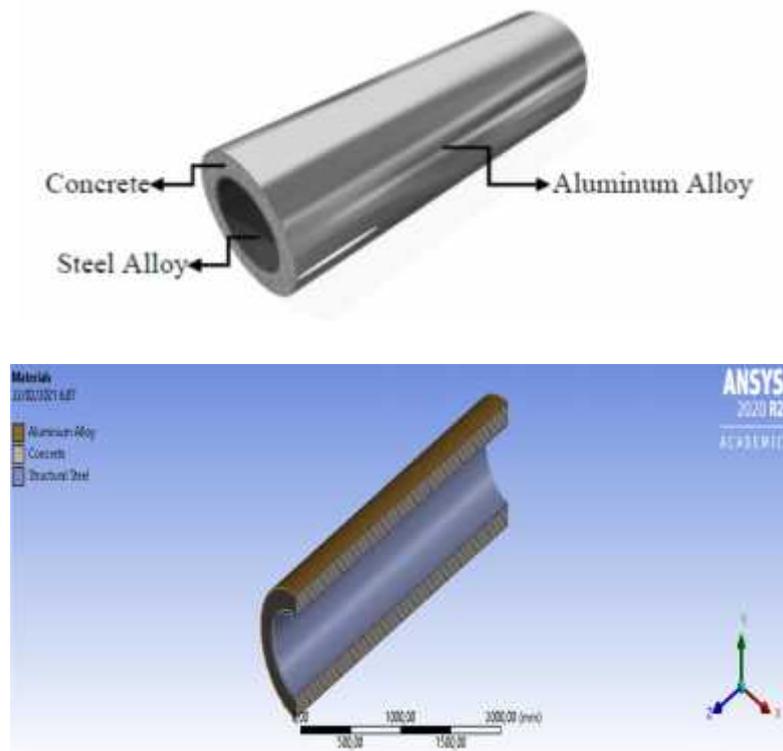
Stress assessment pada penelitian SFT yang sedang diajukan dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan ANSYS APDL commercial program. Secara umum langkah-langkah analisis dengan ANSYS terdiri dari tiga tahap utama, yaitu (1) pre-processing, (2) solution, dan (3) post-processing.

3.1. Pre-processing

Pre-processing merupakan tahap awal dalam melakukan simulasi dengan Metode Elemen Hingga (MEH). Pada tahap *pre-processing* dilakukan pemodelan geometri hingga *meshing*.

Geometry Modelling

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 lapis (*bonding tube*) seperti Gambar 5.



Gambar 5. Silinder berlapis dengan bonding joint

Bonding tube yang disimulasikan pada penelitian ini dimodelkan dalam tiga konfigurasi geometri. Variasi geometri diterapkan pada variasi perbandingan diameter luar tube terhadap panjang tube (D/L), dimana panjang tube L adalah tetap 25m. Diameter dalam (d) tube *cylinder* adalah 80% dari diameter luar (D). Ketebalan lapisan *steel* adalah 4,77% dari ketebalan keseluruhan (T), lapisan *concrete* adalah 71,43% dari ketebalan keseluruhan (T), dan tebal lapisan *aluminum* adalah 23,8% dari ketebalan keseluruhan (T). Ketiga variasi model geometri tersebut diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Model Geometri

Variasi	Material	D_i	D_o	T	D/L	d	D	L	T
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Geometry A	<i>Steel</i>	5,00	5,06	0,03	1/4	5,00	6,25	25	0,63
	<i>Concrete</i>	5,06	5,95	0,45					
	<i>Aluminum</i>	5,95	6,25	0,15					
Geometry B	<i>Steel</i>	4,44	4,50	0,03	1/4,5	4,44	5,56	25	0,56
	<i>Concrete</i>	4,50	5,29	0,40					
	<i>Aluminum</i>	5,29	5,56	0,13					
Geometry C	<i>Steel</i>	4,00	4,05	0,02	1/5	4,00	5,00	25	0,50
	<i>Concrete</i>	4,05	4,76	0,36					
	<i>Aluminum</i>	4,76	5,00	0,12					

Material Properties

Ada 3 material yang berbeda yang digunakan pada penelitian ini. Pipa lapis pertama adalah baja, pipa lapis kedua adalah beton, dan pipa lapis ketiga adalah material aluminum. Sifat material yang digunakan pada penelitian ini untuk baja, beton, dan aluminium diberikan masing-masing pada Tabel 2, 3, dan 4.

Tabel 2. Material properties – structural steel

No.	Property	Value	Unit	
1	Density	7850	Kg/m ³	
2	Isotropic Elasticity	Derive from	Young's modulus and poisson's ratio	
3		Young's Modulus	2×10^5	MPa
4		Poisson's ratio	0,3	
5		Bulk modulus	16667×10^5	MPa
6		Shear modulus	76923×10^4	MPa
7	Tensile Yield Strength	2500	MPa	
8	Compressive Yield Strength	2500	MPa	
9	Tensile Ultimate Strength	4600	MPa	
10	Compressive Ultimate Strength	0	MPa	

Tabel 3. Material properties – concrete

No.	Property	Value	Unit	
1	Density	2300	Kg/m ³	
2	Isotropic Elasticity	Derive from	Young's modulus and poisson's ratio	
3		Young's Modulus	3×10^4	MPa
4		Poisson's ratio	0,18	
5		Bulk modulus	1562×10^4	MPa
6		Shear modulus	12712×10^4	MPa
7	Tensile Yield Strength	0	MPa	
8	Compressive Yield Strength	0	MPa	
9	Tensile Ultimate Strength	5	MPa	
10	Compressive Ultimate Strength	410	MPa	

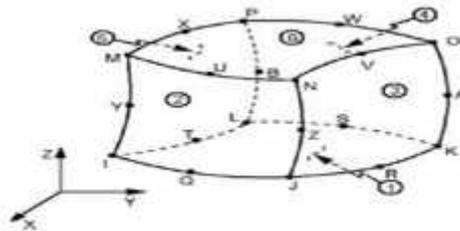
Tabel 4. *Material properties – aluminum alloy*

No.	Property		Value	Unit
1	Density		2770	Kg/m ³
2	Isotropic Elasticity	Derive from	Young's modulus and poisson's ratio	
3		Young's Modulus	71 x 10 ⁴	MPa
4		Poisson's ratio	0,33	
5		Bulk modulus	69608 x 10 ⁴	MPa
6		Shear modulus	26692 x 10 ⁴	MPa
7	Tensile Yield Strength		2800	MPa
8	Compressive Yield Strength		2800	MPa
9	Tensile Ultimate Strength		3100	MPa
10	Compressive Ultimate Strength		0	MPa

Element Type

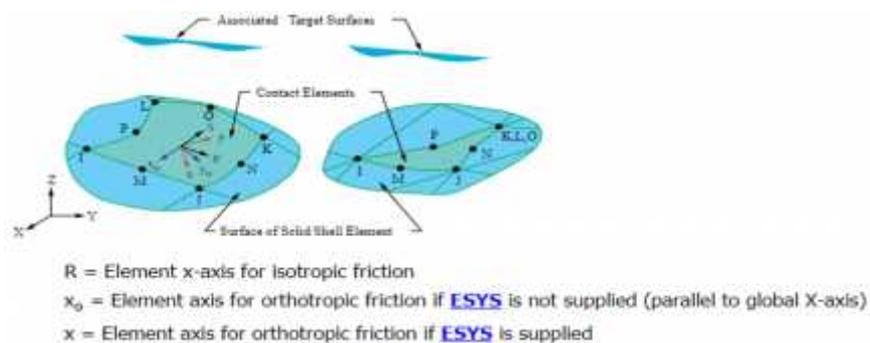
Tipe elemen yang digunakan pada pemodelan ini dipilih secara otomatis oleh ANSYS program, yaitu SOLID186, CONTA174, TARGE170, dan SURF154. Sifat-sifat elemen tersebut dijelaskan sebagai berikut:

SOLID186. *Element type* SOLID186 seperti ditunjukkan pada Gambar 6 merupakan elemen solid tiga dimensi (*brick element*) orde tinggi 20 node yang memiliki tiga derajat kebebasan per node (perpindahan nodal arah sumbu x, y, dan z). Elemen ini mendukung untuk perilaku plastisitas, hiperelastisitas, *creep*, strain hardening, large deflection, dan large strain.



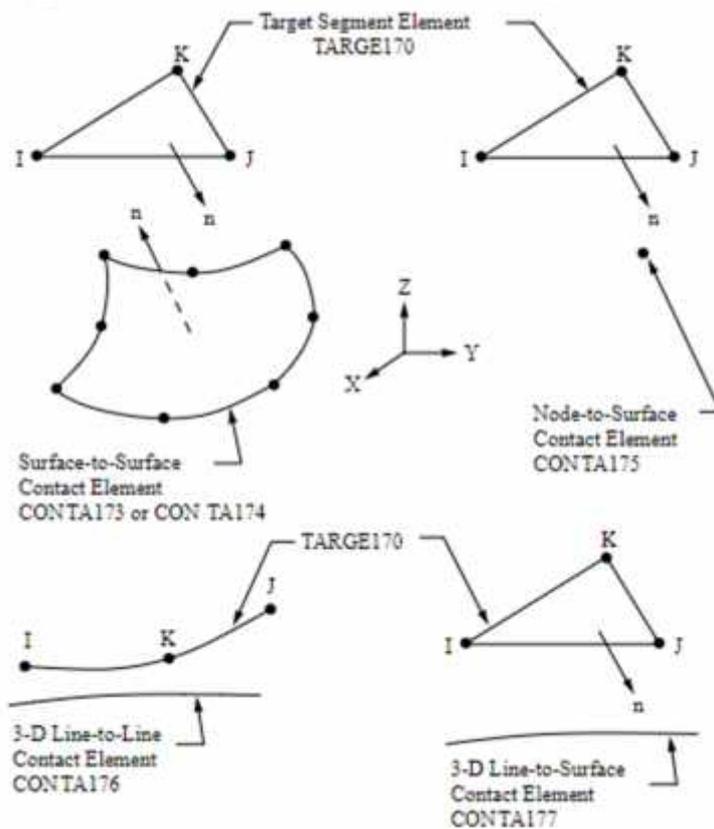
Gambar 6. ANSYS element SOLID186

CONTA174. *Element type* CONTA174 (ditunjukkan pada Gambar 7) digunakan untuk merepresentasikan kontak dan geser antara permukaan target 3D dan permukaan yang dapat berdeformasi. Element CONTA174 berpasangan dengan element TARGET170 sebagai permukaan Target. Dalam kasus kontak umum, sebagai permukaan target dapat digunakan elemen CONTA174 (untuk permukaan yang dapat berdeformasi) atau elemen TARGE170 (hanya untuk benda kaku). Elemen CONTA174 dan TRGET170 terletak pada permukaan elemen solid atau *shell* 3D dengan orde tinggi (midside node), seperti SOLID186, SOLID187, SHELL281, SOLID226, dan SOLID279



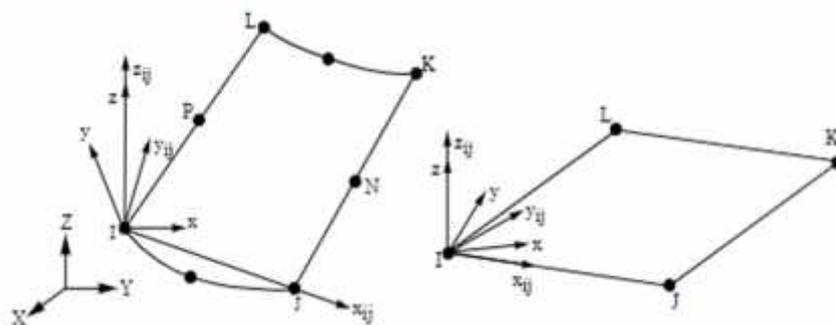
Gambar 7. ANSYS elemen kontak CONTA174

TARGE170. *Element type* TARGE170 seperti ditunjukkan pada Gambar 8, digunakan untuk mewakili berbagai permukaan target 3D untuk elemen kontak yang berkaitan (CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176, dan CONTA177). Elemen kontak itu sendiri melapisi elemen solid atau garis yang menggambarkan batas benda yang dapat berdeformasi dan berpotensi bersentuhan dengan permukaan kontak.



Gambar 8. Element type TARGE170

SURF154. Elemen type SURF154 seperti ditunjukkan pada Gambar 9, digunakan untuk berbagai aplikasi beban dan efek permukaan dalam analisis struktur tiga dimensi. Elemen ini dapat dilapiskan ke permukaan 3D apa pun. Berbagai beban dan efek permukaan mungkin dapat diberikan secara bersamaan.



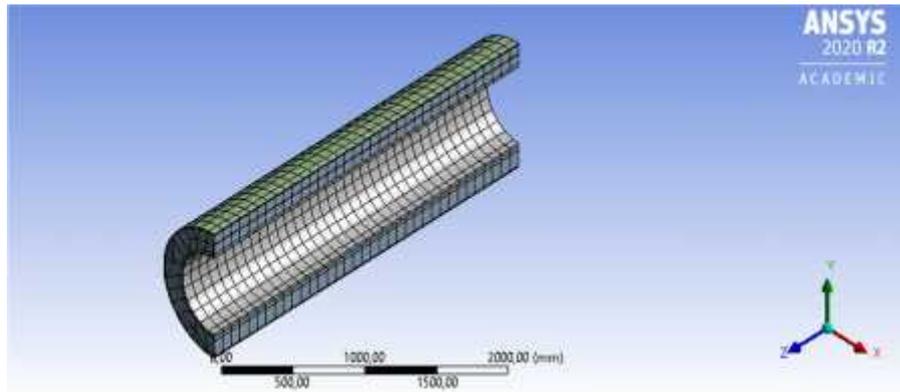
Gambar 9. ANSYS element type SURF154

Meshing

Meshing yang diterapkan oleh program ANSYS merupakan *mesh low order*. *Mesh sizing* yang diterapkan adalah dengan ukuran 650 mm. Hasil proses *meshing* dapat dilihat pada table formulasi matriks elemen seperti pada Tabel 5. *Typical finite element mesh* ditunjukkan seperti pada Gambar 10.

Tabel 5. *Element Matrix Formulation Times Bonding Pipe Analysis*

Element Matrix Formulation Times				
Type	Number	Ename	Total CP	Ave CP
1	936	SOLID186	0,094	0,000100
2	1750	SOLID186	0,281	0,000161
3	1156	SOLID186	0,203	0,000176
4	1704	CONTA174	0,188	0,000110
5	1704	TARGE170	0,016	0,000009
6	2346	CONTA174	0,234	0,000100
7	2346	TARGE170	0,016	0,000007
8	1156	SURF154	0,031	0,000027
9	792	SURF154	0,031	0,000039
10	1156	SURF154	0,078	0,000068
Time at end of element matrix formulation CP = 2,8125				



Gambar 10. *Typical finite element mesh*

3.2 Phase Solusi

Sebelum running solution (the ANSYS SOLVE command issues), terlebih dahulu diberikan kondisi batas dan pembebanan pada model.

Kondisi Batas (Boundary Condition)

Kondisi Batas yang diterapkan pada pemodelan ini adalah kondisi *fixed support* pada kedua ujung tube silinder.

Loading

Beban yang diberikan pada pemodelan ini adalah tekanan external oleh air laut pada kedalaman z (tekanan hydrostatis) dan tekanan internal sebesar 1 atm. Pada pemodelan ini tekanan external dievaluasi untuk tiga kedalaman, masing-masing adalah 500m, 700m dan 900m dibawah permukaan laut. Massa jenis air laut yang digunakan pada simulasi ini adalah 1070 kg/m^3 . Tekanan external untuk setiap kedalaman diberikan pada Tabel 6.

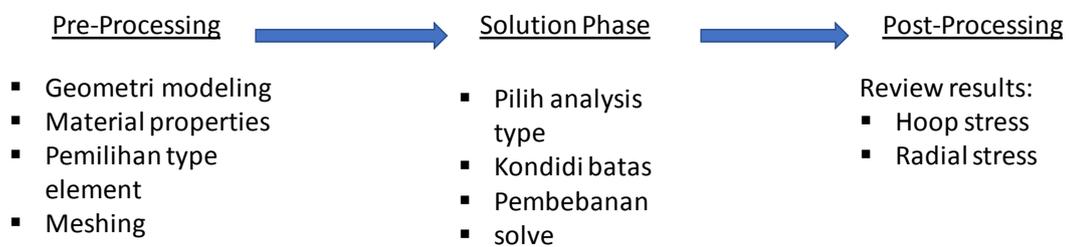
Tabel 6. Tekanan hidrostatik pada kedalaman 500,700, dan 900m

Variasi	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

3.3 Post-Processing

Pada tahap ini dilakukan review hasil dan analisis hasil. Adapun hasil yang akan direview dan dianalisis adalah distribusi hoop stress dan radial stress sepanjang ketebalan dinding tube.

Keseluruhan proses dari geometri modeling sampai dengan review hasil ditunjukkan pada Gambar 11.



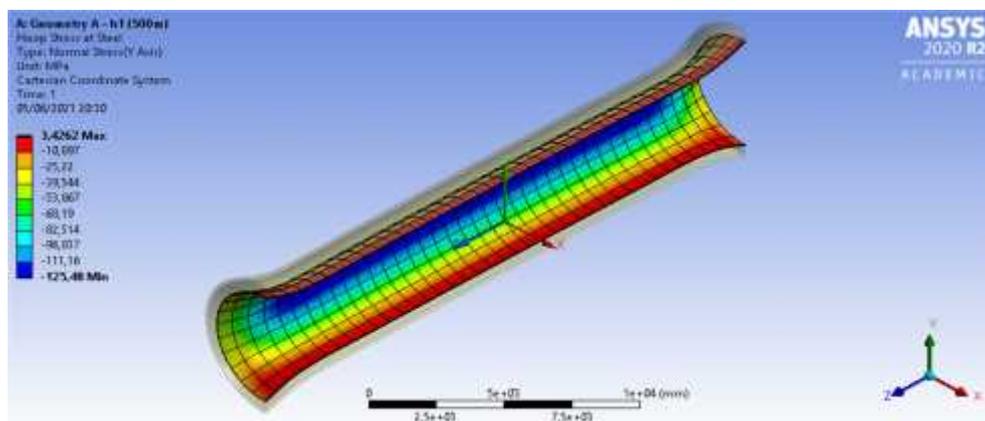
Gambar 11. Proses modeling dan analysis elemen hingga dengan ANSYS.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah distribusi stress sepanjang ketebalan lapisan bonding tubes akibat tekanan external, yang meliputi hoop stress, radial stress, dan shear stress. Sedangkan normal stress dianggap tidak ada, karena tidak ada gaya aksial langsung ataupun beban bending yang bekerja.

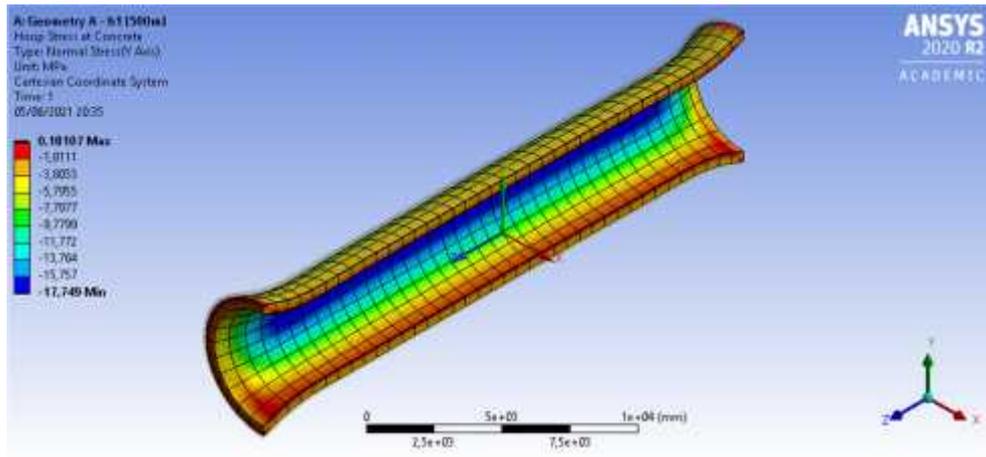
4.1 Hoop Stress

Typical hoop stress contour plot yang terjadi pada setiap lapisan ditunjukkan pada Gambar 12 yang diplot untuk stress yang terjadi akibat tekanan eksternal pada kedalaman 500 m. Dapat dilihat bahwa maksimum hoop stress pada lapisan baja, concrete, dan aluminium, masing-masing adalah 125.48 MPa, 17.75 MPa, dan 40.13 MPa. Ketiga maksimum stress ini adalah dalam bentuk tekan. Dengan membandingkan nilai maksimum stress ini, dapat dilihat bahwa stress terbesar terdapat pada lapisan paling dalam yaitu baja, dan terkecil pada lapisan tengah yaitu concrete. Nilai maksimum *hoop stress* ditunjukkan pada Tabel 7.

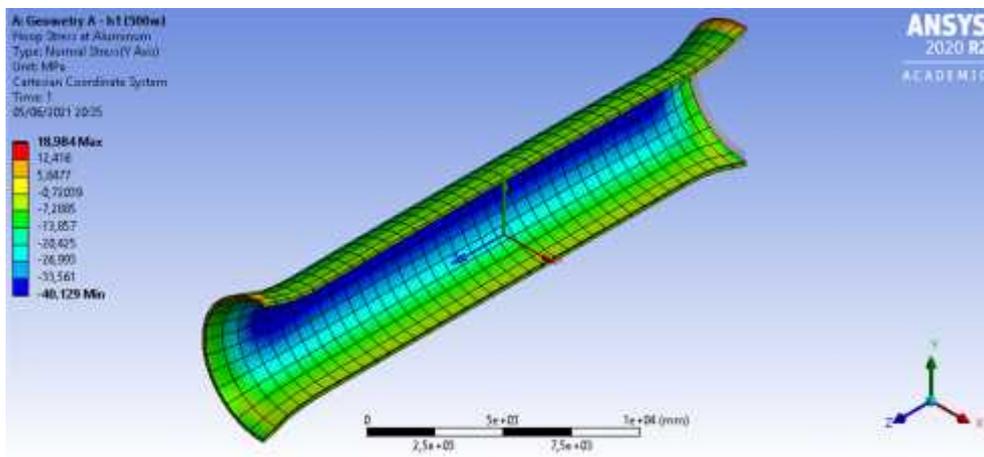


(a) lapisan baja

Gambar 12. contour hoop stress pada (a) lapisan baja



(b) beton



(c) aluminium

Gambar 12. (lanjutan) contour hoop stress pada (b) lapisan concrete, (c) lapisan aluminium

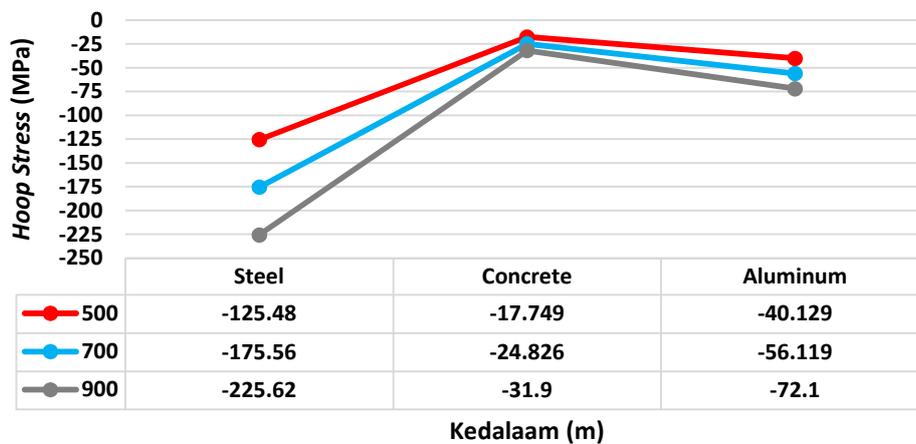
Tabel 7. hoop stress pada lapisan bonding tube

Kedalaman (m)	Material	Geometri		
		Geometri A	Geometri B	Geometri C
500	Steel	-125,48	-121,79	-125,09
	Concrete	-17,749	-17,255	-17,625
	Aluminum	-40,129	-39,094	-40,084

700	Steel	-175,56	-170,4	-175,02
	Concrete	-24,826	-24,135	-24,747
	Aluminum	-56,119	-54,669	-56,055
900	Steel	-225,62	-218,98	-224,92
	Concrete	-31,9	-31,011	-31,798
	Aluminum	-72,1	-70,238	-72,018
500	<i>Bonding pipe</i>	-125,48	-121,79	-125,09
700		-175,56	-170,4	-175,02
900		-225,62	-218,98	-224,92

Dari Tabel 7 dapat dibaca bahwa material pada lapisan tengah (beton) mempunyai hoop stress maksimum terkecil. Hasil ini menunjukkan bahwa ada pengaruh sifat material terhadap nilai maksimum stress. Sedangkan jika stress dihitung menggunakan persamaan (6), maka stress terbesar terdapat pada lapisan paling dalam seperti hasil simulasi ini, tapi berkurang secara kuadratis menuju permukaan luar. Sedangkan pada penelitian ini maksimum stress terkecil justru terjadi pada lapisan tengah, yaitu lapisan aluminium, seperti ditunjukkan pada Gambar 13.

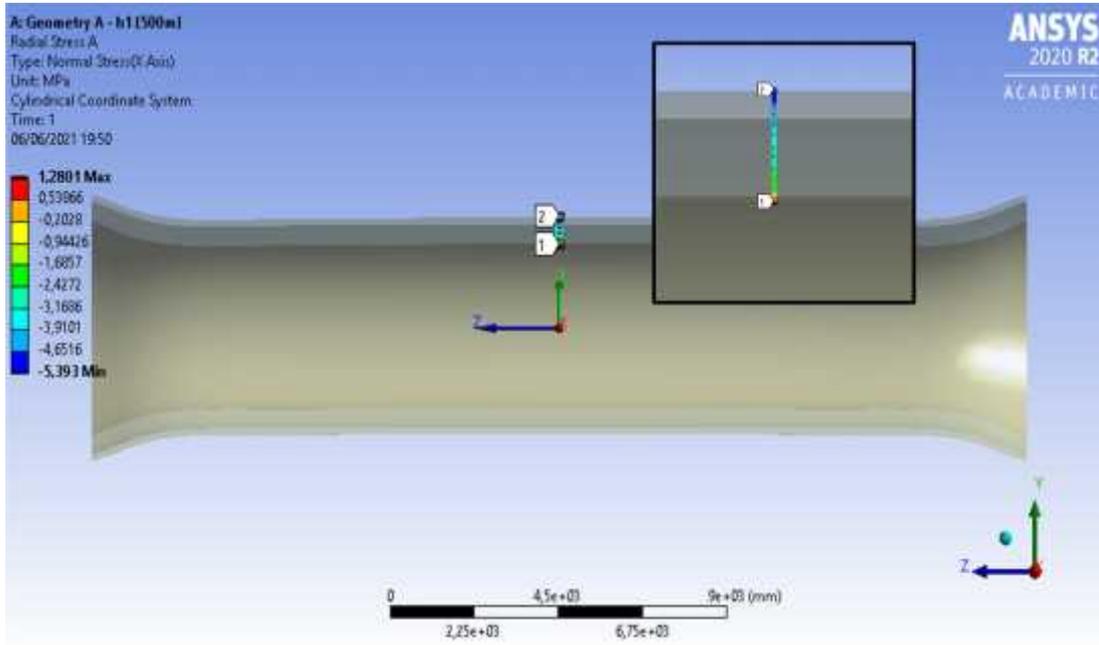
Pengaruh Kedalaman Terhadap Nilai Hoop Stress Geometri A Bonding Pipe



Gambar 13. Nilai maksimum stress pada lapisan bonding tube

4.2. Radial Stress

Gambar 14 menunjukkan typical contour radial stress sepanjang ketebalan yang diplot untuk tube pada kedalaman 500 m. Nilai numerik radial stress diberikan pada Tabel 8.



Gambar 14. Typical radial stress sepanjang ketebalan bonding tube

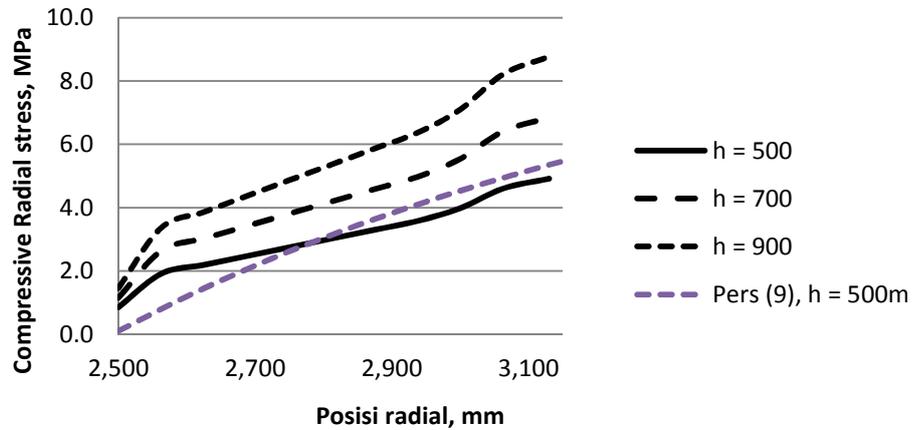
Tabel 8. Nilai radial stress sepanjang ketebalan bonding tubes

Radial Stress Section A										
Material	Titik	Geometri A			Geometri B			Geometri C		
		Kedalaman			Kedalaman			Kedalaman		
		500	700	900	500	700	900	500	700	900
Steel	1	1,28	1,83	2,38	-	-	-	-	-	-
Concrete	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	1,65	2,27	2,89	1,91	2,63	3,36	1,91	2,63	3,36
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	1,97	2,72	3,47	2,19	3,02	3,86	2,21	3,06	3,90
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	2,30	3,18	4,05	2,47	3,42	4,36	2,52	3,48	4,45
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

		2,62	3,63	4,64	2,74	3,81	4,86	2,82	3,91	4,99
	6	- 2,94	- 4,08	- 5,22	- 3,02	- 4,19	- 5,37	- 3,12	- 4,33	- 5,54
	7	- 3,27	- 4,54	- 5,80	- 3,30	- 4,58	- 5,87	- 3,42	- 4,75	- 6,08
	8	- 3,59	- 4,99	- 6,39	- 3,58	- 4,97	- 6,36	- 3,72	- 5,17	- 6,62
Aluminum	9	- 3,92	- 5,45	- 6,98	- 3,98	- 5,54	- 7,09	- 2,89	- 4,01	- 5,14
	10	- 4,83	- 6,72	- 8,62	- 4,60	- 6,41	- 8,21	- 3,62	- 5,05	- 6,47
	11	- 5,39	- 7,51	- 9,63	- 4,91	- 6,84	- 8,77			
Maximum (Tekan)		- 5,39	- 7,51	- 9,63	- 4,91	- 6,84	- 8,77	- 3,72	- 5,17	- 6,62

Dari Tabel 8 dapat diplot typical distribusi radial stress sepanjang ketebalan seperti ditunjukkan pada Gambar 15. Nilai radial stress seperti diberikan pada Tabel 8 adalah tekan, tetapi pada Gambar 15, stress tersebut diplot sebagai positive untuk memudahkan memahami hasil stress ini. Dapat dilihat bahwa maksimum stress terkecil terdapat pada lapisan dalam dan makin besar menuju lapisan luar. Secara analitik, distribusi radial stress akibat tekanan external sepanjang ketebalan tube dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (9) dan hasilnya juga diplot pada Gambar 15 untuk kedalaman 500m. Persamaan (9) menghasilkan stress terkecil pada lapisan dalam dan bertambah secara kuadratik menuju permukaan luar, seperti pada Gambar 4.4. Kecendrungan yang sama diperoleh dari hasil analisis elemen hingga, tapi tidak secara kuadratik bertambah dari lapisan dalam menuju lapisan luar.

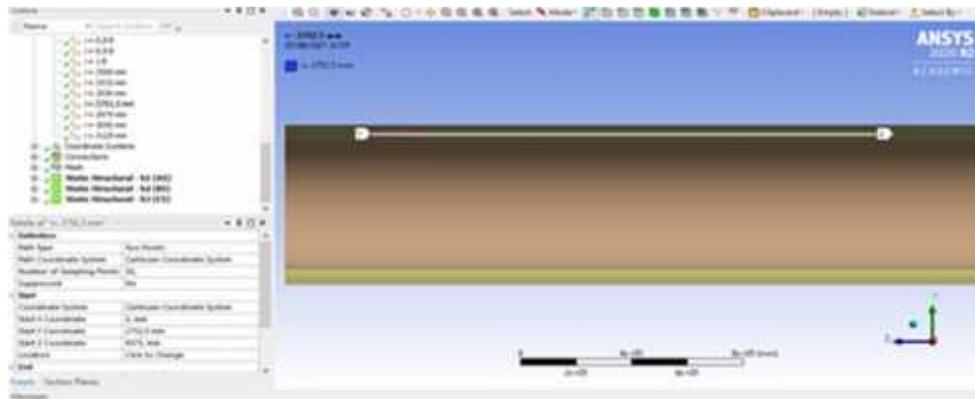
Distribusi radial stress



Gambar 15. Distribusi radial stress pada lapisan bonding tube.

4.3. Shear Stress

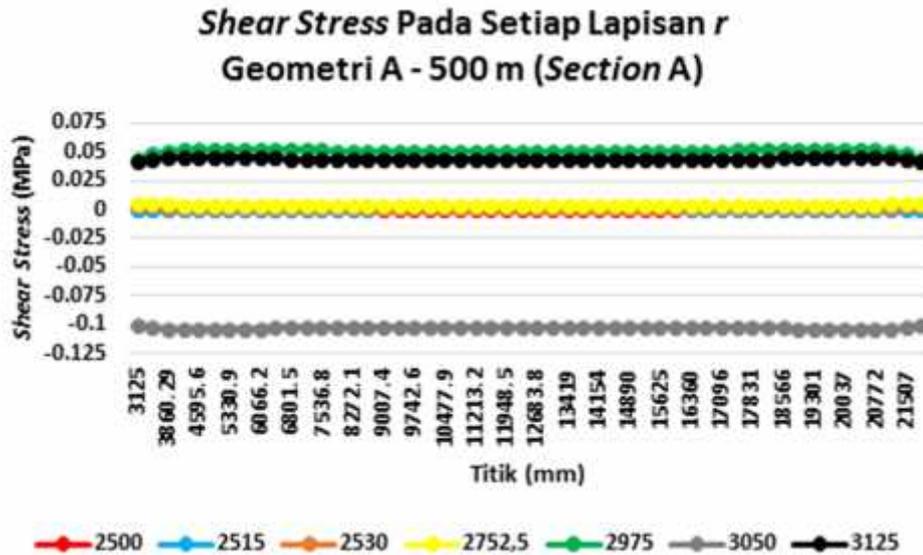
Nilai *shear stress* yang dianalisis merupakan *shear stress* pada setiap lapisan *bonding tube* untuk mengetahui pergeseran *element* material. Geometri *bonding tube* yang dianalisis untuk *shear stress* adalah geometri model A. Nilai *shear stress* pada lapisan didapatkan dengan membuat *path line* pada lapisan yang dipilih. *Path line* untuk analisis *shear stress* ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Path line untuk analisis shear stress pada lapisan bonding tube

Gambar 16 di atas merupakan *path line* untuk analisis *shear stress* pada lapisan *bonding tube* geometri A pada $r = 2752,5$ mm. Ada tujuh lapisan yang dianalisis untuk *shear stress*, yaitu pada $r = 2500$ mm, 2515mm, 2530mm, 2752.5mm, 2975mm, 3050mm, dan 3125mm.

Setiap lapisan dengan r yang telah ditentukan di atas kemudian diplot distribusi shear stress sepanjang arah aksial. Typical distribusi shear stress ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Typical distribusi shear stress pada arah aksial tube

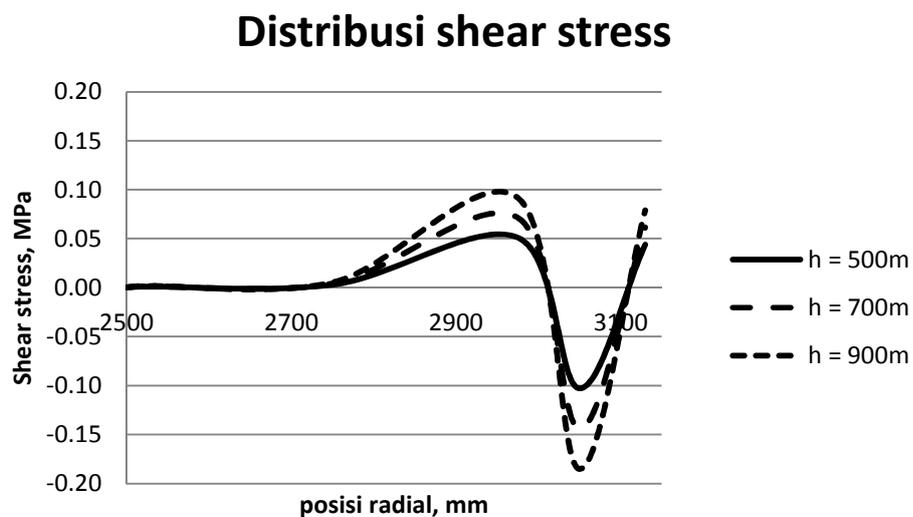
Nilai *shear stress* dari setiap lapisan kemudian diambil nilai maksimum, minimum dan rata-ratanya dan dicatat pada Tabel 9.

Tabel 9. Shear stress pada beberapa posisi radial bonding tube

Kedalaman	Material	r	Shear Stress		
			Maximum	Minimum	Average
500 m	Steel	2500	0,00018	-0,00082	-0,00032
		2515	0,00089	0,00061	0,00075
	-	2530	0,00332	0,00096	0,00214
	Concrete	2752,5	0,00573	0,00324	0,00448
	-	2975	0,05258	0,04413	0,04836
	Aluminum	3050	-0,10070	-0,10434	-0,10252
		3125	0,04508	0,04142	0,04325
700 m	Steel	2500	0,00025	-0,00115	-0,00045

		2515	0,00125	0,00084	0,00104
	-	2530	0,00468	0,00134	0,00301
	Concrete	2752,5	0,00806	0,00453	0,00630
	-	2975	0,07357	0,06174	0,06765
	Aluminum	3050	-0,14088	-0,14601	-0,14345
		3125	0,06306	0,05794	0,06050
900 m	Steel	2500	0,00032	-0,00149	-0,00058
		2515	0,00160	0,00108	0,00134
	-	2530	0,00604	0,00172	0,00388
	Concrete	2752,5	0,01039	0,00582	0,00811
	-	2975	0,09454	0,07934	0,08694
	Aluminum	3050	-0,18104	-0,18767	-0,18436
		3125	0,08104	0,07446	0,07775

Tabel 9 di atas merupakan data hasil *shear stress* pada *bonding tube* geometri A untuk nilai *shear stress maximum*, *minimum* dan *average* pada beberapa posisi radial. Berdasarkan data pada Tabel 9 dapat dibuat grafik distribusi maksimum *shear stress* seperti ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Distribusi maksimum *shear stress* sepanjang ketebalan *bonding tube*

Shear stress memiliki nilai absolut paling kecil dibandingkan dengan hoop stress maupun radial stress. Gambar 18 menunjukkan distribusi shear stress yang diplot dari lapisan paling dalam (baja) menuju lapisan paling luar (aluminium). Gambar 18 menunjukkan bahwa shear stress tidak signifikan antara lapisan baja dan beton, tapi cukup signifikan antara lapisan beton dan aluminium. Gambar 18 juga menunjukkan bahwa nilai shear stress makin besar jika posisi tube silinder makin dalam. Yang menarik dari Gambar 18 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.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

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

- a. Hoop stress merupakan stress terbesar dibandingkan dengan radial dan shear stress. Nilai terbesar maksimum hoop stress terdapat pada lapisan paling dalam (baja) dan yang terkecil terdapat pada lapisan tengah (beton).
- b. Radial stress dalam bentuk compressive memiliki nilai terbesar pada lapisan aluminium (lapisan terluar) dan makin kecil nilainya menuju lapisan paling dalam (baja)
- c. 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.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Variasi geometri yang diterapkan sebaiknya dibedakan berdasarkan ketebalan lapisan masing-masing material. Pada penelitian ini, variasi geometri yang diterapkan adalah pada rasio D/L sehingga perbedaan terdapat pada diameter *bonding tube*.
2. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan untuk *bonding tube* yang tidak diberi *stiffeners* dengan yang diberi *stiffeners* dengan hipotesis bahwa *stiffeners* yang diberikan dapat mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan akibat buckling pada *bonding tube*.

DAFTAR PUSTAKA

- Ewen, D., dkk. 2012, “*Applied Physics – 10th Edition*”. Pearson Education, Inc., U.S.A.
- Grinnell, 1981, “*Piping Design And Engineering – Sixth Edition*”. Grinnell Industrial Piping, Inc., U.S.A.
- Juvinall, R.C. dan Marshek, K.M., 2011, “*Fundamentals of Machine Component Design*”. John Wiley & Sons, Inc., United States of America.
- Kumar.A, E., dkk. 2017, “*Static and Dynamic Analysis of Pressure Vessels With Various Stiffeners*”. Dept. of Mechanical Engineering, K L University, India.
- Mazzolani, F.M., dkk. 2008, “*Structural Analysis of the Submerged Floating Tunnel Prototype in Qiandao Lake (PR of China)*”. University of Naples, Italy.
- Nayyar, M.L., 2000, “*Piping Handbook Seventh Edition*”. McGraw-Hill Companies, Inc., U.S.A.
- Setiawan, A.Y., 2016, “*Studi Numerik Limit Tekanan Pipa PVC Berpenguat Ijuk Dengan Beban Tekanan Internal dan Eksternal*”. Skripsi Program Studi Teknik Mesin Universitas Lampung, Indonesia.

Stress Assessment on Layered Bonding Tube under Hydrostatic External Pressure

(Stress Assessment pada Bonding Tube dengan Beban Tekanan Eksternal)

ASNAWI LUBIS, JAMRATUL AKMAL, MUHAMMAD RAHARDEAN 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 (tubes) 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 SOLID136, CONTA174, TARGET170, and SUPK154. 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

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

Sebuah konsep penyambungan 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 terapan yang ditempatkan di bawah permukaan air

pada kedalaman tertentu dan posisinya dipertahankan oleh tali tambat, ponton, atau tiang pancang. SFT dapat digunakan untuk menyambungkan 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 Kowal di Inggris pada tahun 1836, kemudian oleh Trygve Olsen Dale di Norwegia pada tahun 1924 (Khalid, 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 SPT. Pemilihan material dilakukan berdasarkan performa struktural dan fungsional yang ingin dicapai. Beberapa faktor yang perlu mendapat perhatian untuk material SPT antara lain adalah ketahanan terhadap korosi, kemudahan fabrikasi, metode konstruksi, perawatan, dan waktu penyediaan serta biaya material.

Struktur lapis 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 SPT adalah beton, baja, material komposit dan paduan aluminium (Paggiaro et al., 2005)

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

Dari sisi biaya, penggunaan baja sebagai material keseluruhan struktur tabung SPT 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*) (Savvas, 1997).

Untuk menutupi kekurangan baja yang dapat mengalami korosi, sebagai pelapis anti korosi dapat digunakan paduan aluminium di bagian luar SPT (Paggiaro et al., 2005). Konsep material komposit baja-beton-aluminium telah digunakan pada pembuatan prototipe SPT di Danau Qiondao, 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 analisa 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 SPT di danau Qiondao, 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

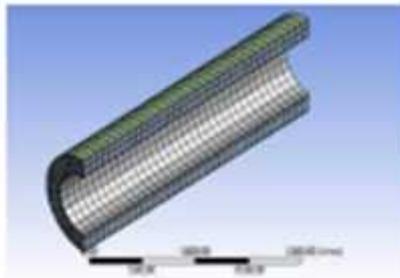
D, m	D_{in} , m	D_{out} , m	D_{s} , m
5.0	5.06	5.96	6.26

Material properties (MP) yang diperlukan pada penelitian ini adalah modulus Young E , dan Poisson's ratio ν . 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
ν	0.3	0.18	0.33

Tipe elemen yang diponakan 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 eksternal oleh air laut pada kedalaman z (tekanan hidrostatik) dan tekanan internal sebesar 1 atm. Pada pemodelan ini tekanan eksternal 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 eksternal untuk setiap kedalaman diberikan pada Tabel 3.

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

Notasi	Kedalaman, m	Eksternal 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_a sebesar berat fluida yang dipindahkan:

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

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:

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

Gaya apung pada SPT 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 dipot dari lapisan paling dalam menuju lapisan paling luar. Distribusi stress yang ditampikan 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 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 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)

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{(P_i - P_o) r_o^2 r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)^2} \quad (4)$$

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 ν . 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, dimana stress pada lapisan beton (tengah)

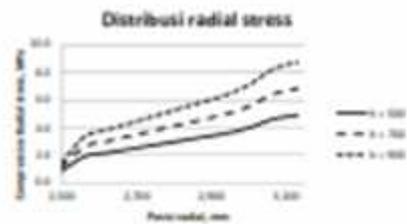
lebih rendah daripada lapisan baja (dalam) dan lapisan luar (aluminium). Hal ini barangkali dapat dipahami dari hubungan konstitutive stress-strain oleh hukum Hooke:

$$\sigma = E \epsilon \quad (5)$$

dengan σ adalah tegangan normal dan ϵ 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 positive 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):

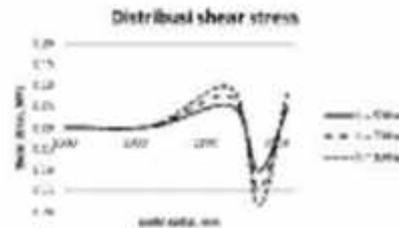
$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{(P_i - P_o) r_o^2 r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2)^2} \quad (5)$$

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 (lay-out 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 PT 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 Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil Vol 1(2)*, (pp.1-7).
- Fuggiano, B., Landolfo, K., & Marzolani, F. (2005). The SPT: an innovative solution for waterway strait crossing. *IABSE Symposium Report*, 90(10), 36-42.
- Marzolani, F.M., Landolfo, K., Fuggiano, B., Esposto, M., Perotti, F., & Barbulla, G. (2006). Structural analysis of submerged floating tunnel prototype in Qiantou Lake (PR of China). *Advances in Structural Engineering*, 11(4), (pp.439-454).
- Osifid, H. (2010). When is SPT competitive? *Procedia Engineering*, 4, 3-11.
- Savena, J. (1997). *Structural Design of Immersed Tunnels, Tunneling and Underground Space Technology*. 12, 93-109. [https://doi.org/10.1016/S0886-7796\(97\)90015-8](https://doi.org/10.1016/S0886-7796(97)90015-8)
- Timoshenko, S., and Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of Plates and Shells*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.

Penyaji

Astawi Lubis

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

Email: astawi.lubis@feng.unila.ac.id

Janiatul Akmal

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

Muhammad Rahaedian Putra

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik
Universitas Lampung

Novri Tanti

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

Ahmad Su'ali

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

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

LAMPIRAN A2: Slide Presentasi SNTTM Ke-19, UMM Yogyakarta

Stress Assessment on Layered Bonding Tube under Hydrostatic External Pressure



BKSTM
SEMINAR NASIONAL TAHUNAN
TEKNIK MESIN ke - 19
"Sesuai Berkeadilan di Era Digital"



Teknik Mesin



UMY

UNIVERSITAS
MUHAMMADIYAH
YOGYAKARTA



BKSTM



Asnawi Lubis
Universitas Lampung



Pendahuluan



Pendahuluan

01

Latar Belakang

Penyeberangan antar pulau adalah salah satu isu besar di Indonesia. Sebuah konsep penyeberangan antar pulau yang saat ini menjadi perhatian para peneliti adalah terowongan layang bawah air atau *submerged floating tunnel (SFT)*.

02

Submerged Floating Tunnel (SFT)

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 (Ostid, 2010). Hingga saat ini penelitian *SFT* terus berkembang di beberapa negara seperti Norwegia, Korea, China, Jepang dan Italia.

03

Material *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.

04

Penerapan Model *SFT*

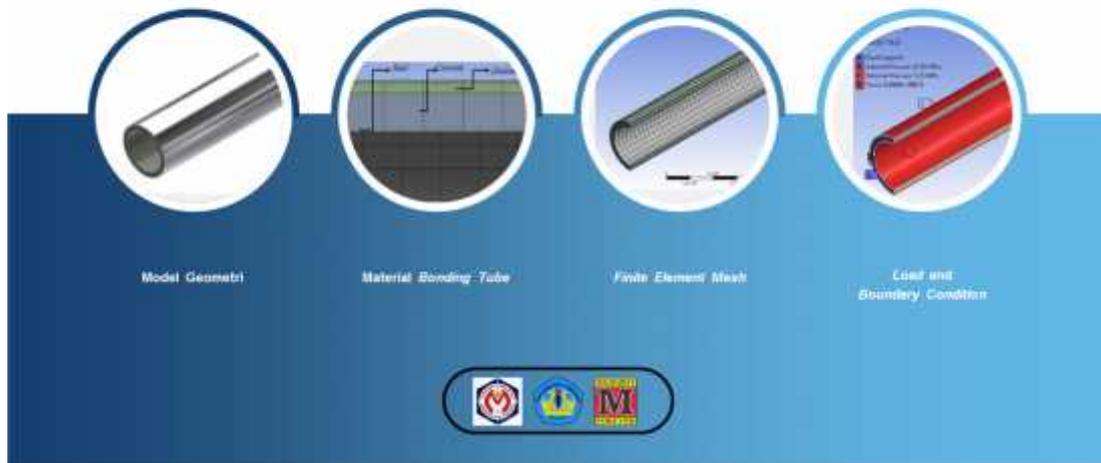
Tabung silinder dikonstruksi dari tiga lapis material, masing-masing adalah baja pada lapisan dalam, beton (*reinforced concrete*) pada lapisan tengah dan aluminium pada lapisan luar. Beban utama adalah tekanan (*hydrostatic*) eksternal pada kedalaman 500m, 700m dan 900m di bawah permukaan laut. Distribusi stress sepanjang ketebalan dianalisis untuk stress radial, hoop, dan geser menggunakan *ANSYS Mechanical post-processor*.



Metodologi 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



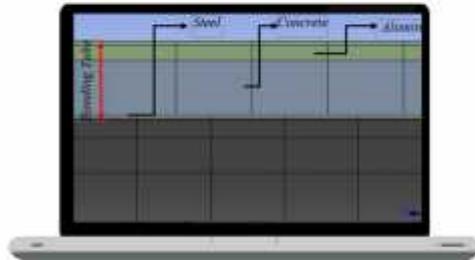
Model geometri dibuat 3 part yang ketiganya merupakan tube silinder. Perbedaan ketiga part geometri tersebut terdapat pada diameter dan ketebalan dindingnya. Ketiga part geometri tersebut kemudian digabungkan sehingga menjadi satu model geometri yang terdiri dari 3 part (*bonding tube*). *Bonding tube* 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.

Tabel 1. Diameter dalam dan diameter luar setiap lapis material

D_i , m	D_{1j} , m	D_{2j} , m	D_{er} , m
5.0	5.06	5.96	6.26



Material Bonding Tube



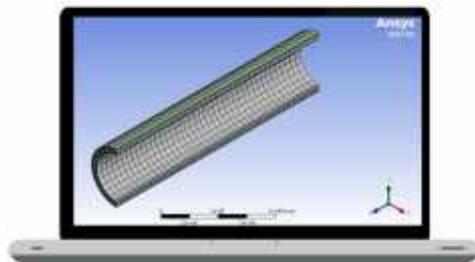
Material yang diberikan pada *bonding tube* adalah baja, concrete, dan aluminium. *Material properties (MP)* yang diperlukan pada penelitian ini adalah *modulus Young E*, dan *Poisson's ratio v*.

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

MP	Baja	Concrete	Aluminium
E, MPa	2×10^5	3×10^4	7.1×10^4
N	0.3	0.18	0.33



Finite Element Mesh



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.



Load and Boundary Condition



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 . Selain beban *pressure*, pada tube juga bekerja gaya apung F_b sebesar berat fluida yang dipindahkan ($F_b = m_w \cdot g$).



Hasil dan Pembahasan



Stress assessment pada tube silinder berlapis yang dibebani dengan 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
- 2 Radial Stress
- 3 Shear Stress



Hoop Stress

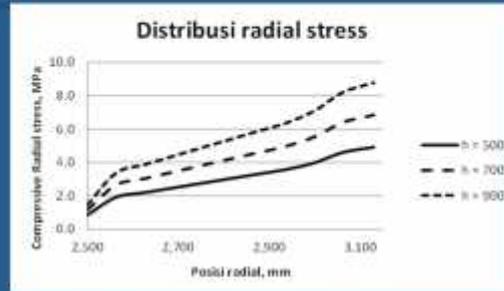
Maksimum hoop stress

(komposisi hoop stress 30%)

Dapat dilihat bahwa *hoop stress* makin besar jika ketebalan bertambah. Jika *hoop stress* dievaluasi secara radial, maka dapat dilihat bahwa maksimum *hoop stress* terdapat pada lapisan dalam (baja), dan yang minimum terdapat pada lapisan tengah (concrete). Ini 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. Secara teoritis *hoop stress* pada sebuah tube silinder dengan beban *external pressure* dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_h = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + \frac{(P_i - P_o) r_o^2 r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2) r^2}$$

Radial Stress

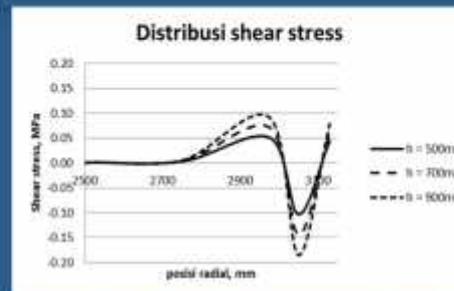


Depat dilihat dari Gambar di atas bahwa *radial stress* makin besar jika posisi kedalaman tube silinder bertambah. Gambar di atas menunjukkan bahwa *radial stress* memiliki nilai terkecil pada lapisan paling dalam, dan makin besar nilainya menuju lapisan paling luar. Secara teoritis, *radial stress* pada tube silinder dengan beban tekanan internal dan tekanan external dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} - \frac{(P_i - P_o) r_o^2 r_i^2}{(r_o^2 - r_i^2) r^2}$$



Shear Stress



Shear stress memiliki nilai absolut paling kecil dibandingkan dengan *hoop stress* maupun *radial stress*. Gambar di atas menunjukkan distribusi *shear stress* yang diplot dari lapisan paling dalam (baja) menuju lapisan paling luar (aluminium). Gambar di atas menunjukkan bahwa *shear stress* tidak signifikan antara lapisan baja dan beton, tapi cukup signifikan antara lapisan beton dan aluminium serta nilai *shear stress* makin besar jika posisi tube silinder makin dalam.



Kesimpulan



Kesimpulan

01

Hoop stress

Hoop stress merupakan *stress* terbesar dibandingkan dengan *radial* dan *shear stress*.

02

Radial Stress

Radial stress dalam bentuk *compressive* memiliki nilai terbesar pada lapisan aluminium (lapisan terluar) dan makin kecil nilainya menuju lapisan paling dalam (baja).

03

Shear Stress

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.



