

STUDI VARIASI *BUOYANCY WEIGHT RATIO* (BWR) PADA STRUKTUR *SUBMERGED FLOATING TUNNEL* (SFT)

Nama Mahasiswa : Agus Mardi Santoso
NRP : 3112105038
Jurusan : Teknik Sipil FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : Endah Wahyuni, ST. MSc. PhD

Abstrak

Submerged Floating Tunnel (SFT) atau Jembatan Archimedes adalah suatu teknologi inovatif infrastruktur di bidang transportasi yang digunakan untuk menghubungkan antara pulau satu dengan pulau lainnya. Faktor ekonomis adalah alasan utama SFT, karena tidak memerlukan pilar. Secara prinsip SFT memanfaatkan gaya *buoyancy* yang terjadi di air. Rasio perbandingan antara gaya *buoyancy* dengan beban-beban vertikal pada SFT disebut *buoyancy weight ratio* (BWR). BWR merupakan parameter utama dalam stabilitas struktur SFT, maka dilakukan studi dalam menentukan nilai BWR. Hal ini karena setiap wilayah perairan mempunyai gaya *buoyancy* yang berbeda-beda. Studi tentang BWR dilakukan dalam analisa menggunakan *software Finite Element Methode* (FEM) SAP2000 v.14.2.2. Dari analisa diperoleh hasil efektif nilai BWR 1,3. Hasil efektif tersebut digabungkan dengan hasil efektif parameter lainnya, selanjutnya dibuat pemodelan efektif dan dilakukan analisa. Hasil pemodelan efektif struktur *prototype* SFT adalah BWR 1,3; perletakan ujung tunnel sendi-sendi; dan konfigurasi kabel sudut 54° . Menggunakan *define properties*

“*cable*”, dan pemberian *initial tension* sebesar 26,1 kN (spesifikasi material kabel) dengan tipe analisa gelombang *non linier*.

Kata Kunci; Submerged Floating Tunnel (SFT), Buoyancy Weight Ratio (BWR), Finite Element Methode, pemodelan efektif.

VARIATION STUDY OF BUOYANCY WEIGHT RATIO ON SUBMERGED FLOATING TUNNEL STRUCTURE

Name : Agus Mardi Santoso
Student Number Identity : 3112105038
Major : Teknik Sipil FTSP – ITS
Supervisor : Endah Wahyuni, ST. MSc. PhD

Abstract

Submerged Floating Tunnel (SFT) or Archimedes Bridge is an innovative technology in the field of transport infrastructure that is used to connect between the islands with other islands. Economic factors are the main reason SFT, because it does not require a pillar. In principle, the SFT utilizes buoyancy force that occurs in water. The ratio of the buoyancy force with the vertical loads on the SFT is called buoyancy weight ratio (BWR). BWR is a major parameter in the stability of the structure of SFT, then conducted a study to determine the value of BWR. This is because each region has waters buoyancy force different. The study of BWR done in software analysis using Finite Element Method (FEM) SAP2000 v.14.2.2. From the analysis of the results obtained by the effective value of BWR 1,3. The effective yield effective results coupled with other parameters, hereafter made effective modeling and analysis. Effective modeling results SFT prototype structure is BWR 1,3; placement end of the tunnel joints; 54° angle and cable configurations. Using properties define "cable", and the provision of initial tension of 26.1 kN (cable material specification) with the type of non-linear wave analysis.

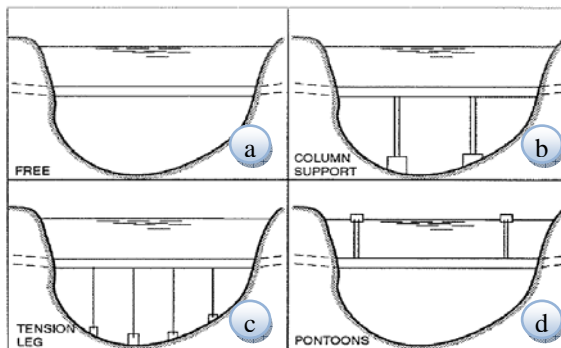
Keyword; Submerged Floating Tunnel (SFT), Buoyancy Weight Ratio (BWR), Finite Element Method, modeling effective.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Submerged Floating Tunnel (SFT) atau Jembatan Archimedes adalah konsep baru untuk menghubungkan daratan yang menyeberangi selat, teluk, danau, atau perairan lain. Bentuk umumnya SFT adalah struktur berbentuk tabung yang mengapung pada kedalaman air, di mana tabung tersebut cukup besar untuk menampung jalan dan atau lalu lintas kereta api, serta utilitas pendukung lainnya. Dengan struktur mengapung di dalam air, maka struktur harus ditambatkan terhadap gerakan yang berlebihan.

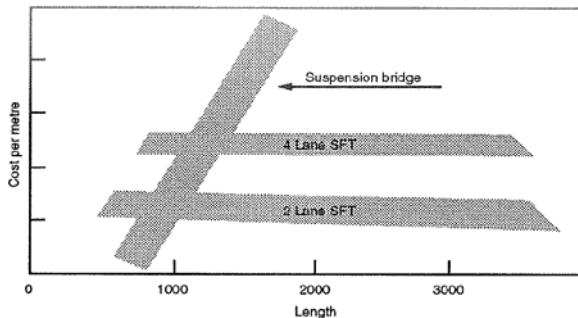
Sebuah SFT pada dasarnya terdiri dari empat bagian : (i) struktur terowongan yang terdiri dari segmen terowongan dan memungkinkan lalu lintas untuk melewati SFT, (ii) struktur penghubung dapat berupa sambungan antar segmen terowongan atau segmen terowongan dengan *shore connection* yang menghubungkan SFT dengan daratan, (iii) sistem kabel yang dipasang pada struktur untuk menahan badan SFT dan menyeimbangkan gaya *buoyancy*, (iv) struktur pondasi yang dibangun di dasar laut untuk menginstal sistem kabel.



Gambar 2.1 Konsep SFT dengan berbagai tipe Anchoring

Berdasarkan FEHRL (1996), pada Gambar 2.1 menunjukkan konsep SFT terdiri dari beberapa tipe yaitu :

1. Tipe dari *Gambar 2.1.a* adalah SFT tidak memiliki *anchoring* sama sekali, kecuali di daratan dan bebas dari kedalaman. Mungkin alternatif ini di desain untuk transportasi ringan, antara 100 atau 200 meter panjang.
2. Tipe dari *Gambar 2.1.b* adalah SFT yang memiliki pondasi bawah, prinsip dari kolom-kolomnya adalah *compression*, tapi kolom-kolom tersebut diperbolehkan juga sebagai *tension*. Kedalaman air akan menjadi peran penting dalam kasus ini dan beberapa meter kedalaman dipertimbangkan sebagai batas dari konstruksi.
3. Tipe dari *Gambar 2.1.c* adalah SFT berdasarkan pada *tethers* yang menjadi kondisi tarik di semua situasi yang akan terjadi, tidak ada kekenduran pada *tethers* tersebut. Kedalaman untuk tipe konstruksi ini mungkin dapat mencapai beberapa ratus meter dengan *tethers* vertikal atau kombinasi vertikal dan diagonal.
4. Tipe dari *Gambar 2.1.d* adalah bebas dari kedalaman air, sistem ini sensitif oleh angin, gelombang, arus dan memungkinkan adanya tubrukan dengan kapal. Desain ini menggunakan *pontoon* yang dihilangkan dengan jarak tertentu dan struktur harus masih bisa bertahan.



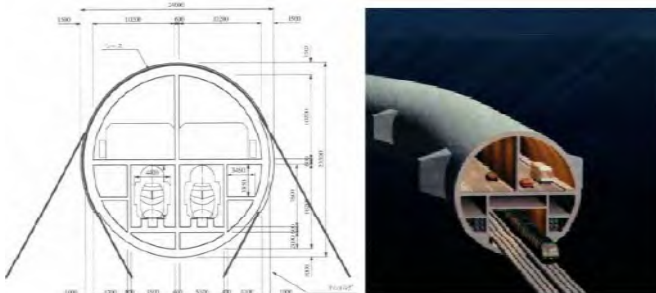
Gambar 2.2 Perbandingan biaya pembangunan SFT dan Jembatan Konvensional (FEHRL 1996)

Salah satu keuntungan yang menarik dari SFT adalah bahwa biaya pembangunan unit segmen terowongan tidak akan meningkat dengan panjang total dari SFT yang meningkat. Dengan demikian, SFT lebih menguntungkan untuk dibentuk di seluruh perairan yang mempunyai bentang panjang dibandingkan dengan struktur jembatan konvensional. Selain itu, SFT adalah solusi yang lebih baik untuk wilayah air di mana pembangunan jembatan konvensional tidak cocok, karena faktor lingkungan dari SFT, yaitu tidak berdampak pada lingkungan alam sekitarnya dan efek yang relatif kurang dari topan dan gempa bumi.

2.2 Bentuk Penampang

Secara khusus, kondisi geografis berdirinya SFT mempunyai pengaruh penting pada pemilihan bentuk penampang melintang SFT. Hal ini karena adanya interaksi struktur dengan air sekitarnya, faktor pengaruh statis dan dinamis, estetika pandangan, dan moduler produksi atau pabrikasi. Bentuk penampang melintang SFT terdiri berbagai macam bentuk. Berikut ini jenis bentuk penampang melintang SFT :

1. Lingkaran (Gambar 2.3 dan Gambar 2.4)
2. Elips atau poligonal (Gambar 2.5)
3. Kotak (Gambar 2.6)
4. Kotak dengan *external keels*, sehingga memberikan bentuk hidrodinamik (Gambar 2.7)

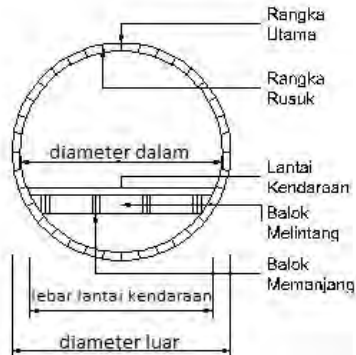


Gambar 2.3 Preliminary desain penampang melintang SFT bentuk lingkaran dengan beban yang bekerja (Kanie 2010)

Pada gambar penampang melintang SFT di atas, merupakan preliminary desain yang dibuat oleh Kanie (2010) untuk menghubungkan kedua ujung ambang di Teluk Funka bay terletak di bagian selatan Hokkaido. SFT tersebut diharapkan dapat memperpendek jarak tempuh perjalanan dari Tokyo ke Sapporo, ibukota Hokkaido, Jepang. Panjang total persimpangan adalah 30 km dengan kedalaman air maksimum 120 m dan berada pada kondisi lingkungan yang sangat parah karena menghadap ke Samudera Pasifik.

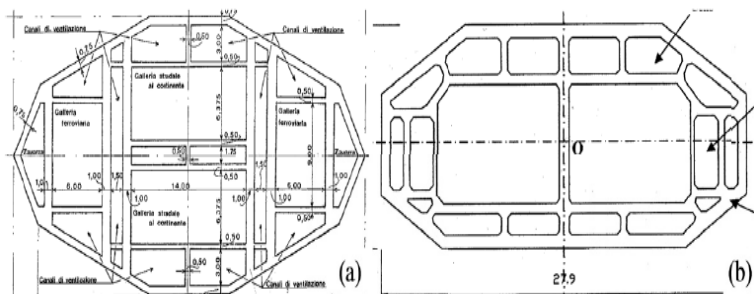
Terowongan direncanakan untuk kendaraan bermotor dan kereta api seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.3**, sehingga diameter total penampang yang dibutuhkan adalah 23 m . Jarak bebas atas terowongan ke permukaan air adalah 30 m untuk memungkinkan navigasi kapal besar . Dalam kasus SFT ini, pengaturan *tension leg* (kabel) dan *buoyancy weight ratio* (BWR) mempunyai peran yang sangat penting untuk mengendalikan respon dinamik dari SFT. *Slack* pada kabel harus dihindari atau beban impulsif seketika menyebabkan kekenduran dan itu membahayakan setiap pengguna di dalam terowongan.

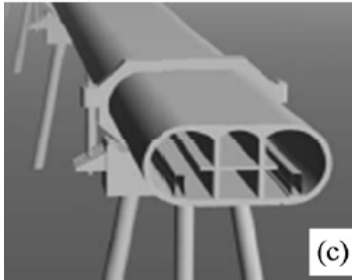
Untuk mencegah kendur pada kabel, maka langkah-langkah berikut ini biasanya dianjurkan, yaitu : (i) untuk mengatur BWR besar, sehingga diharapkan ketegangan awal yang cukup di kabel terhadap fluktuasi akibat gelombang besar, (ii) untuk menggunakan bentuk lingkaran pada terowongan, sehingga mencegah momen rotasi akibat gaya fluida, (iii) agar mengatur kabel pada penampang agar tidak menimbulkan torsi rotasi dengan mengembalikan gaya yang terjadi melalui perpindahan horisontal dan vertikal.



Gambar 2.4 Preliminary desain penampang melintang SFT bentuk lingkaran dengan beban yang bekerja (Indrawan 2011)

Penampang melintang yang ditunjukkan Gambar 2.4 merupakan *preliminary* desain yang dilakukan oleh Indrawan (2011) untuk menghubungkan pulau Panggang dan pulau Karya, Kepulauan Seribu, Indonesia. Terowong direncanakan untuk kendaraan bermotor, sehingga diameter dalam 5 m dan diameter luar 5,4 m. Panjang total persimpangan adalah 150 m dengan kedalaman air maksimum 20 m. Konstruksi penampang terbuat dari bahan baja menggunakan struktur kombinasi antara plat dengan rangka.

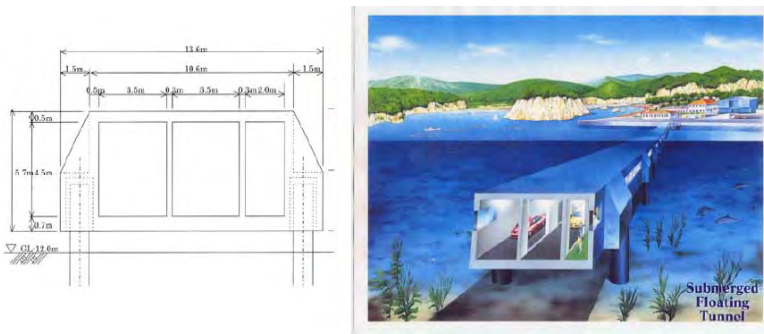




Gambar 2.5 Preliminary desain penampang melintang SFT bentuk poligonal atau elips dengan beban yang bekerja.

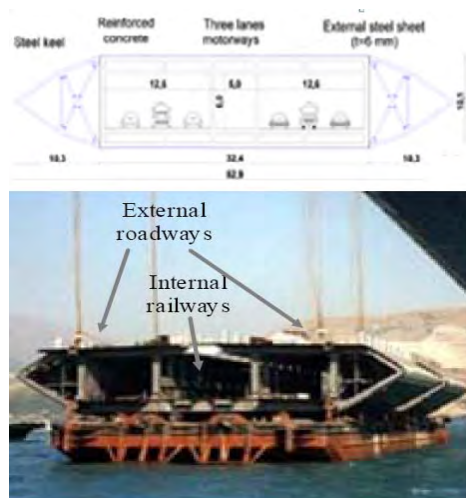
- (a) Selat Messina, Italia (Ponte di Archimedes S.p.A 1984);
- (b) Selat Jintang, China (Fagiano et al. 2001);
- (c) Danau Washington, USA (Felch et al. 2001)

Pada penampang melintang SFT bentuk poligonal atau elips dianggap terlalu rumit dalam prosedur konstruksi modul terowongan. Namun, bentuk ini merupakan solusi yang sesuai pada kasus dimana besarnya gerakan air akibat arus dan gelombang dalam arah horizontal. Bahkan bentuk-bentuk ini jelas menghasilkan nilai-nilai besar kekakuan dan kekuatan, baik terhadap pengaruh lentur dalam arah horizontal, dan perilaku hidrodinamik yang baik.



Gambar 2.6 Preliminary desain penampang melintang SFT bentuk kotak dengan beban yang bekerja (Kanie 2010)

Untuk penampang melintang SFT pada Gambar 2.6 berada di pelabuhan Oinaoshi. Oinaoshi adalah nama dari pelabuhan perikanan yang terletak di Muroran. SFT ini dibangun untuk menghubungkan Muroran dengan sebuah pulau buatan di dalam pemecah gelombang. Otoritas pelabuhan memutuskan untuk membangun sebuah akses dari pantai ke pulau buatan ini untuk pejalan kaki dan kendaraan bermotor. Panjangnya 300 m dengan kedalaman air maksimum 15 m. SFT direncanakan di belakang breakwater, maka kondisi gelombang ringan. Dengan kondisi tersebut, penampang SFT menggunakan bentuk persegi panjang untuk memanfaatkan area di dalam secara efisien. Tinggi dan lebar penampang adalah sebesar 5 m dan 10 m, masing-masing untuk memasukkan dua jalur jalan dengan pejalan kaki berjalan.



Gambar 2.7 Preliminary desain penampang melintang SFT bentuk kotak dengan external keels beserta beban yang bekerja (Mazzolani 2009)

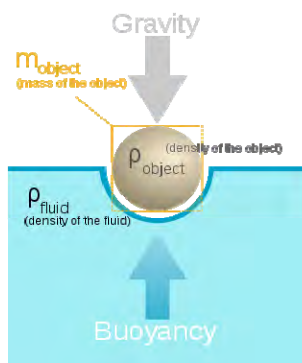
Pada penampang melintang SFT bentuk kotak Gambar 2.7 memiliki keistimewaan, yaitu dilengkapi dengan *external steel keels* berbentuk segitiga pada dua sisinya. *External steel keels* ini

sebagai tempat penjangkaran kabel yang di tambatkan pada dasar laut dengan pondasi. Selain itu, dengan penambahan *external steel keels* dapat meningkatkan sifat aerodinamis pada penampang. Solusi ini merupakan bagian untuk meratakan beban yang terjadi ketika arus dan gelombang besar dalam arah horizontal mengenai penampang.

Hasil dari analisa menunjukkan bahwa setiap penampang memiliki perilaku yang berbeda terhadap beban hidrodinamik yang terjadi. Terdapat berbagai variasi dan inovasi dalam *preliminary* desain dan tidak mudah untuk memilih salah satu yang cocok mengingat kondisi lingkungan. Selain itu ada faktor yang perlu diperhatikan yaitu ketersediaan material dan kemudahan produksi modul konstruksi tersebut sesuai dengan kondisi tempat SFT dibangun.

2.3 Rasio Gaya Apung -Berat Sendiri (BWR)

SFT merupakan struktur lepas pantai, sehingga memiliki kesamaan dengan bangunan-bangunan lepas pantai, seperti *offshore* atau *rig*. Akan tetapi dalam hal ini SFT memiliki perbedaan dengan struktur *offshore* lainnya yaitu dengan memanfaatkan gaya apung (*buoyancy*).



Gambar 2.8 Prinsip buoyancy weight ratio berdasarkan hukum Archimedes

Gambar 2.8 mengilustrasikan tentang prinsip kerja rasio gaya *buoyancy*-berat sendiri (BWR). SFT tersebut mendapat gaya apung dari air yang lebih besar dari berat sendiri SFT. Oleh karena itu, pada struktur SFT perlu dipasang kabel baja. Apabila struktur SFT ditahan oleh kabel-kabel baja, maka kabel tersebut selalu dalam kondisi tertarik (Hong 2010). Kabel tersebut juga menyeimbangkan posisi struktur jika terkena pengaruh beban luar atau pengaruh akibat lingkungan agar tetap pada kondisinya semula atau tidak mengalami pergoyangan pada struktur yang berlebihan.

2.4 Bentuk Kabel SFT

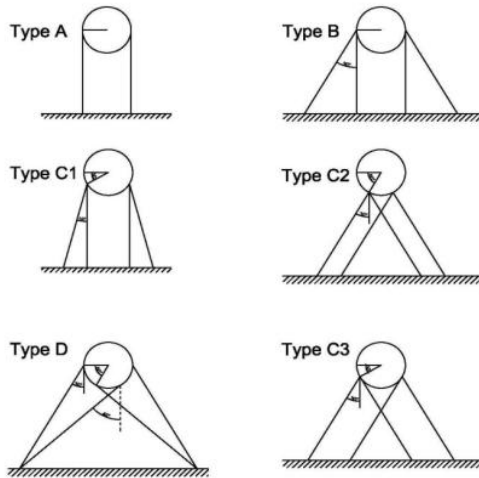
Kabel SFT adalah bagian SFT yang berfungsi untuk menahan penampang ketika menerima beban yang bekerja. Kabel-kabel tersebut juga menyeimbangkan posisi struktur SFT jika terkena pengaruh beban luar atau pengaruh akibat lingkungan seperti, tekanan hidrostatik, tekanan arus, dan gelombang air laut agar tetap pada kondisinya semula atau tidak mengalami pergoyangan pada struktur yang berlebihan.

Bahan yang paling cocok digunakan untuk sistem penahan dari SFT adalah baja. Baja dapat mewujudkan kekakuan, seperti *tension leg* atau *tethers tubular*, dan kabel yang terdiri dari kawat baja harmonik. Penggunaan jangkar baja adalah praktek yang umum digunakan untuk bangunan *offshore*, misalnya *tension leg platform* dan *mobile production units moored* dengan kabel baja menjadi beberapa struktur lepas pantai yang paling umum.

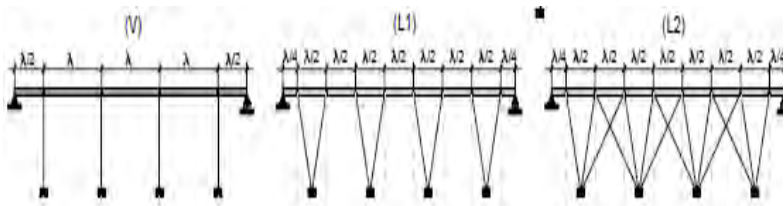
Dalam desain sistem SFT penahan terdiri dari kabel. Faktor utama yang harus dilakukan terkait dengan konfigurasi geometris dari sistem kabel yaitu diameter yang akan digunakan pada kabel dan kondisi pengendalian yang akan diberikan pada ujung-ujung kabel. Sistem kabel dari SFT biasanya dipahami sebagai serangkaian kelompok kabel, dipasang pada badan penampang *tunnel* dan dijangkarkan di dasar laut. Oleh karena itu sistem kabel menahan efektif *tunnel* hanya dalam arah transversal, dan

kekakuan yang sangat dipengaruhi oleh susunan geometris dari kelompok kabel.

Berdasarkan pada penelitian Maeda (1994), memberikan macam-macam konfigurasi pemasangan kabel yang berbeda pada SFT. Konfigurasi kabel tersebut dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.9 Konfigurasi kabel arah melintang (Maeda 1994)



Gambar 2.10 Konfigurasi kabel arah memanjang (Maeda 1994)

Gambar konfigurasi diatas menunjukkan bahwa kelompok-kelompok yang terdiri dari konfigurasi dua kabel vertikal hanya efektif dalam arah vertikal, sehingga hanya sesuai di lingkungan yang tenang. Konfigurasi terdiri dari empat kabel cenderung adalah yang paling efektif, karena kebel mendukung *tunnel* dalam

arah vertikal, horizontal, dan torsional. Berdasarkan analisa numerik untuk konfigurasi tipe D pada gambar 2.9 menunjukkan bahwa konfigurasi ini mengarah ke tingkat tinggi dari tekanan di kabel dan menginduksi momen torsional yang cukup besar dalam *tunnel* ketika terkena beban horizontal (Martire 2007) (Sipata 2012).

2.5 Karakteristik Material

Dalam pembangunan SFT perlu penggunaan struktur material komposit yang merupakan gabungan dari beberapa bahan, sehingga kekurangan pada masing-masing material dapat di netralkan dan meningkatkan kemampuan material. Bahan yang cocok digunakan dalam pembangunan SFT yaitu, beton, baja, beton pratekan, dan campuran aluminium. Jenis baja biasa dan beton sangat cocok untuk aplikasi SFT, seperti yang banyak digunakan dalam struktur lepas pantai dan dengan demikian kinerja mereka sebagian besar berpengalaman, juga mengenai perilaku jangka panjang .

Baja memiliki beberapa karakteristik membuatnya menjadi bahan yang sangat cocok untuk struktur lepas pantai dan struktur SFT, seperti : sifat mekanik yang baik , ketahanan yang baik terhadap kelelahan dan abrasi, *workability* yang baik dan rasio kekuatan berat sendiri yang besar. Namun, nilai baja biasa juga memiliki beberapa kelemahan, seperti resistansi rendah terhadap korosi, rendahnya kinerja koneksi dilas sehubungan dengan kelelahan akibat beban *siklik* oleh pengaruh lingkungan (Martire 2010).

Pada penampang baja sesuai API RP 2A-WSD dapat dilihat pada tabel 2.1 untuk karakteristik material baja yang digunakan pada plat baja untuk bangunan *offshore*. Digunakan tabel tersebut karena penampang *tunnel* dengan material baja akan dibebani oleh beban yang besar dan pada tabel tersebut, ditentukan kelas dan grup untuk pengaruh baja terhadap lingkungan dan kemampuannya saat beban bekerja.

Tabel 2.1. Tabel plat baja struktural menurut API RP 2A

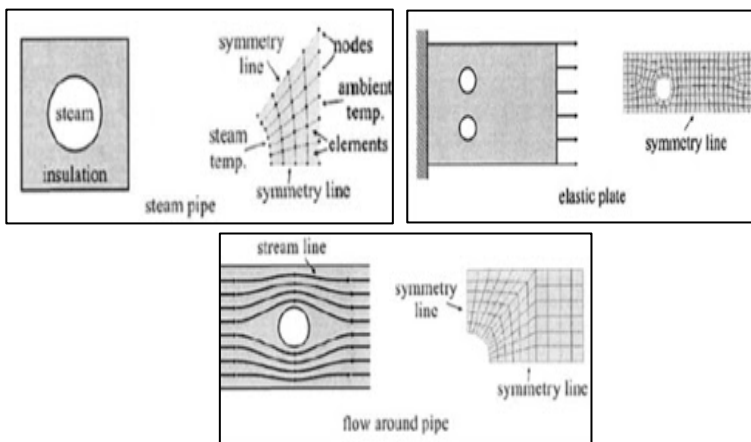
Group	Class	Specification and Grade	Yield Strength		Tensile Strength	
			ksi	MPa	ksi	MPa
I	C	ASTM A36 (to 2 in. thick)	36	250	58–80	400–550
		ASTM A131 Grade A (to 1/2 in. thick)	34	235	58–71	400–490
		ASTM A285 Grade C (to 3/4 in. thick)	30	205	55–75	380–515
I	B	ASTM A131 Grades B, D	34	235	58–71	400–490
		ASTM A516 Grade 65	35	240	65–85	450–585
		ASTM A573 Grade 65	35	240	65–77	450–530
		ASTM A709 Grade 36T2	36	250	58–80	400–550
I	A	ASTM A131 Grades CS, E	34	235	58–71	400–490
II	C	ASTM A572 Grade 42 (to 2 in. thick)*	42	290	60 min.	415 min.
		ASTM A572 Grade 50 (to 2 in. thick; S91 required over 1/2 in.)*	50	345	65 min.	450 min.
II	B	API Spec 2MT1	50	345	70–90	483–620
		ASTM A709 Grades 50T2, 50T3	50	345	65 min.	450 min.
		ASTM A131 Grade AH32	45.5	315	68–85	470–585
		ASTM A131 Grade AH36	51	350	71–90	490–620
II	A	API Spec 2H Grade 42	42	290	62–80	430–550
		Grade 50 (to 2 1/2 in. thick)	50	345	70–90	483–620
		(over 2 1/2 in. thick)	47	325	70–90	483–620
		API Spec 2W Grade 42 (to 1 in. thick)	42–67	290–462	62 min.	427 min.
		(over 1 in. thick)	42–62	290–427	62 min.	427 min.
		Grade 50 (to 1 in. thick)	50–75	345–517	65 min.	448 min.
		(over 1 in. thick)	50–70	345–483	65 min.	448 min.
		Grade 50T (to 1 in. thick)	50–80	345–522	70 min.	483 min.
		(over 1 in. thick)	50–75	345–517	70 min.	483 min.
		API Spec 2Y Grade 42 (to 1 in. thick)	42–67	290–462	62 min.	427 min.
		(over 1 in. thick)	42–62	290–427	62 min.	427 min.
		Grade 50 (to 1 in. thick)	50–75	345–517	65 min.	448 min.
		(over 1 in. thick)	50–70	345–483	65 min.	448 min.
		Grade 50T (to 1 in. thick)	50–80	345–572	70 min.	483 min.
		(over 1 in. thick)	50–75	345–517	70 min.	483 min.
		ASTM A131 Grades DH32, EH32	45.5	315	68–85	470–585
		Grades DH36, EH36	51	350	71–90	490–620
		ASTM A537 Class 1 (to 2 1/2 in. thick)	50	345	70–90	485–620
		ASTM A633 Grade A	42	290	63–83	435–570
		Grades C, D	50	345	70–90	485–620
ASTM A678 Grade A	50	345	70–90	485–620		

Material yang digunakan harus tahan terhadap pengaruh air laut dan kuat diberi gaya prategang karena bagian-bagian dari tunnel SFT akan dihubungkan dengan kabel prategang.

2.6 Analisa Elemen Hingga (FEA)

Pemodelan yang dilakukan menggunakan analisa elemen hingga. Analisa elemen hingga ini adalah cara untuk mendapatkan solusi numerik untuk masalah struktural, termal dan elektromagnetik. Dalam analisa ini seluruh masalah yang kompleks seperti variasi bentuk, kondisi batas dan beban diselesaikan dengan pendekatan. Hal ini dikarenakan keanekaragaman dan fleksibilitas sebagai perangkat analisis.

Prosedur elemen hingga mengurangi variabel yang tidak diketahui menjadi sejumlah berhingga dengan membagi daerah penyelesaian menjadi bagian kecil yang disebut elemen (*meshing*) dan dinyatakan sebagai variabel medan yang tidak diketahui dalam istilah dianggap sebagai fungsi pendekatan (*approximation functions/interpolation functions/shape functions*) dalam setiap elemen. Fungsi pendekatan didefinisikan sebagai medan variabel dari titik-titik tertentu yang disebut node atau titik node. Variabel medan dapat ditentukan pada beberapa titik menggunakan fungsi interpolasi. Setelah memilih elemen dan variabel titik yang tidak diketahui selanjutnya menyusun sifat bahan (*properties*) elemen untuk setiap elemen.



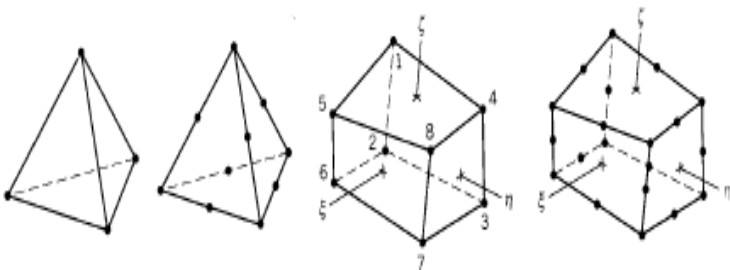
Gambar 2.11 Pembagian elemen (*meshing*) pada plat dan pipa

Ada tiga pendekatan utama untuk membangun solusi perkiraan berdasarkan pada konsep FEA (Segerlind 1984), yaitu :

1. Pendekatan langsung
Pendekatan ini digunakan untuk masalah yang relatif sederhana, dan biasanya berfungsi sebagai alat untuk menjelaskan konsep dan FEA langkah penting.
2. Pendekatan *weighted residual*
Ini adalah metode yang fleksibel, memungkinkan aplikasi dari FEA masalah fungsional yang tidak dapat dibangun. Ini pendekatan langsung memanfaatkan persamaan diferensial yang memerintah, seperti perpindahan panas dan mekanika fluida.
3. Pendekatan *variational*
Pendekatan ini bergantung pada variasi kalkulus, yang melibatkan *extremizing fungsional*. Fungsional ini berhubungan dengan potensi energi dalam mekanika struktural.

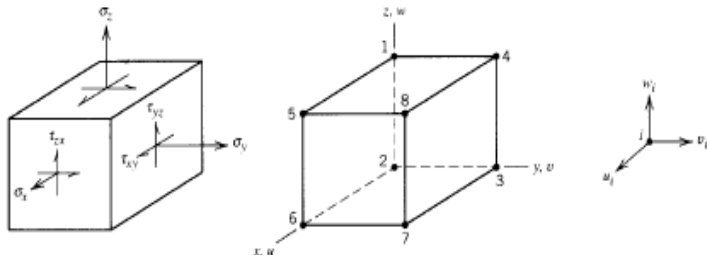
2.7 3D solid

3D solid biasanya dipakai untuk mendeskripsikan sebuah bidang tiga dimensi yang tidak dibatasi oleh bentuk, pembebanan, properti material, dan kondisi batas.



Gambar 2.12 Macam – macam obyek 3d solid.
(Cook 1995)

Konsekuensi dari kondisi ini adalah bahwa semua keenam tegangan (tiga normal dan tiga geser) harus diperhitungkan (Gambar 2.13). Juga pada bidang perpindahan melibatkan ketiga komponen kemungkinan yaitu u , v , dan w .



Gambar 2.13 obyek 3d dengan 6 tegangan serta arah perpindahannya.
(Cook 1995)

“HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN”

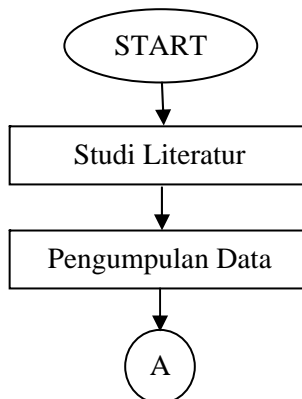
BAB III METODOLOGI

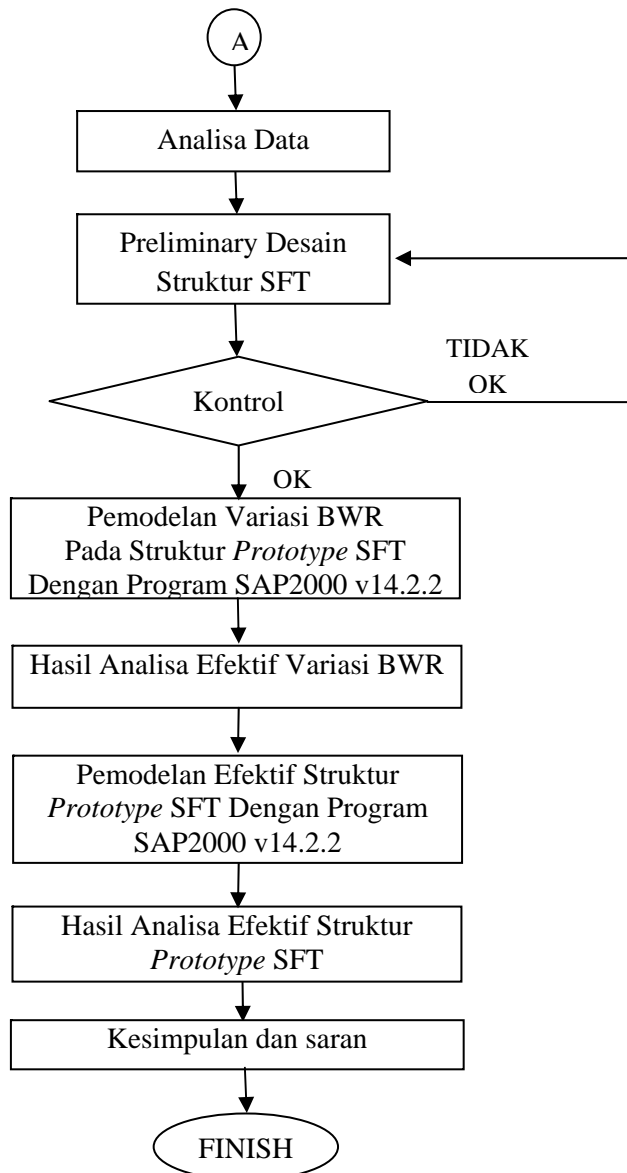
3.1. Umum

Dalam penyelesaian studi diperlukan urutan-urutan metode yang jelas dan sistematis. Metodologi yang dimaksudkan agar pengerjaan studi berjalan dengan baik dan efektif. Metodologi ini membahas langkah-langkah atau urutan-urutan metode yang akan dipakai dalam penyelesaian studi.

Adapun tahapan yang akan dilakukan yaitu pertama melakukan studi literatur yang berhubungan dengan Tugas Akhir. Tahap kedua melakukan pengumpulan data, yaitu data penelitian sebelumnya dan data pengujian skala model SFT. Tahap ketiga dilakukan analisa data. Tahap keempat *preliminary* desain struktur SFT. Bila *preliminary* desain memenuhi kontrol desain, maka dilanjutkan membuat analisa numerik struktur SFT dengan program SAP2000 v14.2.2. Setelah itu akan di dapatkan hasil analisa numerik nilai BWR yang efektif dan dapat membandingkannya dengan hasil pengujian skala model SFT, sehingga dapat dibuat kesimpulan.

Sistematika metodologi penulisan Tugas Akhir dapat dilihat seperti diagram alir dibawah ini :





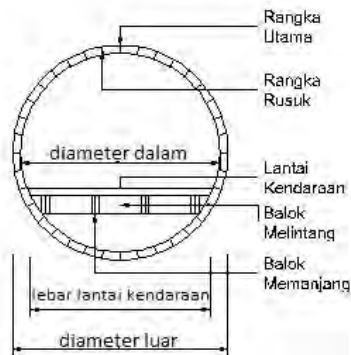
Gambar 3.1 Flow Chart

3.2. Pengumpulan Data

Data-data yang dipakai dalam tugas akhir ini merupakan data dari studi sebelumnya, data dari pengujian skala model, dan data dari BPPT. Berikut ini data-data yang digunakan :

1. Data penampang

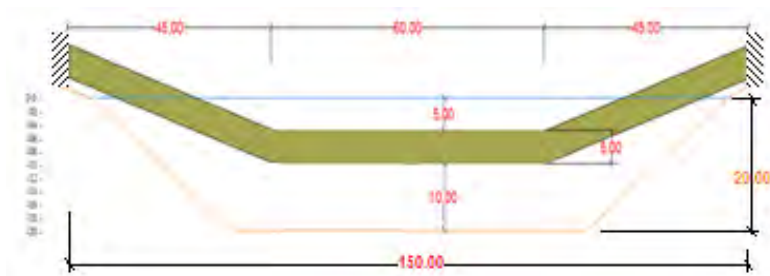
Data ini memberikan informasi bentuk penampang dan dimensi penampang yang pernah di studi.



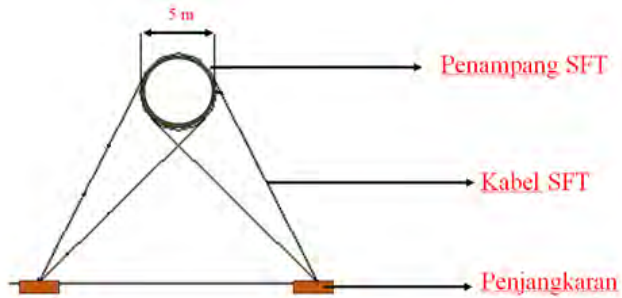
Gambar 3.2 Penampang SFT

Kondisi
Perletakan

Kondisi
Perletakan



Gambar 3.3 Penampang memanjang SFT



Gambar 3.4 Penampang melintang SFT dengan konfigurasi kabel

Tabel 3.1 Ukuran SFT

Besaran	Prototype	Satuan	Skala Model	Satuan
Panjang keseluruhan, (L)	150	m	1.5	m
Diameter SFT, (D)	5	m	0.05	m

2. Data lingkungan

Tabel 3.2 Fluid dynamic environmental

Fluid dynamic enviromental	Symbol	Unit	Value Prototype	Value Skala Model
Fluid density	ρ	kg/m ³	1025	
Water depth	h	M	20	0.2
Wave height	H	M	1.2	0.012
Wave period	T	m	3.58	0.358
Surface current velocity	U_0	m/s	1.2	0.12
Drag coefficient	C_D	1	1.0	
Mass coefficient	C_m	1	2.0	
Added-mass coefficient	C_a	1	1.0	

Tabel 3.3 *Structural property*

Structural Property	Symbol	Unit	Value Prototype	Value Model Uji
<i>Tunnel equivalent density</i>	ρT	kg/m ³	1400	
<i>Tunnel outer diameter</i>	D	m	5.5	0.055
<i>Tunnel inner diameter</i>	d	m	4.7	0.047
<i>Tunnel equivalent Young modulus</i>	ET	N/m ²	3.2×10^{10}	
<i>Cable density</i>	ρC	kg/m ³	7850	
<i>Cable diameter</i>	dC	m	0.1	0.001
<i>Cable Young modulus</i>	EC	N/m ²	1.4×10^{11}	
<i>Kinetic viscosity Coefficient</i>	ν	m ² /s	1.067×10^{-6}	

Tabel 3.4 Periode Ulang Maximum Tinggi Gelombang Signifikan di utara teluk Jakarta, Laut Jawa

Periode Ulang (tahun)	Gelombang signifikan				Gelombang individual			
	Hs	Ts	Ls	(H/L)s	Hs	Ts	Ls	(H/L)s
	(m)	(detik)	(m)		(m)	(detik)	(m)	
1	2.04	5.81	52.59	0.04	3.67	7.55	89.92	0.04
5	3.92	8.00	97.71	0.04	7.06	10.40	168.84	0.04
10	4.27	8.34	105.36	0.04	7.69	10.84	183.63	0.04
25	4.63	8.68	112.95	0.04	8.33	11.28	198.82	0.04
50	4.87	8.90	117.85	0.04	8.77	11.57	208.93	0.04
100	5.08	9.08	122.03	0.04	9.14	11.81	217.78	0.04

(sumber : IHL-BPPT, 2011)

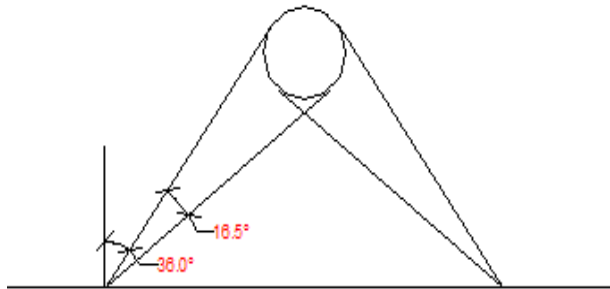
3. Data parameter analisa

Tabel 3.5 Parameter analisa *prototype* SFT

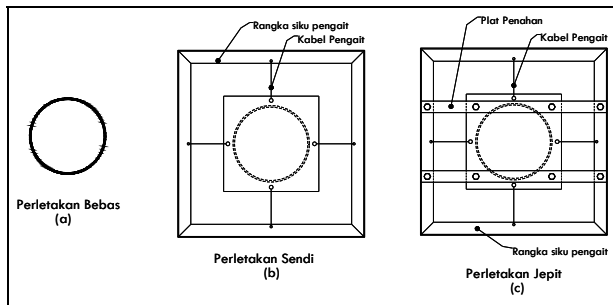
No	Parameter	Hs	Ts	BWR	SIK	Kekangan	KET
		<i>Cm</i>	<i>detik</i>				
1	BWR	5.08	9.08	1.8	C	S-S	A
		5.08	9.08	1.7	C	S-S	A
		5.08	9.08	1.6	C	S-S	A
		5.08	9.08	1.5	C	S-S	A
		5.08	9.08	1.4	C	S-S	A
		5.08	9.08	1.3	C	S-S	A
		5.08	9.08	1.2	C	S-S	A
		5.08	9.08	1.1	C	S-S	A
2	Kekangan	5.08	9.08	1.5	C	J-J	
		5.08	9.08	1.5	C	J-S	
		5.08	9.08	1.5	C	J-B	
		5.08	9.08	1.5	C	S-B	
		5.08	9.08	1.5	C	B-B	
3	SIK	5.08	9.08	1.5	A	S-S	
		5.08	9.08	1.5	B	S-S	
		5.08	9.08	1.5	E	S-S	
		5.08	9.08	1.5	D	S-S	
		5.08	9.08	1.5	F	S-S	
		5.08	9.08	1.5	G	S-S	

Keterangan:

- BWR = *Buoyancy Weight Ratio*
- SIK = Sudut Inklinasi Kabel
- Hs = Tinggi Gelombang
- Ts = Periode Gelombang
- A = Analisa



Gambar 3.5 Konfigurasi posisi kabel SFT tipe C Sudut 36^0



Gambar 3.6 Kekangan ujung SFT.

(a) bebas; (b) sendi; (c) jepit.

3.3. Analisa Data

3.3.1. Buoyancy Weight Ratio (BWR)

Perbandingan rasio gaya apung dan berat sendiri dapat dihitung dengan rumus berikut ini :

$$r_U = \frac{U}{W} \quad (3.1)$$

dimana :

U = Gaya apung penampang SFT (kN/m)

W = Berat sendiri SFT dan berat tambahan (kN/m)

Nilai U dan W dapat dihitung dengan rumus berikut ini :

$$W = 1.3A_c\gamma_c \quad [\text{kN/m}] \quad (3.2)$$

dimana :

A_c = Luas penampang bahan yang digunakan (m²)
 γ_c = Berat jenis bahan (kN/m³)

$$U = A_T\gamma_w \quad [\text{kN/m}] \quad (3.3)$$

dimana :

A_T = Luas total penampang SFT (m²)
 γ_w = Berat jenis air laut (10,3 kN/m³)

3.3.2. Beban mati

Beban dihitung sesuai *Persamaan 3.2* yang diakibatkan oleh berat sendiri dari *tunnel* SFT dimana tergantung dari luas penampang dan berat jenis material penampang.

3.3.3. Beban hidrostatik air laut

Cara untuk menghitung tekanan hidrostatik berdasarkan peraturan API RP 2A-WSD *pasal 3.2.5.a* diberikan sebagai berikut :

$$p = \gamma H_z \quad (3.4)$$

dimana :

p = Tekanan hidrostatik air (N/m²)
 γ = Massa jenis air laut, (10300 N/m³)
 H_z = *Design head* (m)

$$H_z = z + \frac{H_w}{2} \left(\frac{\cosh[k(d-z)]}{\cosh[kd]} \right) \quad (3.5)$$

dimana :

H_w = Tinggi gelombang (m)

z = Tinggi di bawah SWL termasuk pada saat air pasang (m),
 z diukur ke bawah dari SWL

k = $\frac{2\pi}{L}$ (m^{-1}), dengan L adalah panjang gelombang

d = Kedalaman air laut (m)

L = $\frac{gT^2}{2\pi}$ (m), merupakan panjang gelombang dimana T adalah periode gelombang (s) dan g adalah percepatan gravitasi (m/s^2)

Untuk mencari tinggi gelombang (H_w) dan periode gelombang (T) pada *Persamaan 3.5*, digunakan tinggi gelombang maksimum dan periode gelombang pada periode ulang tahun yang ditinjau. Tinggi gelombang maksimum yang dianjurkan untuk perencanaan bangunan lepas pantai adalah sebagai berikut :

$$H_{max} = 1,8 H_{1/3} \quad (3.6)$$

dimana :

H_{max} = Tinggi gelombang maksimum (m)

$H_{1/3}$ = H signifikan (m)

$$T_{max} = T_{1/3} \quad (3.7)$$

dimana :

T_{max} = periode gelombang maksimum (detik)

$T_{1/3}$ = periode gelombang signifikan (detik)

3.3.4. Beban akibat lalu-lintas

Lalu lintas yang melalui SFT sama dengan lalu lintas yang melalui jembatan konvensional, maka beban lalu lintas pada SFT

dapat memakai peraturan pembebanan pada jembatan konvensional yang berlaku di lokasi SFT tersebut. Pada studi ini, peraturan pembebanan lalu lintas SFT mengacu pada BMS 1992 seksi 2 pembebanan.

3.3.5. Beban akibat ballast

Beban ballast diperlukan apabila *buoyancy weight ratio* yang terjadi tidak memenuhi kondisi yang efektif. Ballast yang diberikan pada studi ini berupa baja. Dengan demikian, beban ballast bisa dimasukkan sebagai beban mati apabila ia ditempatkan secara permanen pada SFT.

3.3.6. Beban tambahan

Beban tambahan berupa beban saat pelaksanaan konstruksi, beban utilitas, dan beban lain yang nantinya membebani. Dalam studi ini, semua beban tersebut akan diasumsikan sebesar 30% dari berat sendiri *tunnel*.

3.3.7. Gelombang

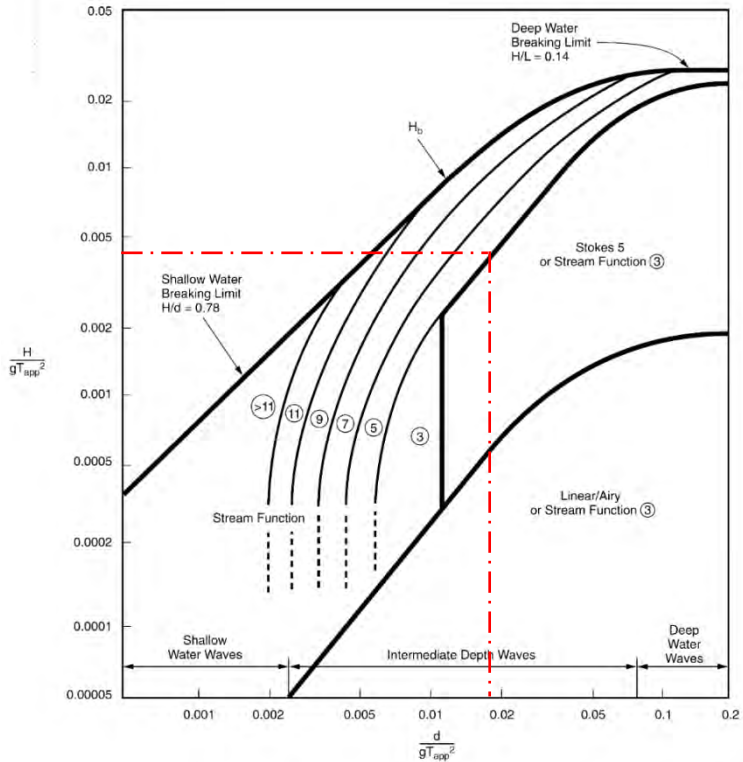
Dalam API RP 2A-WSD telah ditentukan cara untuk penentuan teori gelombang yang akan digunakan. Cara penentuan tersebut menggunakan grafik pada **Gambar 3.9** (API RP 2A-WSD). Parameter yang digunakan dalam pembacaan diagram untuk menentukan teori gelombang di atas adalah sebagai berikut:

d = kedalaman air (m)

g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

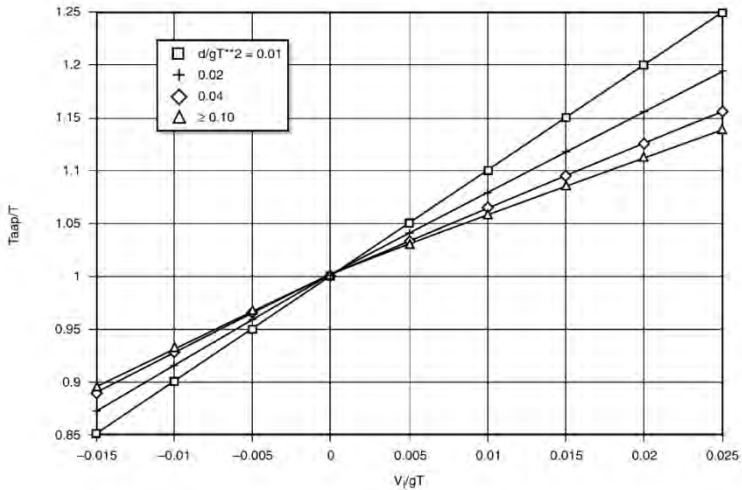
H = tinggi gelombang hasil pengamatan (m)

T = periode gelombang hasil pengamatan (s)



Gambar 3.7 Penggunaan dari fungsi aliran, teori Stokes V dan teori gelombang linier (API RP 2A–WSD)

Pada API RP 2A–WSD, diberikan juga grafik untuk menentukan komponen arus pada gelombang (V_1), grafik tersebut adalah sebagai berikut :



Gambar 3.8 Diagram untuk menentukan komponen arus (V_I) (API RP 2A-WSD)

Parameter-parameter yang digunakan dalam pembacaan diagram untuk menentukan komponen arus (V_I) di atas adalah sebagai berikut :

T = periode gelombang aktual hasil pengukuran di lapangan
 V_I = komponen arus pada arah gelombang

Untuk menentukan nilai T_{app} sebagai berikut berdasarkan API RP 2A-WSD pasal C2.3.1b1

$$T_{app} = \frac{2\pi\lambda}{g \tanh(2\pi h/\lambda)} \quad (3.8)$$

dimana :

T_{app} = periode gelombang yang sudah terpengaruhi kecepatan arus

λ = panjang gelombang (m)

h = tinggi gelombang (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Berdasarkan API RP 2A–WSD pasal 2.3.1b10, gaya gelombang per kedalaman yang terjadi pada suatu struktur dihitung sesuai persamaan Morrison, sebagai berikut :

$$F = F_D + F_I \quad (3.9)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho A C_d u |u| + \rho V C_M \frac{du}{dt} \quad (3.10)$$

dimana :

- F = Gaya gelombang (kN/m)
- F_D = Gaya drag (kN/m)
- F_I = Gaya inersia (kN/m)
- ρ = Massa jenis air laut (10,3 kN/m³)
- A = Luas penampang (m²)
- C_d = Koefisien drag
- u = kecepatan aliran gelombang pada kedalaman yang ditinjau (m/s)
- $|u|$ = Nilai absolut dari nilai u (m/s)
- V = volume *tunnel* SFT (m³)
- C_M = Koefisien inersia
- $\frac{du}{dt}$ = percepatan gelombang per kedalaman yang ditinjau (m/s²)

Berdasarkan API RP 2A–WSD pasal 2.3.1b7, perhitungan gaya gelombang menggunakan koefisien drag dan inersia memberikan persamaan untuk menentukan nilai dari koefisien-koefisien tersebut. Untuk menentukan koefisien tersebut tergantung dari angka Reynold yaitu :

$$R_e = \frac{U_{max} D}{\nu} \quad (3.11)$$

dimana :

- U_{max} = kecepatan gelombang maksimum pada arah horisontal (m/s)

D = diameter/lebar struktur (m)
 ν = viskositas kinematik air laut (m^2/s)

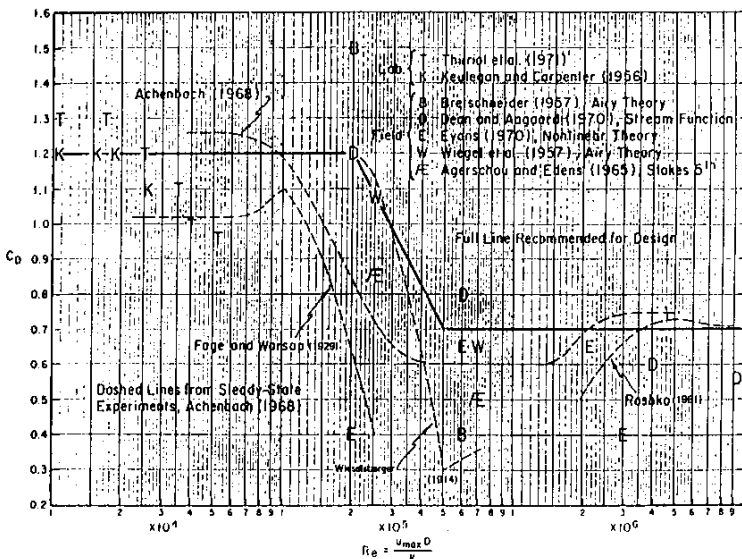
Penentuan koefisien inersia menggunakan persyaratan di bawah ini :

$$C_m = 2,0 \quad , \text{ apabila } Re < 2,5 \times 10^5$$

$$C_m = 2,5 - \frac{Re}{5 \times 10^5} \quad , \text{ apabila } 2,5 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5$$

$$C_m = 1,5 \quad , \text{ apabila } Re > 5 \times 10^5$$

Penentuan koefisien drag adalah dengan menggunakan grafik hubungan antara nilai Re dengan nilai *Keulegan and Carpenter* sebagai berikut :



Gambar 3.9 Grafik hubungan antara nilai Re dengan Keulegan and Carpenter (API RP 2A-WSD)

Peraturan API RP 2A WSD memberikan faktor kinematika sebesar 0.85-0.95 untuk kondisi badai pada daerah tropis dalam

perencanaan beban gelombang yang diterapkan pada kecepatan horizontal partikel air dan akselerasi vertikal dari dua dimensi gelombang. Untuk gelombang saat badai dengan periode ulang 100 tahun digunakan faktor rata-rata sebesar 0.90.

Perhitungan kecepatan dan percepatan gelombang pada arah vertikal dan horisontal dengan berbagai kedalaman dan waktu (Triatmojo 1999) :

$$v = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\sinh k(d+y)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t) \quad (3.12)$$

$$u = \left(\frac{\pi H}{T} \right) \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.13)$$

$$a_x = \left(\frac{2\pi^2 H}{T^2} \right) \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t) \quad (3.14)$$

$$a_y = - \left(\frac{2\pi^2 H}{T^2} \right) \frac{\sinh k(d+y)}{\sinh kd} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.15)$$

dimana :

v = kecepatan gelombang vertikal (m/s)

u = kecepatan gelombang horizontal (m/s)

a_x = percepatan gelombang horizontal (m/s²)

a_y = percepatan gelombang vertikal (m/s²)

H = tinggi gelombang (m)

T = periode gelombang (s)

d = kedalaman air laut (m)

y = kedalaman yang ditinjau (m)

$k = \frac{2\pi}{L}$, dengan L adalah panjang gelombang (m⁻¹)

$L = \frac{gT^2}{2\pi}$ (m), dimana T adalah periode gelombang (s) dan

g adalah percepatan gravitasi (m/s²)

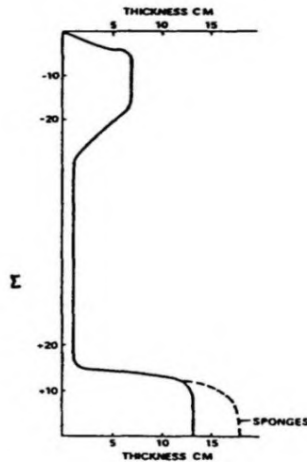
x = jarak horizontal yang ditinjau (m)

t = waktu (s)

σ = frekuensi gelombang, $\frac{2\pi}{T}$

Penentuan beban gelombang pada struktur lepas pantai perlu memperhatikan pengaruh dari *marine growth* karena SFT merupakan struktur yang terbenam di dalam air. Struktur yang terbenam di dalam air akan mengalami penambahan luas secara melintang akibat dari *marine growth* tersebut. Pertambahan luas secara melintang tersebut mengakibatkan gaya gelombang yang terjadi pada struktur semakin besar.

Hubungan antara kedalaman dan pertambahan tebal lapisan SFT yang diakibatkan oleh *marine growth* dapat dilihat pada gambar 3.12 (Ahren 1997)



Gambar 3.10 Grafik pertambahan ketebalan SFT terhadap kedalaman lokasi penempatannya akibat *marine growth* (Ahrens 1997)

The UK's Department of Energy memberikan nilai koefisien drag dan inersia yang tidak biasa dalam memperhitungan beban hidrodinamik yang dipengaruhi oleh efek *marine growth* (Ibrahin Jusoh 1996), sebagai berikut :

Tabel 3.6 Koefisien drag dan inersia akibat pengaruh *marine growth*
(The UK's Department of Energy)

C_D	0.6	<i>no marine growth</i>
C_D	0.7	<i>with marine growth</i>
C_M	1.7	<i>extreme condition</i>
C_M	2.0	<i>fatigue condition</i>

3.3.8. Arus

API RP 2A –WSD mensyaratkan untuk menggunakan *blockage factor* yang akan mengurangi kecepatan arus. Dengan adanya struktur mengakibatkan arus menyebar, sehingga sebagian arus mengelilingi struktur dan tidak melaluinya. *Blockage factor* ditentukan sebesar 0.7-1.0.

Ada dua cara untuk penentuan profil kecepatan arus yang terjadi pada bangunan lepas pantai, yaitu kecepatan arus yang disebabkan oleh pasang-surut air laut dan yang disebabkan oleh gesekan angin terhadap air laut (Nallayarasu 2009). Berikut ini persamaan untuk menentukan profil kecepatan arus :

$$V_T = V_{OT} \left(\frac{y}{H} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3.16)$$

$$V_w = V_{ow} \frac{y}{R} \quad (3.17)$$

dimana :

V_T = kecepatan arus akibat pasang surut dengan berbagai ukuran dari dasar laut (m/s)

V_{OT} = kecepatan arus akibat pasang surut yang terjadi di permukaan air laut (m/s)

V_w = kecepatan arus akibat angin dengan berbagai ukuran dari dasar laut (m/s)

V_{ow} = kecepatan arus akibat angin yang terjadi di permukaan air laut (m/s)

y = berbagai ukuran ketinggian dari dasar laut (m)

h = ketinggian normal air laut (m)

Formulasi matematis untuk menghitung besarnya gaya arus yang bekerja pada suatu struktur lepas pantai yaitu :

$$F_c = \frac{1}{2} \rho C_D U_{q(z)} |U_{q(z)}| A \quad (3.18)$$

dimana :

F_c = gaya arus pada kedalaman yang ditinjau dari dasar laut (kg/m)

ρ = massa jenis air laut (1003 kg/m³)

C_D = koefisien drag

U_c = kecepatan arus pada kedalaman yang ditinjau (m/s)

$|U_c|$ = kecepatan arus absolut (m/s)

A = luas penampang sruktur (m²)

3.4. Pemodelan dan Analisa

Pada studi ini, analisa numerik struktur *prototype* SFT dilakukan dengan *finite element software* menggunakan SAP2000 v14.2.2. SAP2000 dapat memodelkan elemen hingga untuk menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan mekanika, termasuk di dalamnya masalah statik, dinamik, analisis struktural (baik linier maupun nonlinier).

Berikut ini tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pembuatan pemodelan dan analisa yaitu :

1. Membuat pemodelan SFT.

Pemodelan mengacu pada *prototype* SFT yang nantinya dibuat. Model uji yang diujikan dilaboratorium digunakan sebagai dasar dari perilaku struktur SFT yang telah di skalakan. Setelah itu pemodelan dilakukan menggunakan *software* CAD 2010 untuk memodelkan struktur SFT dalam bentuk 3D (tiga dimensi)

dengan bentuk dan ukuran sesuai **Gambar 3.2, Gambar 3.3, dan gambar 3.4**. Kemudian *export* ke *finite element software* SAP2000 v14.2.2.

2. Menentukan tipe elemen pada pemodelan SFT

Tahapan awal ketika masuk ke *finite element software* SAP2000 v14.2.2 adalah menentukan tipe elemen yang digunakan. Untuk *prototype* SFT hanya menggunakan dua elemen, yaitu *shell* dan *frame*. Element tersebut di *input* ke pemodelan berdasarkan penggolongan grup yang digambar menggunakan *software* CAD 2010.

3. Memasukkan desain material pada pemodelan SFT

Desain material yang digunakan berupa baja WF untuk struktur utama, plat baja untuk dinding penutup, kabel strand untuk kabel, dan beton komposit untuk lantai kendaraan.

4. Memasukkan pembebanan pada pemodelan SFT.

Dalam analisa numerik akan memakai beban-beban yang telah ditentukan oleh BPPT pada skala model SFT. Pada studi ini digunakan kombinasi pembebanan sebagai berikut :

$$D + L + H + W$$

$$D + H + W$$

dimana :

D = beban mati

H = beban gaya Hidrostatik

W = beban akibat gelombang

5. Memodelkan variasi BWR struktur SFT.

Pada studi ini untuk memodelkan variasi BWR dalam analisa numerik *prototype* SFT digunakan penambahan *ballast*. Ballast dimodelkan dalam bentuk pembebanan / beban tambahan pada struktur SFT tanpa kombinasi. Ballast dipasang pada bagian

badan *tunnel* yang tenggelam dibawah pelat lantai bagian dalam, dan dapat juga dipasang pada bagian bawah penampang dalam SFT.

Penambahan berat ballast dilakukan secara bertahap menyesuaikan variasi nilai BWR. Penambahan berat ballast pada studi ini akan diperhitungkan pada *preliminary* desain.

6. Hasil Analisa variasi BWR struktur SFT.

Setelah pemodelan, dilakukan analisa variasi BWR dengan membandingkan antara nilai BWR satu dengan yang lainnya. Hasil tersebut untuk mendapatkan nilai yang efektif dari parameter BWR.

Hasil nilai efektif BWR dapat digabungkan dengan hasil analisa efektif parameter lainnya. Hasil gabungan tersebut dimodelkan untuk pemodelan efektif struktur *prototype* SFT. Hasil analisa pemodelan tersebut dibandingkan dengan efektif struktur *prototype* SFT lainnya, sehingga dapat diketahui pengaruh perbedaan respon terhadap struktur SFT. Hasil perbandingan tersebut kemudian di visualisasikan dalam gambar, grafik, dan tabel, sehingga dapat terlihat persamaan dan perbedaannya.

3.5. Kesimpulan

Kesimpulan ini dapat berupa berapa nilai BWR yang efektif. Setelah di dapatkan nilai efektif BWR pada struktur, bagaimana pengaruh BWR terhadap perilaku struktur dari hasil analisa. Apabila terjadi perbedaan, maka perlu di uraikan penyebab terjadinya perbedaan tersebut, sehingga dapat diperoleh analisa nilai BWR yang dapat dipergunakan dalam *prototype* SFT

BAB IV ANALISA DATA

4.1. Umum

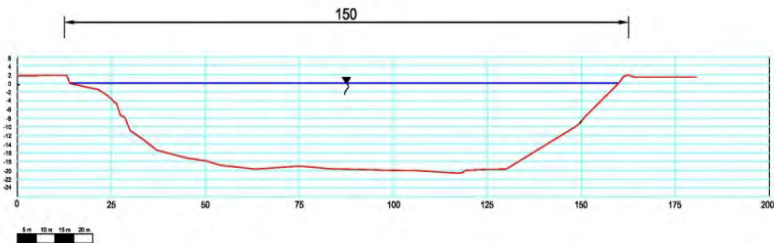
API RP 2A-WSD 2000 peraturan yang digunakan untuk menganalisa dan merencana struktur *prototype* SFT, jika tipe gelombang yang terjadi pada lingkungan perairan tempat *prototype* SFT merupakan tipe gelombang *unbreaking wave* dengan kedalaman 1,5 kali tinggi gelombang yang terjadi. Data tinggi dan periode gelombang hasil pengukuran di lapangan pada lingkungan perairan tempat *prototype* SFT dapat di lihat pada **tabel 4.1**:

Tabel 4.1. Tinggi dan periode gelombang tempat perairan *prototype* SFT

Tinggi gelombang maksimum (H)	5,08 m
Periode gelombang maksimum (T)	9,08 s

Sumber : IHL-BPPT,2011

Selain data tersebut diatas, digunakan juga data bathymetri untuk mendapatkan profil melintang laut dengan ukuran ketinggian lautnya. Data bathymetri dapat dilihat pada gambar 4.1.



Sumber : IHL-BPPT,2011

Gambar 4.1. Profil melintang laut tempat *prototype* SFT

Berdasarkan data bathymetri tersebut diketahui bahwa kedalaman laut tempat *prototype* SFT adalah 20 m, maka dapat ditentukan tipe gelombangnya yaitu :

$$d \geq 1,5 H_w$$

$$20 \text{ m} \geq 1,5 (5,08 \text{ m})$$

$$20 \text{ m} \geq 7,62 \text{ m} \text{ (unbreaking wave)}$$

Hasil perhitungan diatas dapat diketahui bahwa tipe gelombang yang terjadi di lingkungan perairan tempat *prototype* SFT adalah tipe gelombang *unbreaking wave*, maka peraturan pembebanan dan teori gelombang menggunakan API RP 2A-WSD 2000 sudah sesuai dan dapat digunakan.

Dengan kedua data tersebut dapat ditentukan posisi SFT berdasarkan kedalaman laut. Dimana kedalaman laut yang dipilih adalah pada kondisi yang aman dan bebas dari hambatan.

4.2. Penentuan Gelombang

Penentuan teori gelombang untuk digunakan dalam analisa struktur harus menyesuaikan data lingkungan perairan tempat *prototype* SFT. Persyaratan tersebut sudah ditentukan pada API RP 2A-WSD 2000 tabel 2.3.1-3. Untuk menentukan teori gelombang yang sesuai dapat menggunakan grafik hubungan antara H/gT^2 dan d/gT^2 pada **gambar 3.7**. Perhitungan untuk menentukan teori gelombang yang digunakan yaitu :

$$\frac{H}{gT^2} = \frac{5,08 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (9,08 \text{ s})^2} = 0,0063$$

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{20 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (9,08 \text{ s})^2} = 0,0247$$

Hasil perhitungan tersebut disesuaikan pada **Gambar 3.7**, sehingga didapatkan teori gelombang yang digunakan adalah teori *Stream Function Wave* dengan kondisi gelombang air sedang.

4.3. Hidrostatik dan Arus

Tekanan hidrostatik pada struktur SFT dipengaruhi oleh tinggi gelombang dan pasang surut air laut. Tekanan tersebut semakin besar jika kedalamannya bertambah dalam. Pada analisa, data pasang surut air laut yang terjadi diasumsikan sebesar satu meter. Dengan besarnya tekanan hidrostatik yang akan terjadi pada struktur, maka dapat dihitung dengan perhitungan tekanan hidrostatik **Persamaan 3.4.**

The image shows a software dialog box titled "Wave Characteristics" with an "Edit" button. The dialog is organized into several sections:

- Wave Characteristic Name:** A text input field containing the word "gelombang".
- Wave Factors:**
 - Wave Kinematics Factor: Input field with value "0.9".
 - Storm Water Depth: Input field with value "21".
- Wave Data:**
 - Wave Height: Input field with value "5.08".
 - Wave Period: Input field with value "9.08".
- Wave Type:** Radio buttons for "From Selected Wave Theory" (selected) and "User Defined".
- Wave Theory:** Radio buttons for "Airy Wave Theory (Linear)" (selected), "Stokes Wave Theory", and "Cnoidal Wave Theory". There are also "Order" input fields next to the Stokes and Cnoidal options.

At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons.

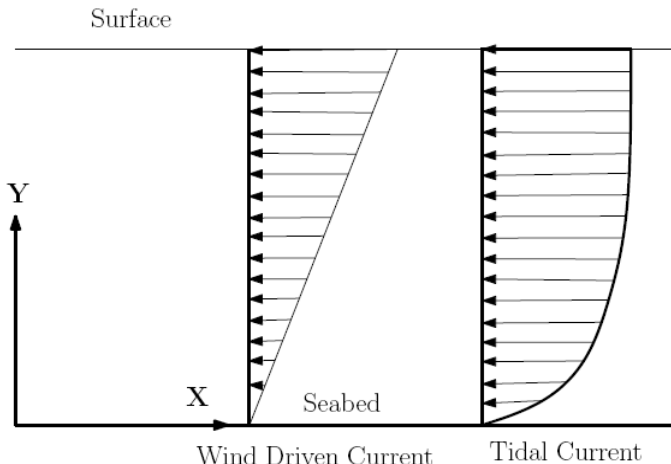
Gambar 4.2. Karakteristik Gelombang Dengan SAP 2000

Analisa perhitungan tekanan hidrostatik pada struktur akan dimulai dengan menghitung panjang gelombang yang terjadi dengan menggunakan program bantu SAP2000 v.14.2.2 seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.2.** Data yang akan dimasukkan ke dalam perhitungan SAP2000 v.14.2.2, teori gelombang yang digunakan adalah *Linear Wave Theory or stream function*, tinggi gelombang, periode gelombang, kedalaman air laut, faktor kinematik gelombang. Faktor kinematik gelombang untuk daerah

tropis adalah 0,85-0,95 dimana digunakan angka rata-rata 0,9 dan tinggi pasang dari *seabed* yaitu 21 m atau 1 m dari datum.

Untuk data gelombang, maka gelombang yang terjadi perlu ditambahkan dengan data profil arus. Hal ini terjadi karena diasumsikan gaya gelombang dan arus terjadi secara bersamaan. Data kecepatan arus yang didapatkan adalah 1,2 m/s pada kedalaman 15 m dari *seabed* dan tidak diketahui kecepatan arus disebabkan oleh angin atau pasang surut karena pengukurannya langsung dilakukan di lapangan. Jadi, dari data kecepatan arus tersebut akan dihitung berapa kecepatan arus yang disebabkan oleh angin dan berapa kecepatan arus yang disebabkan oleh pasang surut. Hasil dari kedua kecepatan arus tersebut nantinya akan dijumlahkan karena asumsinya mempertimbangkan kondisi lingkungan yang kritis.

Kecepatan maksimum yang didapatkan nantinya akan dimasukkan ke dalam *software* sebagai profil arus. Perbedaan kecepatan arus akibat angin dan kecepatan arus akibat pasang surut sesuai **Gambar 4.3**.



Sumber : *Offshore Structure Analysis and Design*, 2009

Gambar 4.3 Perbedaan kecepatan angin akibat angin dan pasang surut

Analisa perhitungan kecepatan arus akibat angin menggunakan **Persamaan 3.17**. Hasil perhitungan kecepatan arus akibat angin dapat dilihat pada **Tabel 4.2**. Berdasarkan analisa tersebut didapatkan kecepatan arus akibat angin menurut kedalamannya.

Tabel 4.2 Hasil analisa kecepatan arus akibat angin

$h(m)$	$y(m)$	$V_{ow}(m/s)$	$V_w(m/s)$
21	0	1,2	0,00
21	2	1,2	0,11
21	4	1,2	0,23
21	6	1,2	0,34
21	8	1,2	0,46
21	10	1,2	0,57
21	12	1,2	0,69
21	14	1,2	0,80
21	16	1,2	0,91
21	18	1,2	1,03
21	20	1,2	1,14
21	21	1,2	1,20

Keterangan tabel :

H = Kedalaman laut dihitung pada saat pasang

y = Tinggi air laut dari *seabed*

V_{ow} = Kecepatan arus di permukaan laut

V_w = Kecepatan arus menurut kedalamannya dari *seabed*

Perhitung kecepatan arus akibat pasang surut air laut menggunakan **Persamaan 3.16**. Hasil perhitungan tersebut dapat

dilihat pada **tabel 4.3**. Berdasarkan analisa tersebut didapatkan kecepatan arus akibat pasang surut menurut kedalamannya.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan kecepatan arus akibat pasang surut

$h(m)$	$y(m)$	$Vc_{oT}(m/s)$	$Vc_T(m/s)$
21	0	1,2	0,00
21	2	1,2	0,86
21	4	1,2	0,95
21	6	1,2	1,00
21	8	1,2	1,05
21	10	1,2	1,08
21	12	1,2	1,11
21	14	1,2	1,13
21	16	1,2	1,15
21	18	1,2	1,17
21	20	1,2	1,19
21	21	1,2	1,20

Keterangan tabel :

h = Kedalaman laut dihitung pada saat pasang

y = Tinggi air laut dari *seabed*

Vc_{oT} = Kecepatan arus di permukaan laut

Vc_T = Kecepatan arus menurut kedalamannya dari *seabed*

Hasil perhitungan tersebut berupa profil arus yang dimasukkan ke dalam tabel *current profile* pada SAP2000 v.14.22 dan hanya dibuat pada satu tabel. Data-data hasil perhitungan kecepatan arus akibat angin dan pasang surut dijumlahkan. Hasil perhitungan kecepatan arus maksimum yang terjadi tiap

kedalaman dari *seabed* terlihat pada **Tabel 4.4**. Hasil analisa tersebut diperuntukan untuk menentukan profil arus yang terjadi pada lingkungan perairan struktur SFT dibangun.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan kecepatan arus maksimum

y (m)	$V_{current}$ (m/s)
0	0,000
2	0,972
4	1,175
6	1,346
8	1,503
10	1,651
12	1,794
14	1,932
16	2,069
18	2,202
20	2,335
21	2,400

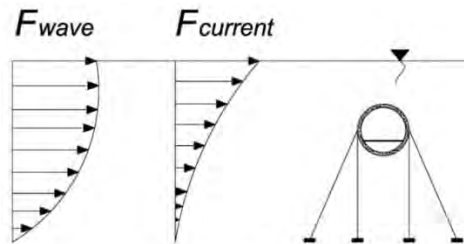
Berdasarkan API RP 2A-WSD 2000, terdapat penggunaan *blockage factor* atau faktor hambatan yang mengurangi kecepatan arus. Secara tidak langsung adanya SFT mengakibatkan arus menyebar dan mengelilingi struktur SFT. Dengan kondisi tersebut, maka perlu di perhitungkan *blockage factor* dengan nilai sebesar 1. Profil arus yang dimasukkan ke dalam *input* data SAP2000 v.14.2.2 dapat dilihat pada **Gambar 4.4**.

Konsep teori gaya gelombang yang terjadi pada suatu bangunan lepas pantai yaitu apabila gaya gelombang yang bekerja semakin mendekati permukaan laut akan semakin besar dibandingkan dengan gaya gelombang yang terjadi pada daerah

seabed atau dasar laut **Gambar 4.5**. Apabila teori tersebut disesuaikan dengan profil arus yang dimasukkan ke dalam *input* data SAP2000 v.14.2.2, maka hasil yang didapat sudah sesuai dengan teori.

	Vert from Datum	Current Velocity	Current Direction
1	21.	2.4	0.
2	20.	2.335	0.
3	18.	2.202	0.
4	16.	2.069	0.
5	14.	1.932	0.
6	12.	1.794	0.
7	10.	1.651	0.
8	8.	1.503	0.
9	6.	1.346	0.
10	4.	1.175	0.
11	2.	0.972	0.
12	0.	0.	0.

Gambar 4.4 Input data profil arus pada SAP 2000



Gambar 4.5 Konsep teori gaya gelombang dan arus pada struktur SFT

Hasil perhitungan panjang gelombang dari SAP2000 v.14.2.2 dapat dilihat pada **gambar 4.6**.

Kontrol teori gelombang yang digunakan perlu dilakukan agar analisa gelombang yang akan dihitung bisa sesuai dengan

peraturan API RP 2A-WSD 2000 dengan menggunakan T_{app} . Pada perhitungan gelombang sebelumnya hanya menggunakan periode gelombang hasil pencatatan di lapangan (T). Berikut ini perhitungan kontrol gelombang yaitu :

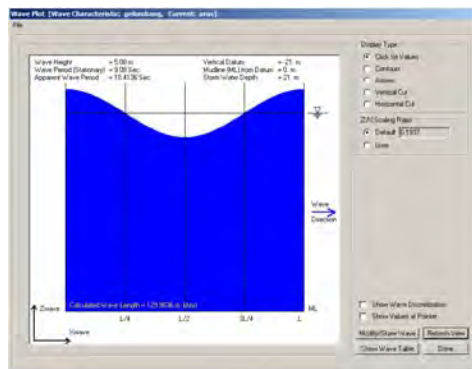
$$\frac{H}{gT_{app}^2} = \frac{5.08 \text{ m}}{9.81 \text{ m/s}^2 \cdot (10.4136 \text{ s})^2} = 0.0048$$

$$\frac{d}{gT_{app}^2} = \frac{20 \text{ m}}{9.81 \text{ m/s}^2 \cdot (10.4136 \text{ s})^2} = 0.0188$$

Panjang gelombang (L) yang diperoleh adalah 129,964 m. Dengan panjang gelombang (L), maka dapat dihitung angka gelombang (k) dengan persamaan sebagai berikut :

$$k = \frac{2\pi}{L} = \frac{2(3.14)}{129.964 \text{ m}} = 0.04835 \text{ m}^{-1}$$

Hasil perhitungan angka gelombang (k) akan digunakan untuk menentukan besarnya tekanan hidrostatik sesuai dengan kedalaman (z), dimana tinggi permukaan laut (d) dari *seabed* yang digunakan yaitu 20 m. Hasil perhitungan tekanan hidrostatik pada lingkungan perairan struktur *prototype* SFT terlihat pada **tabel 4.5**.

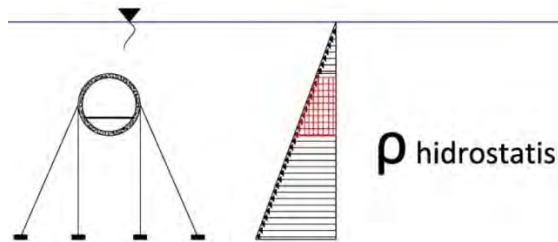


Gambar 4.6 Hasil analisa karakteristik gelombang perairan tempat *prototype* SFT dengan software SAP2000

Tabel 4.5 Hasil perhitungan tekanan hidrostatik berdasarkan kedalaman

z	$k(d-z)$	$\cosh [k(d-z)]$	$\cosh kd$	$H_w (m)$	$H_z (m)$	$\gamma (N/m^3)$	$\rho(N/m^2)$
0	0,967	1,505	1,505	9,144	4,572	10055	45972,6
0,8775	0,924	1,459	1,505	9,144	5,309	10055	53379,5
2,5429	0,844	1,378	1,505	9,144	6,728	10055	67655,5
4,1654	0,766	1,308	1,505	9,144	8,138	10055	81826,3
5,0308	0,724	1,273	1,505	9,144	8,899	10055	89486,1
5,2725	0,712	1,264	1,505	9,144	9,113	10055	91637,6
5,7322	0,690	1,247	1,505	9,144	9,522	10055	95744,3
6,365	0,659	1,225	1,505	9,144	10,087	10055	101428,0
7,1089	0,623	1,201	1,505	9,144	10,756	10055	108154,4
7,8911	0,585	1,176	1,505	9,144	11,464	10055	115278,2
8,635	0,549	1,155	1,505	9,144	12,143	10055	122100,9
9,2678	0,519	1,138	1,505	9,144	12,724	10055	127940,6
9,7275	0,497	1,126	1,505	9,144	13,148	10055	132203,3
9,9692	0,485	1,120	1,505	9,144	13,371	10055	134451,4
11	0,435	1,096	1,505	9,144	14,330	10055	144091,0
12	0,387	1,076	1,505	9,144	15,268	10055	153522,1
14	0,290	1,042	1,505	9,144	17,167	10055	172613,5
16	0,193	1,019	1,505	9,144	19,095	10055	192002,8
18	0,097	1,005	1,505	9,144	21,052	10055	211683,2
20	0,000	1,000	1,505	9,144	23,038	10055	231650,8

Dari tabel tersebut menunjukkan besarnya tekanan hidrostatik yang bekerja tergantung dari kedalaman laut. Apabila suatu struktur diletakkan semakin dalam, maka tekanan hidrostatik yang terjadi lebih besar (**Gambar 4.7**). Untuk menghindari besarnya tekanan hidrostatik yang besar, maka *prototype* SFT diletakkan pada kedalaman 5 m dari permukaan laut. Besarnya tekanan hidrostatik yang diterima *prototype* SFT dapat dilihat pada **tabel 4.5** dengan angka yang bercetak tebal.



Gambar 4.7 Tekanan hidrostatik pada struktur prototype SFT

4.4. Gelombang

Pada *prototype* SFT ini, gaya gelombang terjadi di salah satu bagian struktur. Besarnya kecepatan dan percepatan gelombang akan dihitung sesuai **persamaan 3.12**, **persamaan 3.13**, **persamaan 3.14**, dan **persamaan 3.15**. Setelah *input* data gelombang dan arus pada SAP2000 v.14.2.2, maka secara otomatis akan dihitung besarnya kecepatan dan percepatan gelombang baik dalam arah vertikal maupun horizontal. Gaya gelombang dan arus yang akan bekerja pada struktur akan diasumsikan terjadi pada arah 0° atau pada arah sumbu X karena pada arah tersebut kondisi kritis akan terjadi pada struktur SFT jika beban lateral bekerja. Hasil analisa data gelombang dapat dilihat pada **Gambar 4.8**.

Hasil gaya gelombang dan arus yang telah dihitung oleh SAP2000 hanya bekerja pada *frame properties* model SFT dan kabel/tendon, sehingga gaya gelombang dan arus tersebut tidak akan bekerja pada badan *tunnel* yang merupakan *shell properties*. Gaya gelombang tidak ada pada tabel profil gelombang SAP2000 di atas karena besarnya gaya gelombang tersebut tergantung dari diameter kabel tendon SFT.

Dari data tabel gelombang, *software* otomatis menghitung besarnya gaya gelombang yang terjadi pada kabel/tendon SFT setelah melakukan *define property* dan *assign load*. Untuk

besarnya gaya gelombang dan arus yang terjadi pada badan SFT akan dihitung dengan cara manual.

	Horiz Loc	Vlt from Datum	Horiz/Wave Vel	Horiz Current Vel	Horiz Total Vel	Horiz/Wave Acc	Vert/Wave Vel	Vert/Wave Acc	
1	0.	23.54	1.9796	2.4	4.3796	0.	0.	-1.08	2
2	0.	23.1167	1.947	2.3755	4.3225	0.	0.	-1.0531	E
3	0.	22.6933	1.9153	2.3509	4.2662	0.	0.	-1.0266	11
4	0.	22.27	1.8843	2.3262	4.2105	0.	0.	-1.0005	1-
5	0.	21.8467	1.8542	2.301	4.1552	0.	0.	-0.9748	11
6	0.	21.4233	1.8248	2.2759	4.1007	0.	0.	-0.9496	2-
7	0.	21.	1.7962	2.2508	4.047	0.	0.	-0.9248	2-
8	0.	20.5767	1.7683	2.2257	3.994	0.	0.	-0.9003	2-
9	0.	20.1533	1.7412	2.2006	3.9418	0.	0.	-0.8762	3-
10	0.	19.73	1.7148	2.1755	3.8903	0.	0.	-0.8525	3-
11	0.	19.3067	1.6892	2.1504	3.8395	0.	0.	-0.8292	4-
12	0.	18.8833	1.6642	2.1252	3.7895	0.	0.	-0.8062	4-
13	0.	18.46	1.6399	2.1001	3.7401	0.	0.	-0.7835	4-
14	0.	18.0367	1.6155	2.075	3.6916	0.	0.	-0.7611	E
15	0.	17.6133	1.5917	2.0509	3.644	0.	0.	-0.739	7-
16	0.	17.19	1.5683	2.0271	3.5974	0.	0.	-0.7172	9-
17	0.	16.7667	1.5452	2.0036	3.5516	0.	0.	-0.6957	11
18	0.	16.3433	1.5225	1.9804	3.5066	0.	0.	-0.6745	1-
19	0.	15.92	1.5001	1.9575	3.4623	0.	0.	-0.6536	11
20	0.	15.4967	1.4781	1.9349	3.4187	0.	0.	-0.633	11

Gambar 4.8 Analisa Data Gelombang Pada SAP 2000

Perhitungan manual untuk gaya gelombang dan arus menggunakan persamaan Morrison dengan melihat pada bentuk penampang *prototype* SFT (**Gambar 3.4**). Prinsip dari persamaan Morrison yaitu perbandingan antara diameter struktur dengan panjang gelombang lebih kecil atau sama dengan 0,1–0,2 (*TU Delft Open Course, 2005*), sedangkan jika perbandingan tersebut lebih besar dari nilai 0,1– 0,2, maka teori Difraksi harus digunakan dalam analisa perhitungan beban lingkungan untuk gelombang dan arus.

$$\frac{D}{L} = \frac{5 \text{ m}}{129.964 \text{ m}} = 0.038 \leq 0.2 \text{ (ok)}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa persamaan Morrison dapat digunakan dan tidak perlu memakai teori Difraksi.

Tinggi gelombang yang digunakan adalah tinggi gelombang maksimum yang telah digunakan dalam perhitungan tekanan hidrostatis. Gaya gelombang dan arus yang bekerja pada badan *tunnel* SFT dihitung selama periode gelombang terjadi yaitu 10,414 s panjang gelombang 129,964 m. Hasil perhitungan *trial and error* gaya gelombang dan arus kondisi maksimum pada badan *tunnel* SFT dapat dilihat pada **tabel 4.6**.

Tabel 6.6 Perhitungan Beban Gerdanahubungan dan Jarak

Data Tekan :

$$C_{10} = 2.00 \quad H = 5.08 \text{ m}$$

$$C_{15} = 0.70 \quad f_{100} = 9.144 \text{ m}$$

$$D = 5 \text{ m} \quad T_{100} = 1041 \text{ s}$$

$$A = 19.625 \text{ m}^2 \quad \sigma = 0.101 \text{ s}^{-1}$$

$$P = 1.045 \text{ MN/m}^2 \quad L = 12996 \text{ m}$$

$$T = 9.08 \text{ s} \quad k = 0.0483 \text{ m}^{-1}$$

 $f = 0.1114 \text{ s} \quad z = 2.534 \text{ m}$

$f(\text{m})$	$z'(\text{m})$	$H(f)(\text{m})$	h	r	$h \cdot e^r$	$\text{ant}(\text{ant}(\log z'))$	$\text{ant}(\log z')$	$\text{ant}(\log z)$	$z_{0.10}(\text{m})$	$V_{0.10}(\text{m}^3)$	$V_{0.10}(\text{m}^3)$	$V_{0.10}(\text{m}^3)$	C_{10}	C_{15}	$F(\text{m}^2)$	$F(\text{m}^2)$	$D(\text{m})$	$F_{0.10}(\text{m}^2)$	
30	89.94	-30	0.000	0.937	1041	0	1.000	1.125	0.000	1.000	1.161	0.000	0.712	2.00	0.70	2.095	19.625	5	3.821
30	89.94	-19	0.045	0.937	1041	0	1.001	1.125	0.000	1.000	1.164	0.000	0.957	2.00	0.70	2.121	19.625	5	3.831
30	89.94	-18	0.091	0.937	1041	0	1.005	1.125	0.000	1.000	1.169	0.000	1.111	2.00	0.70	2.302	19.625	5	11.446
30	89.94	-16	0.191	0.937	1041	0	1.019	1.125	0.000	1.000	1.188	0.000	1.217	2.00	0.70	2.165	19.625	5	12.904
30	89.94	-14	0.390	0.937	1041	0	1.042	1.125	0.000	1.000	1.430	0.000	1.136	2.00	0.70	2.776	19.625	5	14.094
30	89.94	-12	0.187	0.937	1041	0	1.076	1.125	0.000	1.000	1.466	0.000	1.405	2.00	0.70	2.870	19.625	5	15.065
30	89.94	-11	0.415	0.937	1041	0	1.096	1.125	0.000	1.000	1.494	0.000	1.454	2.00	0.70	2.988	19.625	5	15.886
30	89.94	-9.5776	0.489	0.937	1041	0	1.132	1.125	0.000	1.000	1.559	0.000	1.511	2.00	0.70	3.040	19.625	5	16.896
30	89.94	-9.2378	0.519	0.937	1041	0	1.138	1.125	0.000	1.000	1.580	0.000	1.569	2.00	0.70	3.119	19.625	5	17.793
30	89.94	-8.6385	0.549	0.937	1041	0	1.155	1.125	0.000	1.000	1.575	0.000	1.644	2.00	0.70	3.198	19.625	5	18.696
30	89.94	-7.8911	0.585	0.937	1041	0	1.176	1.125	0.000	1.000	1.603	0.000	1.670	2.00	0.70	3.273	19.625	5	19.586
30	89.94	-7.1109	0.635	0.937	1041	0	1.301	1.125	0.000	1.000	1.656	0.000	1.714	2.00	0.70	3.350	19.625	5	20.517
30	89.94	-6.365	0.669	0.937	1041	0	1.335	1.125	0.000	1.000	1.669	0.000	1.794	2.00	0.70	3.463	19.625	5	21.937
30	89.94	-5.7132	0.690	0.937	1041	0	1.347	1.125	0.000	1.000	1.700	0.000	1.865	2.00	0.70	3.565	19.625	5	23.314
30	89.94	-5.1224	0.719	0.937	1041	0	1.370	1.125	0.000	1.000	1.750	0.000	2.001	2.00	0.70	3.751	19.625	5	25.487
30	89.94	-4.1654	0.766	0.937	1041	0	1.368	1.125	0.000	1.000	1.782	0.000	2.136	2.00	0.70	3.917	19.625	5	28.060
30	89.94	-3.5439	0.844	0.937	1041	0	1.378	1.125	0.000	1.000	1.877	0.000	2.369	2.00	0.70	4.146	19.625	5	31.430
30	89.94	-3.0375	0.924	0.937	1041	0	1.459	1.125	0.000	1.000	1.887	0.000	2.535	2.00	0.70	4.323	19.625	5	34.455
30	89.94	0	0.967	0.937	1041	0	1.505	1.125	0.000	1.000	2.051	0.000	2.400	2.00	0.70	4.451	19.625	5	36.219

BAB V PRELIMINARY DESAIN STRUKTUR

5.1 Desain Penampang *SFT*

Desain penampang melintang menyesuaikan pada kendaraan yang akan melintasi *SFT*. Pada *prototype* yang dibuat ini, nantinya hanya dilewati kendaraan dengan jenis penumpang. Hal ini untuk memudahkan dalam menganalisa dan meninjau kelayakan pembangunan *SFT* di Kepulauan Seribu. Ukuran kendaraan penumpang memiliki lebar 2,1 m dan tinggi bebas 1,3 m (**Tabel 5.1**).

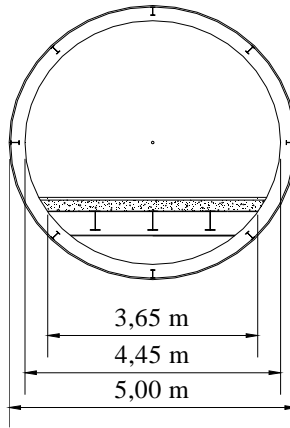
Ukuran diameter *prototype* *SFT* direncanakan dengan diameter luar (D) 5,00 m dan lebar jalan (l) di dalam 3,65 m. Ukuran tersebut diharapkan sudah memberikan ruang bebas untuk berkendara dalam *prototype* *SFT* (**Gambar 5.1**).

Tabel 5.1 Dimensi Kendaraan Penumpang

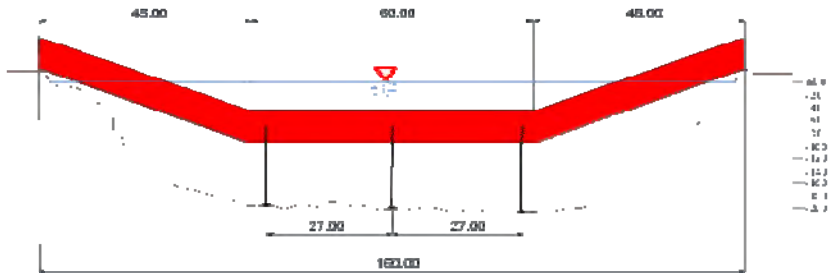
Jenis Kendaraan	Panjang Unsur Teknis Kendaraan (meter)						
	Panjang	Lebar	Tinggi	Tonjolan Depan	Jarak Gandar	Tonjolan Belakang	Radius Putar
Penumpang	5,80	2,10	1,30	0,90	3,40	1,50	7,30
Truk	12,10	2,60	4,10	2,10	7,60	2,44	12,80
Bus	12,10	2,60	4,10	2,10	7,60	2,44	12,0
Trailer	21,00	2,60	4,10	1,20	4,0 (depan) 9,0 (belakang)	0,90	12,0

Sumber : UU Tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan (pasal 12)

Desain penampang memanjang *prototype* *SFT* (**Gambar 5.2**) menyesuaikan dengan skala model yang telah dibuat oleh Budiman (2013). Penampang memanjang tersebut memiliki kemiringan atau kelandaian sekitar 15%. Kelandaian jalan yang direncanakan adalah kelandaian maksimum, sehingga kecepatan laju kendaraan maksimal hanya 40 km/jam.



Gambar 5.1 Desain Melintang Prototype SFT



Gambar 5.2 Desain Memanjang Prototype SFT

5.2 Desain Struktur SFT

Dalam merencanakan bagian-bagian struktur *prototype* SFT harus mempertimbangkan rasio antara berat sendiri dengan gaya apung yang terjadi yaitu 1,5 tanpa beban hidup (**Tabel 3.5**). Setiap bagian-bagian mempunyai pengaruh terhadap berat *tunnel* itu sendiri. Pada **persamaan 3.1** sampai dengan **persamaan 3.3** akan digunakan untuk menentukan tebal badan SFT agar berat sendiri tersebut sesuai dengan rasio yang telah ditentukan.

Dalam menentukan bagian struktur, nilai rasio yang akan digunakan adalah lebih dari 1,5 jika kondisi *tunnel* belum dibebani oleh beban kendaraan atau beban hidup lalu-lintas sedangkan nilai rasio lebih dari 1,2 digunakan jika kondisi *tunnel* telah dibebani oleh beban lalu-lintas.

Berat sendiri *tunnel* (W) nantinya akan ditambahkan dengan beban-beban fasilitas lainnya yang berada didalam *tunnel* seperti beban pelat kendaraan, balok baja pemikul pelat kendaraan, dan lain-lain. Beban-beban tersebut akan dibatasi sebesar 30% dari berat sendiri *tunnel*, sehingga untuk mendapatkan berat seluruh bagian struktur dari SFT akan dilakukan secara *trial and error* dengan menambahkan ballast. Dengan demikian didapatkan dimensi bagian-bagian struktur yang kuat, aman, dan tetap memiliki berat yang sesuai rasio berat *tunnel*.

Desain panjang SFT adalah 150 m dan panjang badan *tunnel* yang berada di dalam laut adalah 117,38 m. Perhitungan total gaya apung (U) badan *tunnel* yaitu :

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot l \cdot \gamma_w \\ &= \frac{1}{4} \pi (5,0 \text{ m})^2 \cdot 117,38 \text{ m} \cdot 10,25 \text{ kN/m}^3 \\ &= 23623,70 \text{ kN} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan gaya apung tersebut harus lebih besar dari berat total *prototype* SFT. Agar gaya apung tersebut dapat membantu ketika beban mati, hidup, hidrostatik, gelombang dan arus bekerja.

5.2.1 Desain Struktur Sekunder

5.2.1.1 Pelat Lantai Kendaraan

Pelat lantai kendaraan di desain dari beton bertulang yang sering digunakan pada jembatan konvensional. Pelat lantai kendaraan ini memiliki lebar 3,65 m dan akan ditahan oleh balok memanjang dengan jarak antar balok 1,00 m dan balok melintang

dengan jarak antar balok 3,00 m. Penentuan tebal lantai kendaraan yaitu :

$$d' \geq 200 \text{ mm} \dots \dots \dots (\text{menentukan})$$

Atau

$$d' \geq 100 + 40 b_1$$

$$d' = 100 + (40 \times 1,0)$$

$$d' = 140 \text{ mm} \leq 200 \text{ mm}$$

dipakai $d' = 200 \text{ mm}$

dimana :

b_1 = jarak balok profil baja pemikul (balok memanjang) plat lantai kendaraan (m)

d' = tebal plat lantai kendaraan (mm)

5.2.1.2 Balok Memanjang

Balok memanjang direncanakan dengan profil WF 350x175x7x11(BJ 55) dengan data profil sebagai berikut :

Tabel 5.2 Data Profil Baja WF Untuk Balok Arah Memanjang

A	63,14 cm^2	S_x	775 cm^3
W	49,6 kg/m	S_y	112 cm^3
Z_x	841 cm^3	i_x	14,7 cm
Z_y	172 cm^3	i_y	3,95 cm
I_x	13600 cm^4	r	14 mm
I_y	984 cm^4	h	300 mm
F_y	410 MPa	f_u	5500 MPa
t_w	7 mm	t_f	11 mm
d	350 mm	b_f	175 mm

Pembebanan pada balok memanjang dan melintang menggunakan faktor beban berikut ini :

1. Beton cor di tempat :
(K_{MS}^u) = 1,30 (RSNI T-02-2005 ps.5.2 tabel 2)
2. Balok baja
(K_{MS}^u) = 1,10..... (RSNI T-02-2005 ps.5.2 tabel 2)
3. Beban lalu-lintas
(K_{TD}^u) = 1,80 (RSNI T-02-2005 ps.6.3 tabel 10)
4. Kayu
(K_{MS}^u) = 1,40 (RSNI T-02-2005 ps. 5.2 tabel 2)

Pembebanan akibat beban mati dengan perhitungan momen dan gaya geser yang bekerja pada balok memanjang dapat dilihat pada **Tabel 5.3**. Pembebanan akibat beban hidup, beban terpusat KEL (*Knife Edge Load*) atau BGT (beban garis) menggunakan faktor FDB (faktor beban dinamis) sesuai **Gambar 5.4**. Hasil perhitungan pembebanan, momen, dan gaya geser akibat beban hidup pada balok memanjang dapat dilihat pada **Tabel 5.4**.

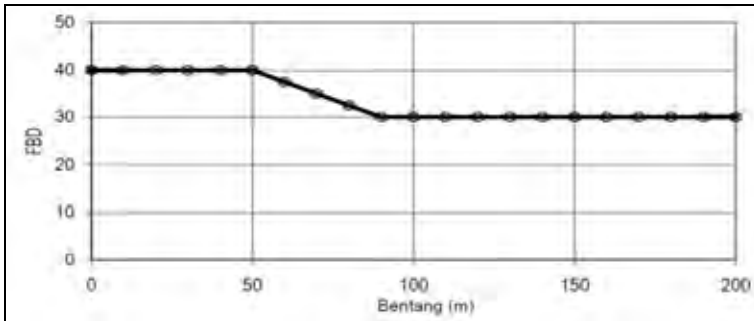
Tabel 5.3 Perhitungan beban, momen dan gaya geser maksimum pada balok memanjang akibat beban mati

Aspal	1,716 kN/m
Pelat Lantai Beton	6,240 kN/m
Berat Sendiri Balok Memanjang	0,546 kN/m
Berat Bekisting	0,500 kN/m
Berat total (q_{dead})	9,002 kN/m
M_{Dmax} (momen akibat beban mati)	10,13 kN m
V_{Dmax} (gaya geser akibat beban mati)	13,502 kN

Untuk beban merata UDL (*Ultimate Dead Load*) digunakan intensitas q kPa dimana besarnya tergantung pada panjang total yang dibebani L sesuai (RSNI T-02-2005 ps. 6.3.1)

$$L < 30 \text{ m} : q = 9,0 \text{ kPa}$$

$$L > 30 \text{ m} : q = 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa}$$



Sumber: RSNI T-02-2005 ps. 6.6 gambar 8

Gambar 5.4 Faktor Beban Dinamis (FDB) Pada Pembebanan KEL atau BGT

Tabel 5.4 Perhitungan beban, momen dan gaya geser maksimum pada balok memanjang akibat beban hidup

Beban Hidup Merata (UDL)	9,00 kN/m ²
L < 30 m (RSNI T-02-2005 ps. 6.3.1)	
q_{UDL}	16,20 kN/m
Beban Hidup (KEL)	49 kN/m
(berdasarkan RSNI T-02-2005 ps. 6.3.1.3)	
P_(KEL)	123,48 kN
M_{max} _(momen akibat beban hidup UDL+KEL)	110,84 kN.m
V_{max} _(gaya geser akibat beban mati)	147,78 kN

Desain profil balok memanjang perlu dikontrol. Kontrol dari desain profil tersebut dapat dilihat pada **Tabel 5.5**.

Tabel 5.5 Kontrol Pada Balok Memanjang

Momen	M live_{max}	110,84 kNm
	M dead_{max}	10,13 kNm
	Mmax	120,96 kNm
	ϕMn	310 kNm
	Mmax < ϕMn	OK
Geser	V live_{max}	147,78 kNm
	V dead_{max}	13,502 kNm
	Vmax	161,28 kNm
	ϕVn	542,43 kNm
	Vmax < ϕVn	OK
Lendutan	δ max	0,18 Mpa
	δ ijin	0,375 Mpa
	kontrol	OK

Hasil perhitungan kontrol yang dilakukan menunjukkan bahwa profil WF 350x175x7x11 aman digunakan sebagai struktur *prototype* SFT.

5.2.1.3 Balok Melintang

Balok melintang direncanakan menggunakan profil WF 450x200x9x14 (BJ 55) dengan data profil sebagai berikut (**Tabel 5.6**) :

Tabel 5.6 Data Profil Baja WF Untuk Balok Arah Melintang

A	96,76 cm^2	S_x	1490 cm^3
w	76 kg/m	S_y	187 cm^3
Z_x	1621 cm^3	i_x	18,6 cm
Z_y	289 cm^3	i_y	4,4 cm
I_x	33500 cm^4	r	18 mm
I_y	1870 cm^4	h	386 mm
f_y	410 MPa	f_u	5500 MPa
t_w	9 mm	t_f	14 mm
d	450 mm	b_f	175 mm

Hasil perhitungan pembebanan, momen, dan gaya geser sebelum dan sesudah komposit dapat dilihat pada **Tabel 5.7**.

Tabel 5.7 Pembebanan Balok Melintang Sebelum Dan Sesudah Komposit Akibat Beban Mati

	Sebelum komposit	Setelah komposit
Pelat Beton	14,40 kN/m	- kN/m
Aspal	- kN/m	3,96 kN/m
Balok memanjang	1,488 kN/m	- kN/m
Balok melintang	0,76 kN/m	- kN/m
Berat Bekisting	0,5 kN/m	- kN/m
Berat Total (q_{dead})	17,15 kN/m	3,96 kN/m
Mmax	28,577 kN.m	6,60 kN.m
Vmax	31,306 kN	7,23 kN

Model mekanika perhitungan beban hidup lalu-lintas UDL dan KEL dibuat sesuai peraturan RSNI T-02-2005 ps. 6.3.2, dimana pada pasal tersebut menjelaskan jika lebar jalur kurang atau sama dengan 5 m, maka penyebaran arah beban UDL harus ditempatkan dengan intensitas 100% pada seluruh jalur. Hal ini menyebabkan pemodelan beban hidup pada balok melintang dan memanjang pada struktur SFT hampir sama kecuali beban KEL yang menjadi beban terbagi rata.

Beban hidup UDL dihitung sesuai RSNI T-02-2005 ps. 6.3.1. Pembebanan akibat beban hidup serta perhitungan momen dan gaya geser maksimum yang bekerja pada balok melintang dapat dilihat pada **tabel 5.8**.

Tabel 5.8 *Perhitungan Beban Mati Setelah Komposit, Momen dan Gaya Geser Maksimum Pada Balok Melintang*

Beban Hidup Merata (UDL)	9,00 kN/m²
L<30 m (RSNI T-02-2005 ps. 6.3.1)	
q_{UDL}	29,16 kN/m
Beban Hidup (KEL)	49 kN/m
(berdasarkan RSNI T-02-2005 ps. 6.3.1.3)	
P_(KEL)	123,48 kN
M_{max}(momen akibat beban hidup UDL+KEL)	254,37 kN.m
V_{max}(gaya geser akibat beban mati)	278,67 kN

Desain profil balok melintang perlu dikontrol. Kontrol dari desain profil tersebut dapat dilihat pada **Tabel 5.9**.

Tabel 5.9 Kontrol balok melintang

Momen	M live_{max}	254,47 kNm
	M dead_{max}	28,58 kNm
	Mmax	282,95 kNm
	ϕMn	10573,65 kNm
	Mmax < ϕMn	OK
Geser	V live_{max}	278,67 kNm
	V dead_{max}	31,31 kNm
	Vmax	309,97 kNm
	ϕVn	896,67 kNm
	Vmax < ϕVn	OK
Lendutan	δ max	0,07 cm
	δ ijin	0,456 cm
	kontrol	OK

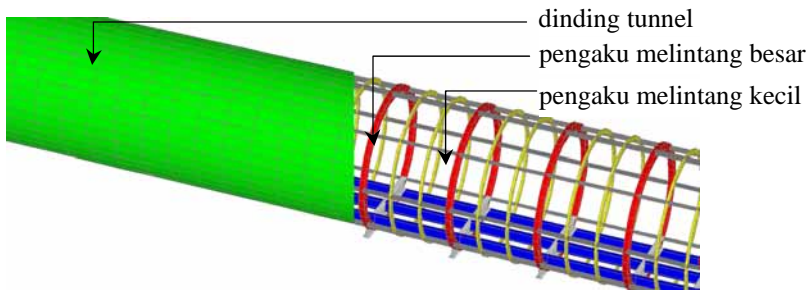
Hasil perhitungan kontrol yang dilakukan menunjukkan bahwa profil WF 450x200x9x14 aman digunakan sebagai struktur *prototype* SFT.

5.2.2 Desain Struktur Primer

5.2.2.1 Struktur Rangka *Tunnel*

Struktur primer berfungsi menahan beban yang akan bekerja pada *prototype* SFT. Dimensi yang digunakan berdasarkan penelitian sebelumnya. Data-data tersebut sebagai berikut :

- Desain dinding menggunakan plat baja setebal 2,5 cm.
- Desain pengaku memanjang dengan profil WF 150x75x5x7 tiap sudut 45⁰.
- Desain pengaku melintang besar dengan profil WF 250x175x7x12 tiap jarak 3 m
- Desain pengaku melintang kecil dengan profil WF 150x75x5x7 tiap jarak 1 m diantara pengaku melintang besar.



Gambar 5.4 Struktur Rangka Prototype SFT

5.2.2.2 Kontrol Ratio Gaya Apung dan Berat Sendiri Tunnel

Rasio gaya apung dan berat sendiri tunnel harus dilakukan pengecekan untuk mendapatkan persyaratan rasio perbandingan. Pengecekan rasio dilakukan sebelum dan sesudah beban hidup lalu lintas bekerja. Perhitungan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 5.10**.

Tabel 5.10 Hasil Perhitungan Rasio Gaya Apung dan Berat Tunnel

Fasilitas SFT	w sendiri (kN/m)	Panjang (m)	Jumlah	Berat (kN)	Ratio BWR
Balok memanjang	0,50	117,38	3	174,66	
Balok melintang	0,76	3,6513	41	113,77	
Plat kendaraan	17,53	117,38	1	2057,23	
Berat tunnel	35,95	117,38	1	4219,64	
Total sebelum dibebani beban hidup lalu lintas + ballast				6565,30	3,60
Pemberat/ballast				5310,16	
Total ballast + sebelum dibebani beban hidup lalu lintas				11875,47	1,99
Beban UDL	29,16	117,38	1	3422,80	
Beban KEL	123,48	3,6513	1	450,86	
Total setelah dibebani beban hidup lalu lintas				15749,13	1,50

Total Buoyancy	23623,70 kN
ratio (no traffic loads)	1,99
ratio (with traffic loads)	1,50

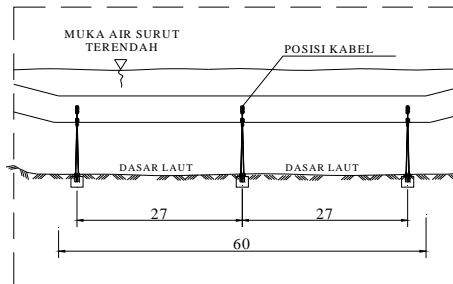
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa berat sendiri *prototype* SFT dan semua beban-beban yang berada di dalamnya telah memenuhi rasio yang telah ditentukan pada **Tabel 3.5**.

5.2.2.3 Kabel Tunnel SFT

Kabel merupakan bagian penting pada struktur *prototype* SFT. Desain kabel harus berada pada posisi yang tepat yaitu dapat mendukung struktur secara horizontal-vertikal, lendutan yang terjadi kecil, dan tegangan yang terjadi memenuhi ijin. Kabel harus memiliki kekakuan terhadap arah aksial dan kekakuan pada lentur untuk mendukung beban-beban yang bekerja pada badan SFT.

a. Desain Posisi Kabel SFT

Bentang perletakan kabel di desain dengan jarak yang tepat agar efek yang terjadi akibat gaya gelombang, arus, dan gaya apung tidak mempengaruhi fungsi dan kondisi struktur *tunnel* secara berlebihan. Desain posisi kabel menyesuaikan kondisi pengaku melintang besar. Dengan menyesuaikan kondisi tersebut, maka diperoleh bentang antar kabel 27 m lihat pada **Gambar 5.5**.



Gambar 5.5 Posisi kabel pada penampang memanjang *prototype* SFT

Jarak permukaan laut dengan permukaan atas *prototype* SFT adalah sebesar 5 m. Jarak permukaan bawah *prototype* SFT dengan *seabed* sebesar 10 m. Pulau yang dihubungkan berjarak

150 m, sedangkan bagian yang masuk ke dalam permukaan laut panjangnya 117,38 m.

b. Desain Kabel *Strand/Tendon*

Desain kabel memakai dari penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya (Sholeh 2013). Tipe kabel yang digunakan adalah tipe kabel *strand* “*uncoated seven wire stress relieved strand*” 270 ASTM-A416 sejumlah 58 *strand*.

Tabel 5.11 *Spesifikasi Material Kabel Strand*

Strand type		15 mm (0,6") ASTM A416-06 Grade 270
Nominal diameter d	(mm)	15,24
Nominal Cross section Ap	(mm ²)	140
Nominal mass M	(kg/m)	1,102
Nominal yield strength fp 0,1k	(Mpa)	1676
Nominal tensile strength fpk	(Mpa)	1860
Nominal Breaking load Fpk	(kN)	260,7
Initial Load	(kN)	26,1
Young's modulus	(Gpa)	approx. 195
Relaxation 3) after 1000 h 20° C and 0,7 x Fpk	(%)	max. 2,5

Sumber : *VSL Technical Data Characteristics Applications*

Tabel 5.12 *Initial Load Pada Kabel Berdasarkan Yield Strength Requirements*

Strand Designation No.	Nominal Diameter of strand mm (In)	Initial Load, kN (Ibf)	Minimum Load at 1% Extension, kN (Ibf)
			Low - Relaxation
Grade 1725 (250)			
9	9.5 (0.375)	8.9 (2000)	80.1 (18000)
11	11.1 (0.438)	12.0 (2700)	108.1 (24300)
13	12.7 (0.500)	16.0 (3600)	144.1 (32400)
15	15.2 (0.600)	24.0 (5400)	216.2 (48600)
Grade 1860 (270)			
9	9.53 (0.375)	10.2 (2300)	92.1 (20700)
11	11.11 (0.438)	13.8 (3100)	124.1 (27900)
13	12.7 (0.500)	18.4 (4130)	165.3 (37170)
15	15.24 (0.600)	26.1 (5860)	234.6 (52740)

Dari **tabel 5.11 – 5.12** tersebut, maka dapat diambil spesifikasi kabel strand yaitu :

- Sistem kawat untaian = *strand* ganda VSL
- Diameter nominal = 0,6 inch \approx 15,24 mm
- Luas penampang nominal = 140 mm²
- Modulus elastisitas = 1,9 x 10⁶ kg/cm²
- Tegangan putus (f_{pu}) = 18600 kg/cm² = 1860 MPa
- Kuat leleh (f_{py}) = 1676 Mpa

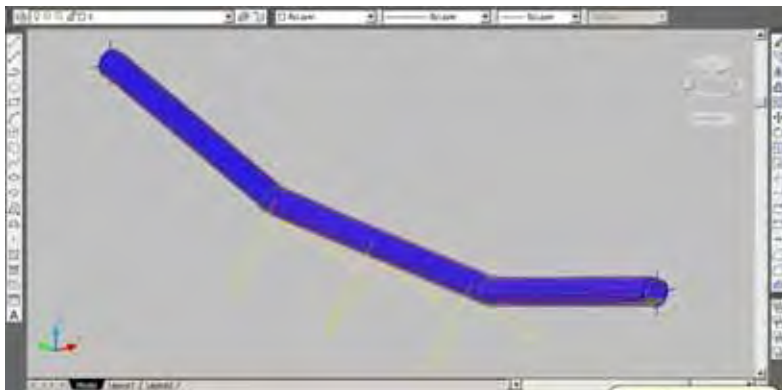
5.3 Pemodelan Struktur *Prototype* SFT

Pembuatan awal untuk pemodelan *prototype* SFT menggunakan *software* gambar Autocad dalam bentuk 3D. Penggambaran dilakukan bertahap dari membuat bagian struktur primer, struktur sekunder, dan konfigurasi kabel. Tiap bagian dibuat *layer*, kemudian dikelompokkan dalam grup berdasarkan elemen masing-masing. Unsur elemen yang dipakai yaitu berupa *frame* dan *shell*. Hal ini untuk memudahkan proses pembuatan dan pengecekan tiap elemen. Struktur balok baja dan kabel dimodelkan sebagai *line* atau berupa *frame* sedangkan elemen plat dan dinding baja dimodelkan berupa *3D face* atau berupa *shell*

Setelah penggambaran model *prototype* SFT selesai, maka dilakukan *import* ke *software* SAP2000. Perlu diperhatikan dalam proses *import* dari Autocad ke SAP2000 yaitu posisi titik aksis antar *software* harus dibuat sama untuk perletakkannya, yaitu pada koordinat 3D dengan aksis x,y,z sama dengan (0,0,0), sehingga titik pada masing-masing *software* sama.

Hasil penggambaran model *prototype* SFT dengan *software* Autocad dapat dilihat pada **Gambar 5.7**. Hasil model tersebut belum bisa menggambarkan variasi *buoyancy weight ratio*. Pemodelan variasi tersebut hanya dapat dilakukan menggunakan *software* analisis SAP2000. Parameter-parameter yang dianalisis terhadap model *prototype* SFT dengan SAP2000 yaitu kondisi

perletakan, gaya apung, dan konfigurasi posisi kabel. Parameter tersebut dapat dilihat pada **Tabel 3.5**.



Gambar 5.6 Hasil penggambaran model prototype SFT dengan Autocad dalam bentuk 3D

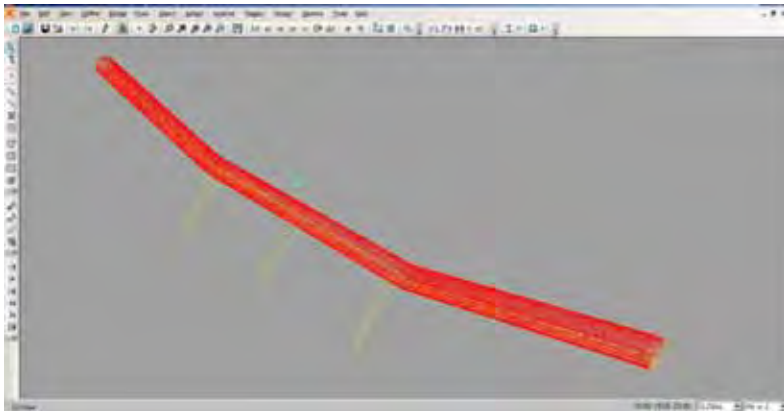
Pada pemodelan dengan SAP2000, tahap awal adalah menentukan *define section properties* model *prototype* SFT yang dapat dilihat pada **Tabel 5.13**.

Tabel 5.13 *Define Section Properties SFT*

Pelat Lantai	<i>Shell</i>
Dinding SFT	<i>Shell</i>
Kabel	<i>Frame</i>
Profil Baja	<i>Frame</i>

Kabel pada struktur SFT dimodelkan sebagai *frame* dan kekakuan kabel pada suatu struktur hanya akan mengalami gaya axial saja. Dengan mempertahankan kondisi itu, maka kabel akan dilakukan pemodelan *assign release*.

Pemberian *definisi properties material* pada SAP2000 diklasifikasikan berdasarkan mutu baja, plat dinding, kabel, dan profil baja. Define Material Properties prototype SFT dijelaskan pada **Tabel 5.14**.



Gambar 5.7 *Pemodelan prototype SFT dengan SAP2000*

Tabel 5.14 *Define material properties SFT*

Pelat Lantai	BetonFc50
Dinding SFT	BJ55
Kabel	A992fy50
Profil Baja	BJ55

5.3.1 Pemodelan Pembebanan

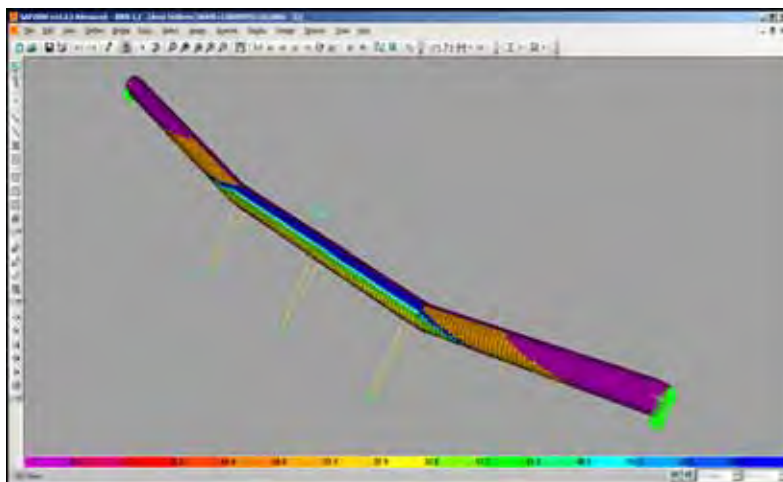
Pemodelan dilakukan dengan memasukkan analisa beban yang bekerja. Beban mati, beban hidup, beban hidrostatis, beban arus dan gelombang. Beban tersebut secara otomatis akan langsung dihitung oleh SAP2000.

Untuk beban gelombang yang terjadi pada *shell* tidak dapat dihitung secara otomatis oleh SAP2000, maka *input* beban gelombang harus dimasukkan secara manual. Sebelum melakukan *input*, struktur dibagi dahulu menjadi beberapa grup berdasarkan kedalaman *tunnel* pada arah sumbu global Z. Beban arus dan gelombang yang dimasukkan pada model *prototype* SFT dapat dilihat melalui **Tabel 5.15**.

Hasil *input* beban arus dan gelombang dengan pengelompokkan grup badan *tunnels* berdasarkan **Tabel 5.15** dapat dilihat pada **Gambar 5.8**.

Tabel 5.15 *Beban akibat gelombang+ arus yang diinputkan pada SAP secara manual*

<i>Group</i>	<i>Posisi koordinat z (m)</i>	<i>Jarak (m)</i>	<i>F_{w/c}</i>
Group 1	((0,0000)-(-2,0177))	2,0177	18,878 kN/m ²
Group 2	((-2,0177)-(-3,5934))	1,5757	22,308 kN/m ²
Group 3	((-3,5934)-(-5,0000))	1,4066	22,462 kN/m ²
Group 4	((-5,0000)-(-5,4775))	0,4775	60,513 kN/m ³
Group 5	((-5,4775)-(-6,0305))	0,553	48,092 kN/m ⁴
Group 6	((-6,0305)-(-6,7275))	0,697	36,226 kN/m ²
Group 7	((-6,7275)-(-7,5000))	0,7725	30,777 kN/m ²
Group 8	((-7,5000)-(-8,2725))	0,7725	29,488 kN/m ²
Group 9	((-8,2725)-(-8,9695))	0,697	31,323 kN/m ²
Group 10	((-8,9695)-(-9,5225))	0,553	37,766 kN/m ³
Group 11	((-9,5225)-(-10,000))	0,4775	41,773 kN/m ⁴

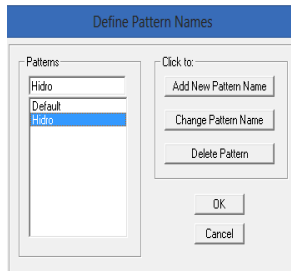


Gambar 5.8 *Hasil input beban arus dan gelombang secara manual berdasarkan pengelompokan grup pada dinding SFT*

Beban arus dan gelombang dimasukkan secara manual pada bagian dinding *tunnel*, dengan asumsi bahwa beban tersebut bekerja searah sesuai arah sumbu global X atau 0° .

Beban akibat tekanan hidrostatis dapat dimasukkan ke SAP2000 secara otomatis, kemudian beban tersebut dapat bekerja pada model *prototype* SFT. Tahapan yang dilakukan sebagai berikut :

1. Menentukan *joint pattern* yaitu *pattern* “Hidro” dengan tahapan, masuk menu “*define*” kemudian tentukan “*joint pattern*” yang selanjutnya menambahkan “Hidro” sebagai *joint pattern* yang baru.



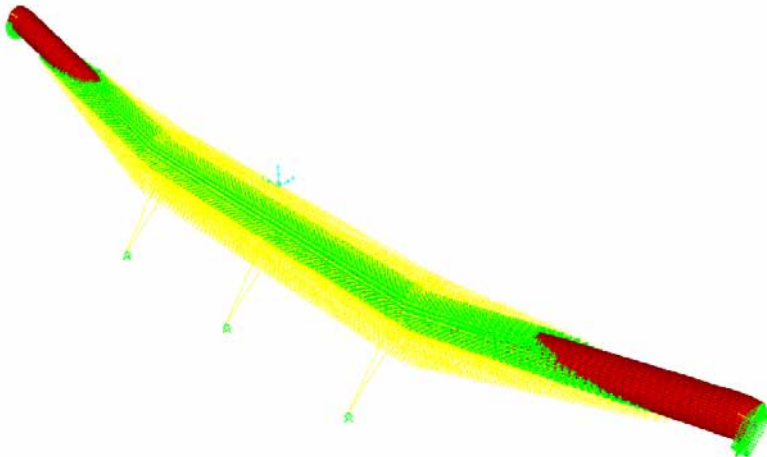
Gambar 5.9 Penentuan beban hidrosatis pada SAP2000

2. Bagian SFT yang berupa area struktur yang tenggelam dikelompokkan dengan memblok elemen tersebut, kemudian pilih menu “*assign*” dan pilih “*joint pattern*”. Kemudian memasukkan parameter dari kondisi perairan pada model. Selanjutnya menentukan *pattern data* dengan mengkondisikan “*Constant C*” diisi -1 dan yang lainnya di kondisikan nol, hal tersebut berdasarkan dari desain gambar yang dibuat dengan kondisi koordinatnya.



Gambar 5.10 Penentuan Kedalaman Berdasarkan Pengaruh Air Laut

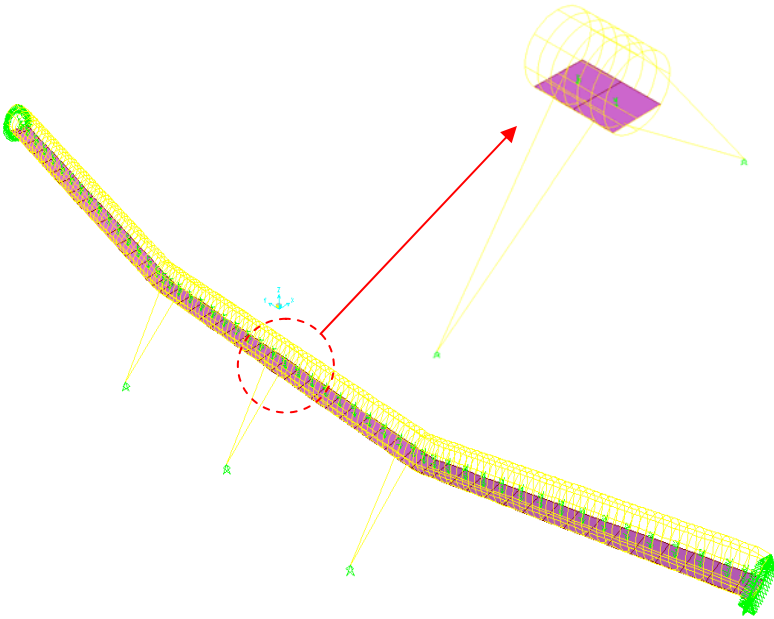
3. Kemudian tahap selanjutnya adalah dengan memblok kembali elemen tersebut, menentukan menu “assign” dan pilih “area loads” berupa “surface pressure”. Pada bagian kolom “Multiplier” dimasukkan berat jenis air yaitu 1025kg/m^3 . Setelah tahapan dilakukan, hasil input beban menjadi seperti **Gambar 5.11**.



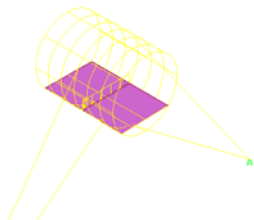
Gambar 5.11 Hasil Input Beban Hidrostatik

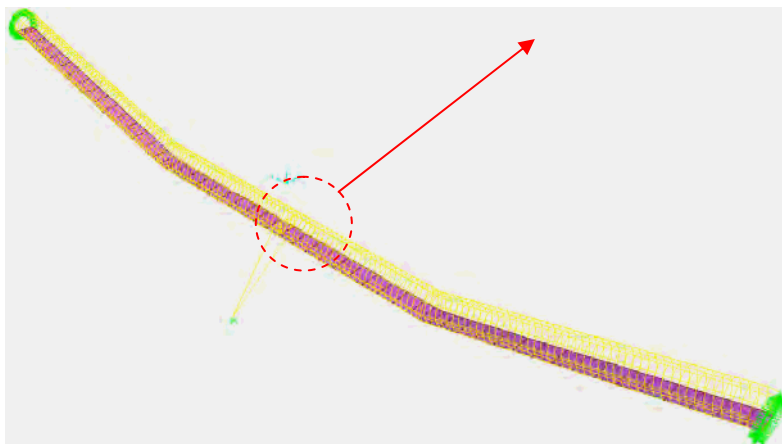
Beban hidrostatis yang telah dimasukkan secara otomatis termasuk sebagai gaya *buoyancy* karena selisih dari gaya ke atas dan ke bawah pada beban hidrostatis merupakan gaya *bouyancy*.

Beban lainnya adalah beban aspal dan beban bekisting masing-masing sebesar $1,32 \text{ kN/m}^2$ dan $0,5 \text{ kN/m}^2$. Beban tersebut akan di letakkan di pelat kendaraan sebagai beban *supporting load* dengan total beban $1,820 \text{ kN/m}$. Untuk beban hidup UDL sebesar $5,4 \text{ kN/m}^2$ yang juga diletakkan di pelat kendaraan dan beban KEL diletakkan di tengah bentang dengan nilai $123,48 \text{ kN/m}$. Untuk beban ballast didapat berdasarkan BWR yang digunakan.



Gambar 5.12 Hasil input beban aspal, bekisting dan liveUDL pada pelat lantai





Gambar 5.13 Hasil input live KEL pada tengah bentang

Beban-besan yang bekerja tersebut diklasifikasikan sebagai kombinasi pembebanan lihat **Tabel 5.15**. Beban dengan berbagai kombinasi yang digunakan dalam analisa struktur ini adalah kombinasi beban untuk mengetahui stabilitas struktur yaitu tanpa *loading factor*.

Tabel 5.16 Kombinasi Pembebanan

Combo 1 : 1D+1H+1W	
Combo 2 : 1D+1H+1W+1L	
Keterangan :	
D =	<i>Dead Load + Supporting Load</i>
H =	<i>Hydrostatic Pressure</i>
W =	<i>Wave Load</i>
L =	<i>Live Load</i>

Note: Supporting load = Aspal + Bekisting

Variasi pembebanan tersebut tidak menggunakan faktor pembebanan, hal ini dikarenakan adanya tahapan kontrol stabilitas dari struktur SFT berdasarkan API RP 2A-WSD. Pembebanan dengan berbagai kondisi beban yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 5.17 *Pembebanan model*

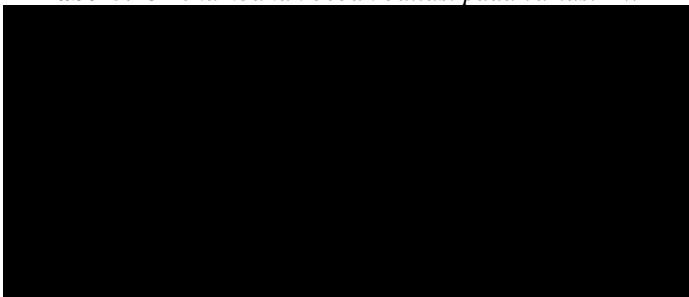
<i>Load Case Name</i>	<i>Load Case Type</i>
<i>Modal</i>	<i>Modal</i>
<i>Dead Load</i>	<i>Linear static</i>
<i>Supporting Load</i>	<i>Linear static</i>
<i>Live</i>	<i>Linear static</i>
<i>Hidrostatic</i>	<i>Linear static</i>
<i>Wave Manual</i>	<i>Linear static</i>

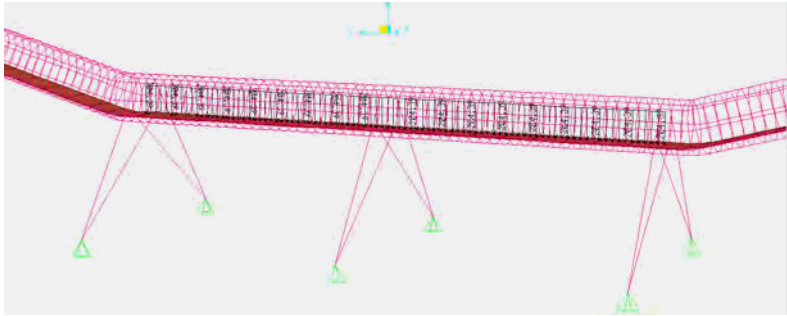
5.3.2 Pemodelan BWR

BWR pada pemodelan *prototype* SFT dibuat beberapa macam variasi berdasarkan Tabel 3.5. Perubahan variasi BWR dilakukan dengan penambahan beban ballast pada badan *tunnels* yang tenggelam arah horisontal. Penambahan beban ballast berdasarkan **Persamaan 3.1** dapat dilihat pada **Tabel 5.18**.

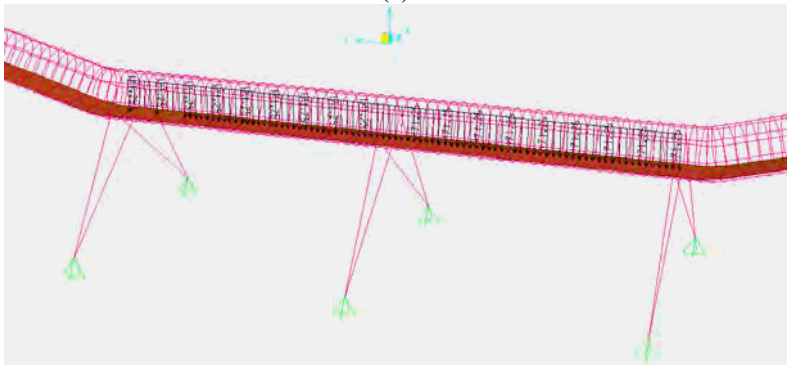
Hasil analisis variasi BWR tersebut dibandingkan dan dipilih rasio yang efektif dengan mempertimbangkan gaya yang terjadi pada kabel, badan *tunnels*, dan defleksi. Bentuk pemodelan variasi BWR dapat dilihat pada **Gambar 5.15**.

Tabel 5.18 *Penambahan beban ballast pada variasi BWR*

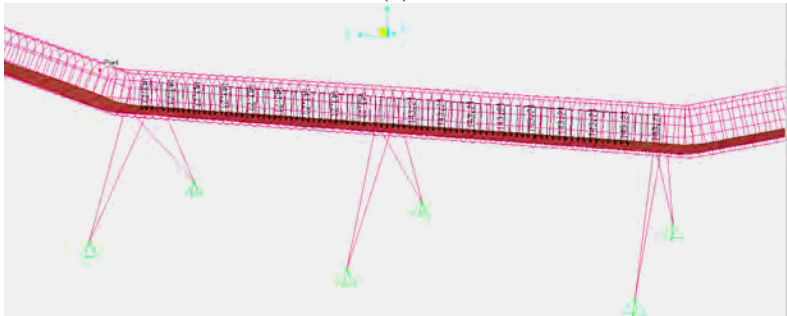




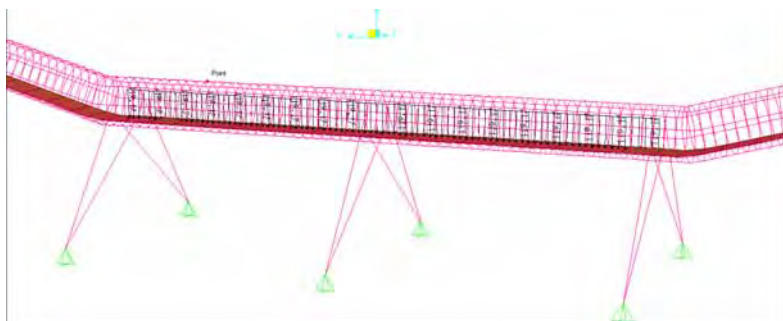
(a)



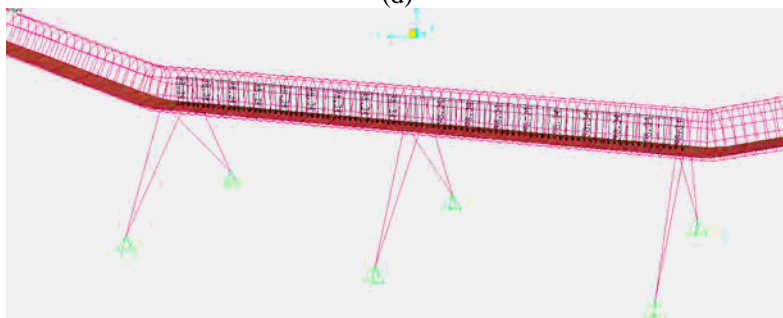
(b)



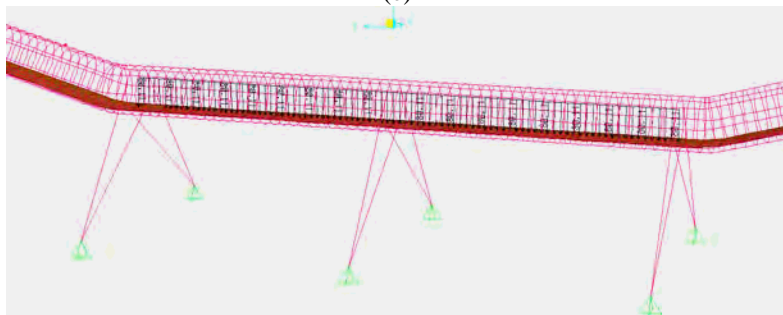
(c)



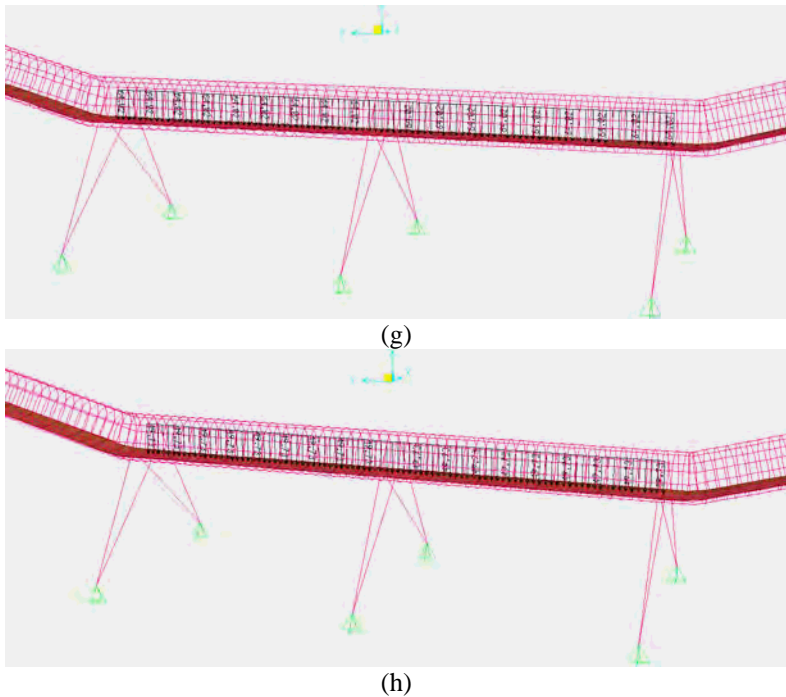
(d)



(e)



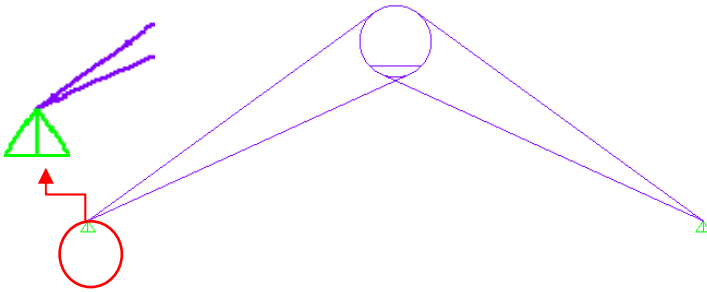
(f)



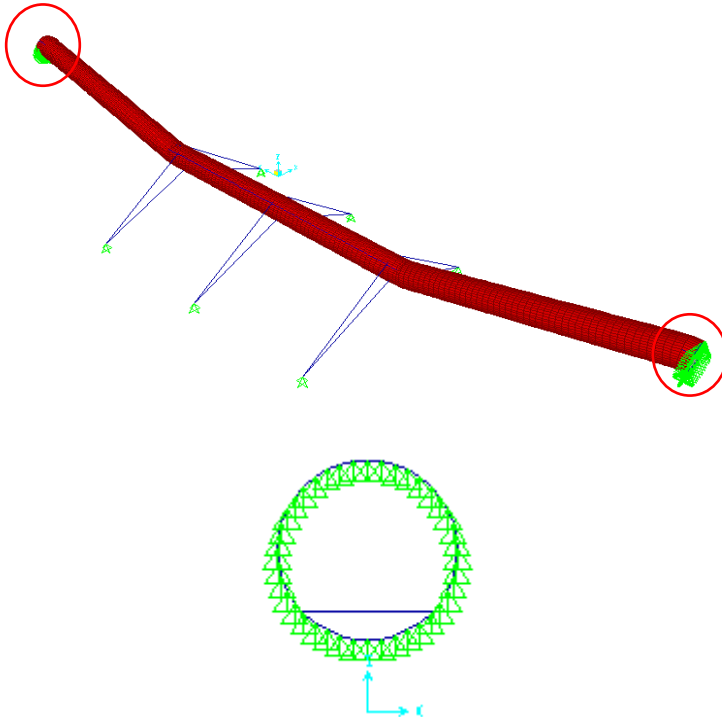
Gambar 5.14 Variasi BWR Dengan Penambahan Beban Ballast
 (a) BWR 1,1 (b) BWR 1,2 (c) BWR 1,3 (d) BWR 1,4
 (e) BWR 1,5 (f) BWR 1,6 (g) BWR 1,7 (h) BWR 1,8

5.3.3 Pemodelan Perletakan

Perletakan dimodelkan kedalam dua bagian yaitu perletakan pada kabel dan perletakan pada struktur *tunnel*. Perletakan pada kebel ditetapkan sebagai sendi. Hal ini dipertimbangkan karena kondisi struktur kabel berada pada *seabed* yang terpengaruh arus dan gelombang laut serta dipengaruhi oleh pergerakan *tunnel*. Perletakan pada struktur yang pada konfigurasi ini digunakan sendi-sendi. Berikut perletakan yang dimodelkan pada SAP2000.



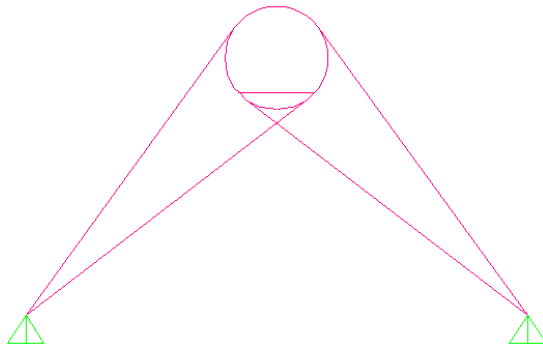
Gambar 5.15 Perletakan sendi pada semua konfigurasi kabel



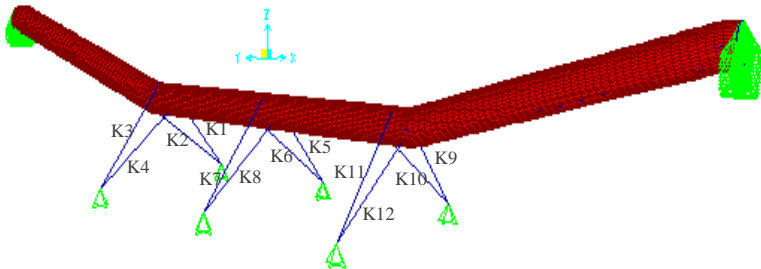
Gambar 5.16 Perletakan Ujung-ujung tunnel

5.3.4 Pemodelan Kabel

Pemodelan kabel digunakan tipe C dengan sudut 36° untuk semua pemodelan variasi BWR. Penentuan jenis kabel di SAP2000 dimodelkan berupa *frame* yang di *release* yang dapat dilihat pada **gambar 5.17** dengan pengaturan penomoran pada kabel seperti terlihat pada **gambar 5.18**.



Gambar 5.17 Pemodelan konfigurasi kabel tipe C sudut 36° pada SAP2000



Gambar 5.18 Penomoran kabel-kabel

“ HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN “

BAB VI

ANALISA PEMODELAN

6.1 Umum

Model *prototype* SFT terdiri dari dua bagian yaitu bagian bawah yang tenggelam (terkena pengaruh air laut) dan bagian atas yang menjadi perletakan dengan konstruksi langsung pada tanah (tidak terkena pengaruh air laut). Analisa lebih diutamakan akibat pengaruh air laut yang terjadi pada struktur *tunnel* yaitu seberapa besar efek yang diakibatkan oleh arus dan gelombang. Hal ini karena gaya yang ditimbulkan berpengaruh besar pada struktur secara keseluruhan dan mempengaruhi pemodelan lainnya.

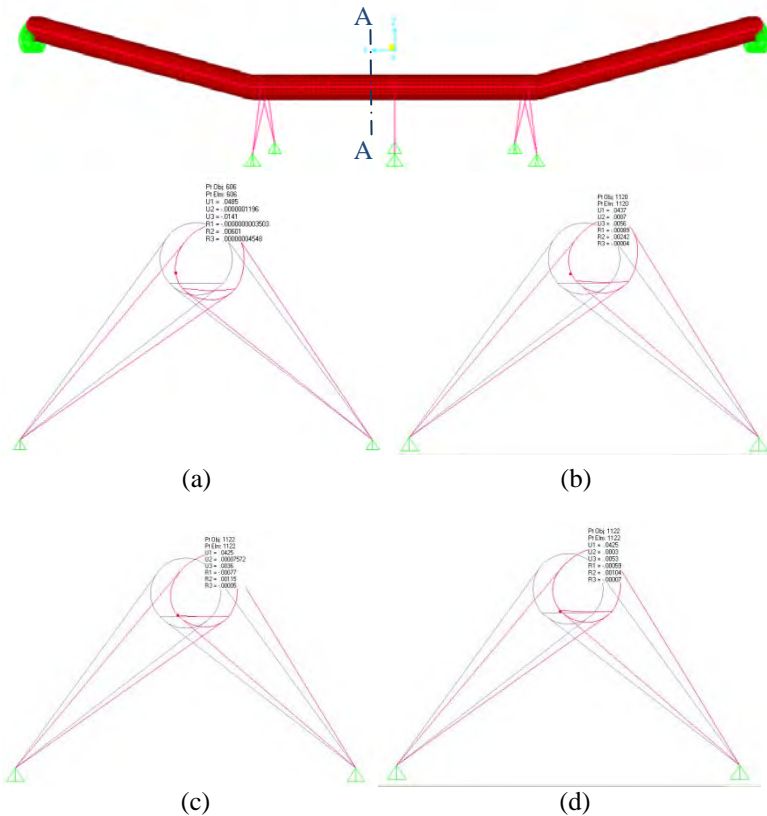
Seluruh data pemodelan sesuai perencanaan *prototype* yang nantinya akan diaplikasikan di kepulauan seribu. Dengan data-data tersebut, diharapkan pemodelan memiliki perilaku yang sama dengan model uji dilaboratorium. Sehingga analisa numerik bisa digunakan sebagai dasar penelitian selanjutnya.

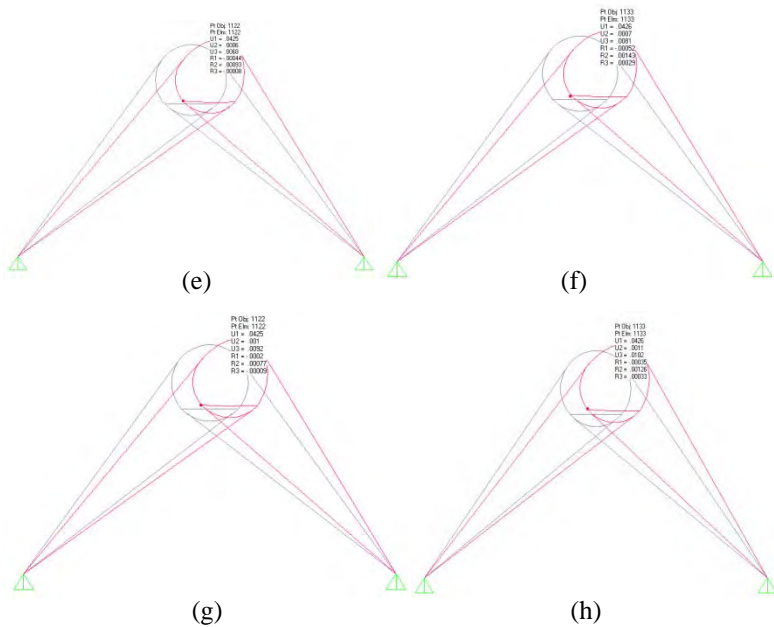
6.2 Analisa Pengaruh Pembebanan

Pembagian beban sesuai **Sub bab 5.3.1**, beban dikelompokkan berdasarkan beberapa kombinasi yang dipengaruhi kedalaman. Pengaruh tiap kedalaman berbeda sesuai pengelompokan yang dibuat, karena pengaruh gelombang semakin atas yakni mendekati permukaan semakin membesar. Berikut pengaruh struktur terhadap kondisi kabel di masing-masing kondisi. Kondisi yang diambil adalah akibat kombinasi maksimum, yakni akibat $D+H+W+L$. Dari pembebanan maksimum tersebut dilihat dampak terhadap struktur secara keseluruhan.

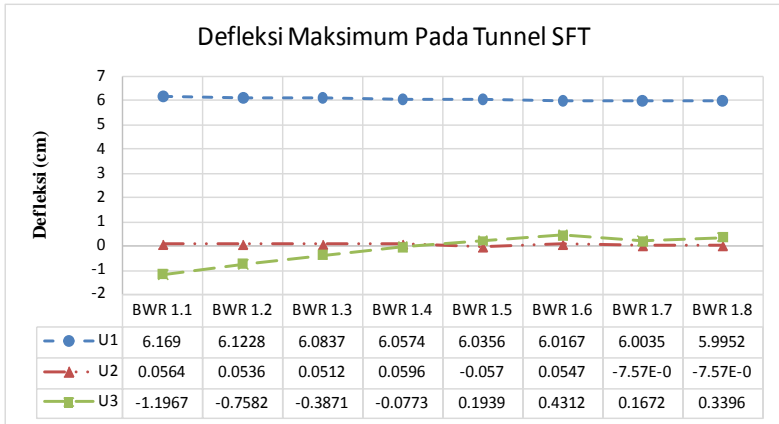
6.2.1 Defleksi Tunnel

Nilai defleksi akan ditinjau akan dipengaruhi oleh berbagai tipe perletakan ujung yang dimodelkan dan diambil nilai yang maksimum dari kombinasi beban yang digunakan. Defleksi yang terjadi dapat dilihat pada **gambar 6.1**.





Gambar 6.1 Defleksi Maksimum Struktur Dengan Variasi BWR;
 (a) BWR 1,1 (b) BWR 1,2 (c) BWR 1,3 (d) BWR 1,4
 (e) BWR 1,5 (f) BWR 1,6 (g) BWR 1,7 (h) BWR 1,8



Gambar 6.1 Defleksi Maksimum Struktur Berdasarkan Variasi BWR

Pada gambar diatas menjelaskan nilai defleksi U1 berdasarkan sumbu global X, nilai defleksi U2 berdasarkan sumbu global Y, dan nilai defleksi U3 berdasarkan sumbu global Z. Hasil grafik menunjukkan nilai defleksi U1 lebih besar untuk mempengaruhi struktur, hal ini dikarenakan efek dari beban gelombang sejajar dengan sumbu U1. Pada defleksi U3 mempunyai pengaruh terhadap BWR, maka nilai defleksi U3 di pilih yang mendekati 0 (nol). Berdasarkan hasil defleksi tersebut, nilai BWR 1,3-1,4 memiliki nilai defleksi mendekati nol, namun karena persyaratan yang ditetapkan oleh Mazzolani (2007) bahwa nilai rasio sekitar 1,2-1,3 maka dipilih nilai BWR 1,3 dengan nilai defleksi sebesar -0,3871 cm.

6.2.2 Gaya Axial Pada Kabel

Masing-masing BWR akan memberikan gaya axial yang berbeda-beda pula, dimana dari gaya yang dihasilkan tersebut akan dipilih BWR yang efektif. Kabel yang memiliki gaya axial yang terkecil merupakan kabel dengan perletakan ujung-ujung yang efektif. Untuk penomoran dari masing-masing kabel disesuaikan seperti pada **gambar 5.20**, dimana penomoran ini berlaku untuk setiap kondisi perletakan ujung-ujung yang

diujikan. Nilai dari gaya axial kabel tersebut disajikan dalam bentuk **tabel 6.1** dan berikut tegangan axial hasil *output* dari analisa SAP2000 sesuai dengan berbagai perletakan ujung-ujung *tunnel* diperlihatkan pada **gambar 6.2**.

Tabel 6.1 Gaya Axial Maksimum Pada Kabel Dengan Berbagai Variasi BWR

VARIASI BWR	GAYA AKSIAL (ton)											
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
BWR 1.1	-223.994	-311.293	295.025	292.471	-361.005	-409.851	214.957	215.989	-243.098	-311.315	295.043	292.494
BWR 1.2	-230.240	-298.482	307.863	305.282	-331.596	-383.255	244.366	242.586	-230.260	-298.504	307.881	305.305
BWR 1.3	-219.378	-287.642	318.725	316.122	-306.712	-360.750	269.250	265.091	-219.397	-287.664	318.744	316.145
BWR 1.4	-210.067	-278.350	328.036	325.414	-285.382	-341.460	290.580	284.381	-210.087	-278.373	328.055	325.437
BWR 1.5	-201.997	-270.298	336.105	333.466	-266.897	-324.742	309.065	301.099	-202.017	-270.320	336.124	333.489
BWR 1.6	-194.937	-263.252	343.166	340.512	-250.722	-310.113	325.240	315.727	-194.956	-263.274	343.185	340.535
BWR 1.7	-188.707	-257.035	349.396	346.730	-236.450	-297.206	339.512	328.635	-188.726	-257.057	349.415	346.752
BWR 1.8	-183.169	-251.508	354.934	352.256	-223.764	-285.733	352.198	340.108	-183.189	-251.531	354.953	352.279

Keterangan :

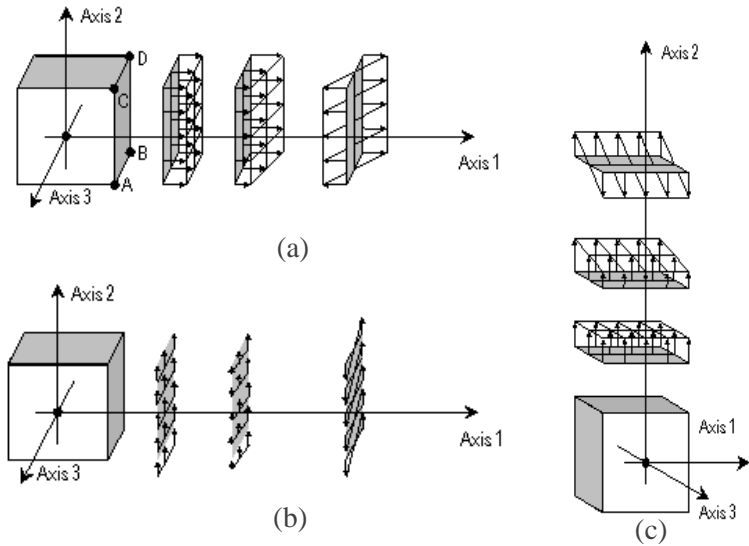
nilai min (-) yang terjadi pada gaya axial kabel menandakan gaya yang terjadi adalah tekan.

Berdasarkan **tabel 6.1**, kondisi ketika *tunnel* diberi BWR 1,3 dengan kedua ujung perletakan sendi akan menghasilkan gaya pada kabel yang lebih kecil dibandingkan dengan BWR 1,4-1,8. Selisih nilai antara BWR 1,1 sampai dengan 1,8 tidak terlalu besar, namun berdasarkan kriteria desain rasio maka dipilih nilai BWR 1,3 sebagai nilai efektif.

6.2.3 Tegangan Pada Tunnel

Selain defleksi *tunnel* dan gaya axial pada kabel, output tegangan yang terjadi pada *tunnel* juga ditinjau berdasarkan pengaruh sumbu. Tegangan pada dinding *tunnel* akan diambil sesuai aksis S11, S22, dan S12 yang dibandingkan untuk mendapatkan tegangan yang terkecil dengan berbagai perletakan ujung-ujung *tunnel*. Aksis S11, S22, dan S12 dapat dilihat pada

gambar 6.3. Untuk tegangan yang terjadi disajikan pada **tabel 6.2.**



Gambar 6.3 Aksis stresses pada tunnel (a) S_{11} , (b) S_{12} , (c) S_{22}

Tabel 6.2 Tegangan pada dinding tunnel berdasarkan Variasi BWR

No	Variasi BWR	Max di S11							Max di S22							Max di S12			
		Kombinasi	Elemen SAP	Joint	S11Top (kN/m2)	S22Top (kN/m2)	S12Top (kN/m2)	Kombinasi	Elemen SAP	Joint	S11Top (kN/m2)	S22Top (kN/m2)	S12Top (kN/m2)	Kombinasi	Elemen SAP	Joint	S11Top (kN/m2)	S22Top (kN/m2)	S12Top (kN/m2)
1	I.1	D+H+H+H	4911	597	-4890.3	37075.2	-13039.2	D+H+H	5124	600	-40226.13	-101018.99	-2025.54	D+H+H	5019	600	-7836.31	7818.77	-20779.6
		D+H+H+L	5559	610	54305.41	103015.6	25471.42	D+H+H+L	5559	610	54305.41	103015.6	25471.42	D+H+H+L	5559	610	54305.41	103015.6	25471.42
		D+H+W	2353	4364	-4329.7	-33958.3	19194.79	D+H+W	5074	4367	-31466.29	-107586.46	24761.66	D+H+W	4969	4367	10394.95	23815.91	27142.11
		D+H+W+L	5513	4377	27183.15	70486.36	-20261.81	D+H+W+L	5513	4377	27183.15	70486.36	-20261.81	D+H+W+L	2433	4376	12797.17	23189.97	-20901.27
		D+H+W	4911	597	-5067.6	-38794.8	-14262.3	D+H+W	5124	600	-40954.41	-105191.33	-22393.22	D+H+W	5019	600	-4982.68	15647.19	-23162.17
2	I.2	D+H+H+H	5559	610	49026.84	95261.75	23959.98	D+H+H+H	5559	610	50026.84	95261.75	23959.98	D+H+H+H	5559	610	50026.84	95261.75	23959.98
		D+H+H+L	2353	4364	-4693.4	-35065.6	20228.2	D+H+H+L	5074	4367	-3851.72	-109035.42	26977.68	D+H+H+L	4969	4367	9690.71	36364.81	-29173.9
		D+H+W	5513	4377	25757.77	66254.17	-18864.3	D+H+W	5513	4377	25757.77	66254.17	-18864.3	D+H+W	2433	4376	11904.57	23844.14	-19324.27
		D+H+W+L	5513	4377	25757.77	66254.17	-18864.3	D+H+W+L	5513	4377	25757.77	66254.17	-18864.3	D+H+W+L	2433	4376	11904.57	23844.14	-19324.27
		D+H+W	4911	597	-5217.7	-39742.3	-15297.3	D+H+W	5124	600	-41562.19	-108721.78	-24007.71	D+H+W	5019	600	-25668.07	22271.24	-25178.19
3	I.3	D+H+H+H	5559	610	46066.51	88700.79	22681.07	D+H+H+H	5559	610	46066.51	88700.79	22681.07	D+H+H+H	5559	610	46066.51	88700.79	22681.07
		D+H+H+L	2353	4364	-48350.1	-36002.6	21102.66	D+H+H+L	5074	4367	-35000.92	-110261.46	28852.78	D+H+H+L	4969	4367	9094.82	33963.42	30881.11
		D+H+W	5513	4377	24551.67	62673.09	-17681.7	D+H+W	5513	4377	24551.67	62673.09	-17681.7	D+H+W	2433	4376	11149.29	24003.51	-17989.87
		D+H+W+L	5513	4377	24551.67	62673.09	-17681.7	D+H+W+L	5513	4377	24551.67	62673.09	-17681.7	D+H+W+L	2433	4376	11149.29	24003.51	-17989.87
		D+H+W	4911	597	-5463.2	-40554.3	-16184.4	D+H+W	5124	600	-42083.13	-117478.77	-26129.28	D+H+W	5019	600	-498.41	27948.99	-26906.2
4	I.4	D+H+H+H	5559	610	43303.37	83077.11	21584.85	D+H+H+H	5559	610	43303.37	83077.11	21584.85	D+H+H+H	5559	610	43303.37	83077.11	21584.85
		D+H+H+L	2353	4364	-50835.2	-36805.8	21852.18	D+H+H+L	5074	4367	-37085.96	-111312.35	30460	D+H+H+L	4969	4367	8584.05	41935.66	32366.71
		D+H+W	5513	4377	23517.88	59603.59	-18668.2	D+H+W	5513	4377	23517.88	59603.59	-18668.2	D+H+W	2433	4357	18576.84	29551.81	-17014.26
		D+H+W+L	5513	4377	23517.88	59603.59	-18668.2	D+H+W+L	5513	4377	23517.88	59603.59	-18668.2	D+H+W+L	2433	4357	18576.84	29551.81	-17014.26
		D+H+W	4911	597	-54577.9	-41783.1	-16953.2	D+H+W	5124	600	-43534.64	-114370.49	-27621.31	D+H+W	5019	600	1295.3	32867.7	38403.82
5	I.5	D+H+H+H	5559	610	40033.99	78203.25	20834.8	D+H+H+H	5559	610	40613.99	78203.25	20834.8	D+H+H+H	5559	610	40613.99	78203.25	20834.8
		D+H+H+L	2353	4364	-52055.6	-37501.8	22501.77	D+H+H+L	5074	4367	-34031.35	-109003.86	29852.92	D+H+H+L	4969	4367	8141.39	44164.93	33943.83
		D+H+W	5513	4377	22821.92	56943.35	-15789.7	D+H+W	5513	4377	22821.92	56943.35	-15789.7	D+H+W	2433	4357	17825.69	162628	-16700.04
		D+H+W+L	5513	4377	22821.92	56943.35	-15789.7	D+H+W+L	5513	4377	22821.92	56943.35	-15789.7	D+H+W+L	2433	4357	17825.69	162628	-16700.04
		D+H+W	4911	597	-5553.3	-41873.9	-17625.9	D+H+W	5124	600	-42929.69	-116665.28	-28926.83	D+H+W	5019	600	2864.8	37175.35	-29714.23
6	I.6	D+H+H+H	5559	610	38460.78	73938.62	19803.51	D+H+H+H	5559	610	38260.78	73938.62	19803.51	D+H+H+H	5559	610	38260.78	73938.62	19803.51
		D+H+H+L	2353	4364	-5356.1	-38110.9	23070.15	D+H+H+L	5074	4367	-39661.64	-113020.05	33071.75	D+H+H+L	4969	4367	7754.06	46115.56	34761.32
		D+H+W	5513	4377	21837.96	54615.65	-15021.1	D+H+W	5513	4377	21837.96	54615.65	-15021.1	D+H+W	2433	4357	17166.68	81294	-15431.34
		D+H+W+L	5513	4377	21837.96	54615.65	-15021.1	D+H+W+L	5513	4377	21837.96	54615.65	-15021.1	D+H+W+L	2433	4357	17166.68	81294	-15431.34
		D+H+W	4911	597	-56414	-42417.3	-18219.5	D+H+W	5124	600	-43278.27	-118690.09	-30070.76	D+H+W	5019	600	4246.65	40974.44	-30870.42
7	I.7	D+H+H+H	5559	610	36184.41	70175.72	19070.02	D+H+H+H	5559	610	36184.41	70175.72	19070.02	D+H+H+H	5559	610	36184.41	70175.72	19070.02
		D+H+H+L	2353	4364	-54680.2	-38648.3	23571.67	D+H+H+L	5074	4367	-40727.21	-113732.22	34413.7	D+H+H+L	4969	4367	7413.28	47826.63	35247.33
		D+H+W	5513	4377	21486.23	52561.79	-14342.8	D+H+W	5513	4377	21486.23	52561.79	-14342.8	D+H+W	2433	4357	16585.21	9528	-14779.54
		D+H+W+L	5513	4377	21486.23	52561.79	-14342.8	D+H+W+L	5513	4377	21486.23	52561.79	-14342.8	D+H+W+L	2433	4357	16585.21	9528	-14779.54
		D+H+W	4911	597	-57179	-42900.3	-18747.1	D+H+W	5124	600	-43588.12	-120489.93	-31102.7	D+H+W	5019	600	5480.63	44351.4	-31898.25
8	I.8	D+H+H+H	5559	610	34338.75	66830.92	18416.02	D+H+H+H	5559	610	34338.75	66830.92	18416.02	D+H+H+H	5559	610	34338.75	66830.92	18416.02
		D+H+H+L	2353	4364	-50606.9	-39126	24017.46	D+H+H+L	5074	4367	-41669.94	-114348.26	35103.1	D+H+H+L	4969	4367	7108.5	49366.57	36623.79
		D+H+W	5513	4377	20531.36	50736.14	-13740	D+H+W	5513	4377	20531.36	50736.14	-13740	D+H+W	2433	4357	16068.34	-5426.35	-44200.17
		D+H+W+L	5513	4377	20531.36	50736.14	-13740	D+H+W+L	5513	4377	20531.36	50736.14	-13740	D+H+W+L	2433	4357	16068.34	-5426.35	-44200.17
		D+H+W	4911	597	-57179	-42900.3	-18747.1	D+H+W	5124	600	-43588.12	-120489.93	-31102.7	D+H+W	5019	600	5480.63	44351.4	-31898.25

6.3 Kontrol Struktur

Pada kontrol ditetapkan kondisi kabel C (*sudut 36°*) perletakan sendi-sendi dengan parameter BWR yang diubah pada beban ballast yang diletakkan di badan tunnel tenggelam. Kontrol dilakukan untuk mengetahui kondisi tegangan kritis yang terjadi pada struktur. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui perilaku dari struktur, sehingga bisa dibuat perencanaan lebih detail pula.

Tegangan diklasifikasikan berdasarkan variasi BWR yang dijelaskan sebelumnya, kondisi konfigurasi kabel, dan jenis perletakan yang mempengaruhi kinerja struktur. Pada bagian selanjutnya akan di analisa lebih lanjut mengenai konfigurasi efektif dari masing-masing parameter.

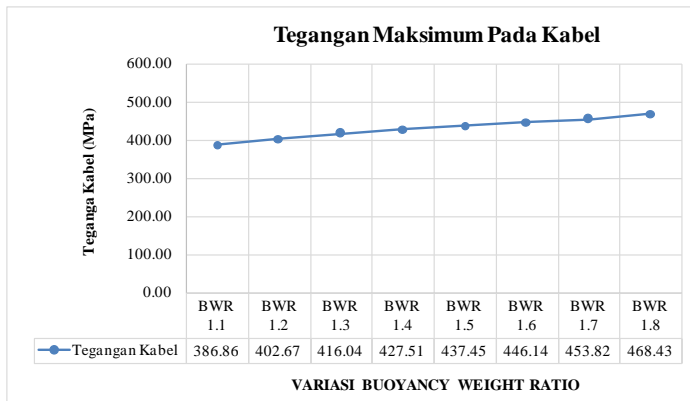
6.3.1 Berdasarkan BWR

Analisa kabel berdasarkan variasi BWR yang telah disajikan pada **tabel 6.1**, diklasifikasikan kembali untuk dibandingkan dengan tegangan ijin kabel (**tabel 5.11**). Pengklasifikasian diambil berdasarkan tegangan maksimum kabel yang terjadi pada berbagai variasi BWR sesuai **tabel 6.1**.

Berdasarkan analisa ini dapat diketahui pula perbedaan gaya yang terjadi berdasarkan BWR *tunnel* mulai dari gaya minimal hingga maksimal kabel. Dapat pula diketahui berbagai pilihan kondisi variasi BWR yang mungkin diaplikasikan sebagai konfigurasi. Pada dinding *tunnel* tegangan yang terjadi sesuai **tabel 6.2** akan dilakukan kontrol, sehingga dinding *tunnel* yang direncanakan mampu menahan beban yang terjadi.

Tabel 6.3 Kontrol tegangan maksimum pada kabel

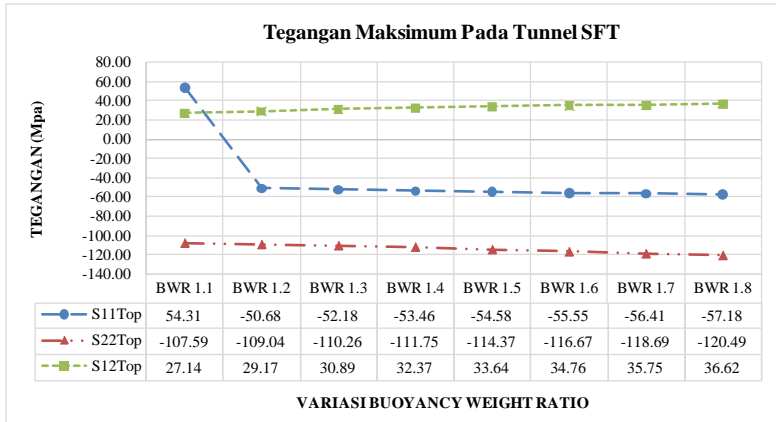
BWR	Axial Max (N)	Luas Kabel (mm ²)	Tegangan Kabel (N/mm ²)	Tegangan Ijin (N/mm ²)	Keterangan
1.1	3141276.00	8120	386.86	1676	OK
1.2	3269653.00	8120	402.67	1676	OK
1.3	3378280.00	8120	416.04	1676	OK
1.4	3471388.00	8120	427.51	1676	OK
1.5	3378280.00	8120	416.04	1676	OK
1.6	3622689.00	8120	446.14	1676	OK
1.7	3684990.00	8120	453.82	1676	OK
1.8	3803692.00	8120	468.43	1676	OK



Gambar 6.4 Tegangan maksimum pada kabel

Tabel 6.3 Kontrol tegangan maksimum pada badan SFT

NO	Variasi BWR	Elemen Stresses	Tegangan (Mpa)	Tegangan Ijin (Mpa)	Keterangan
1	BWR 1.1	S11	54.31	366	OK
		S22	-107.59	366	OK
		S12	27.14	220	OK
2	BWR 1.2	S11	-50.68	366	OK
		S22	-109.04	366	OK
		S12	29.17	220	OK
3	BWR 1.3	S11	-52.18	366	OK
		S22	-110.26	366	OK
		S12	30.89	220	OK
4	BWR 1.4	S11	-53.46	366	OK
		S22	-111.75	366	OK
		S12	32.37	220	OK
5	BWR 1.5	S11	-54.58	366	OK
		S22	-114.37	366	OK
		S12	33.64	220	OK
6	BWR 1.6	S11	-55.55	366	OK
		S22	-116.67	366	OK
		S12	34.76	220	OK
7	BWR 1.7	S11	-56.41	366	OK
		S22	-118.69	366	OK
		S12	35.75	220	OK
8	BWR 1.8	S11	-57.18	366	OK
		S22	-120.49	366	OK
		S12	36.62	220	OK



Gambar 6.5 Tegangan maksimum pada badan tunnel

BAB VII

ANALISA PEMODELAN EFEKTIF STRUKTUR

7.1 Efektif Struktur

Pemodelan efektif struktur *prototype* SFT merupakan gabungan berbagai hasil analisa berdasarkan tiga parameter yaitu variasi BWR, kondisi perletakan ujung-ujung *tunnel*, dan konfigurasi posisi kabel. Analisa ketiga parameter tersebut dilakukan secara terpisah untuk mengetahui keluaran efektif pada struktur dengan parameter tinjauan masing-masing sesuai **Tabel 3.7**. Setelah analisa dan kontrol dilakukan pada masing-masing parameter struktur, kemudian dimodelkan ulang dengan mengambil kondisi efektif pada setiap parameter. Berdasarkan analisa tersebut, diharapkan akan menghasilkan gaya yang optimum pada struktur secara keseluruhan.

7.1.1 Variasi BWR

BWR adalah pengaruh akibat gaya angkat keatas terhadap berat struktur *tunnel*. Pada analisa variasi BWR yang dilakukan dicari hasil gaya positif terjadi di kabel dan hasil tegangan yang terjadi di struktur *tunnel* secara keseluruhan kecil. Hasil analisa didapat nilai BWR terhadap berat struktur *tunnel* adalah 1.3.

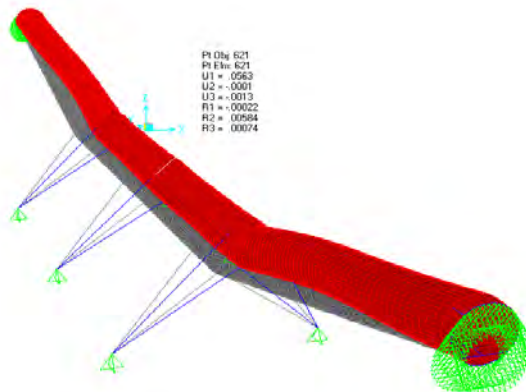
Pemilihan nilai BWR terhadap berat struktur harus mempertimbangkan kondisi pelaksanaan nantinya. Dalam hal ini mempertimbangkan penempatan dari *ballast* yang digunakan. Selain itu, kriteria yang ditentukan oleh Mazzolani (2007), yaitu rasio perbandingan antara BWR dengan berat struktur *tunnel* sekitar 1,2-1,3. Berdasarkan pertimbangan itulah diambil nilai BWR 1,3.

Dengan nilai BWR 1,3, maka dilakukan pemodelan ulang *prototype* SFT sebagai parameter efektif dari variasi BWR. Hasil perbandingan antara berat struktur dengan BWR sesuai **Tabel**

7.1 dan kondisi BWR optimum terhadap pengaruh tegangan tunnel dapat dilihat pada **Gambar 7.4**.

Tabel 7.1 Kondisi efektif berdasarkan tinjauan BWR 1,3

PARAMETER BWR		Tegangan (Mpa)	Tegangan ijin (Mpa)	Keterangan
Posisi Kabel	C	416.04	1676	OK
Perletakan Ujung	S-S			
BWR	1,3			
Tegangan Tunnel	S11	-52.177	366	OK
	S22	-110.261	366	OK
	S12	88.701	366	OK



Gambar 7.1 SFT Berdasarkan Kondisi BWR Efektif 1,3

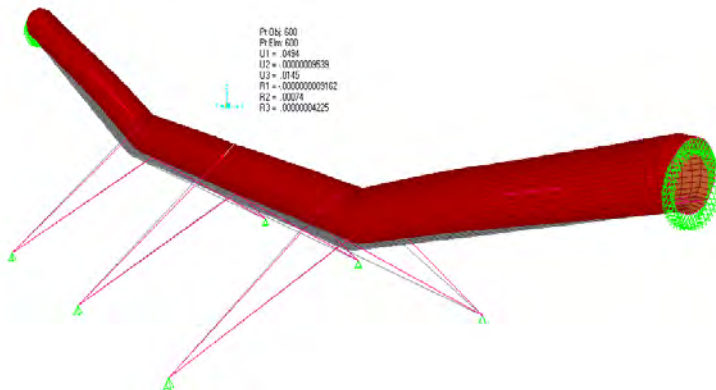
7.1.2 Konfigurasi Posisi Kabel

Berdasarkan analisa yang dilakukan (Komara, 2014). Kondisi posisi kabel A yang dikategorikan sebagai kabel yang efektif. Dari analisa tersebut didapat kabel yang mampu menahan struktur dengan baik *Output* gaya yang didapat terhadap penampang struktur yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan konfigurasi lain. Hasil analisa berupa gaya dan tegangan yang

terjadi pada struktur dari konfigurasi posisi kabel A dapat dilihat pada **Tabel 7.2**.

Tabel 7.2 Kondisi Efektif Berdasarkan Konfigurasi Posisi Kabel A

PARAMETER KABEL		Tegangan (Mpa)	Tegangan ijin (Mpa)	Keterangan
Posisi Kabel	A	318.61	1676	OK
Perletakan Ujung	S-S			
BWR	1,5			
Tegangan Tunnel	S11	-42.299	366	OK
	S22	-91.757	366	OK
	S12	31.282	366	OK



Gambar 7.2 SFT berdasarkan konfigurasi posisi kabel efektif

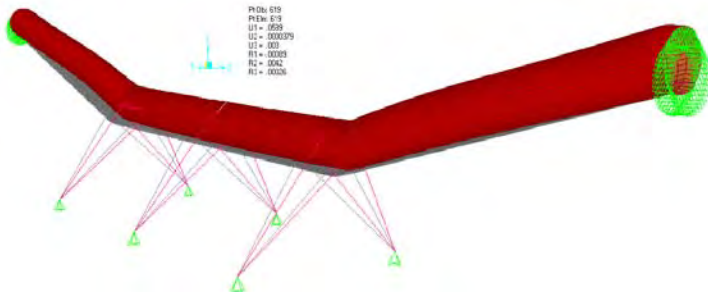
7.1.3 Kondisi Perletakan

Berdasarkan analisa yang dilakukan (Wahyudi, 2014) dengan berbagai tipe perletakan ujung-ujung *tunnel*, maka didapatkan kondisi perletakan efektif yaitu dengan kondisi perletakan sendi-sendi (**S-S**). Kondisi tersebut mampu menahan struktur dengan baik. Hasil tegangan dan gaya yang terjadi

terhadap penampang struktur relatif lebih baik dan stabil dari pada kondisi perletakan yang lain. Hasil analisa berupa gaya dan tegangan yang terjadi pada struktur dari kondisi perletakan sendi-sendi (S-S) dapat dilihat pada **Tabel 7.3**.

Tabel 7.3 Kondisi Efektif Berdasarkan Kondisi Perletakan Sendi-Sendi (S-S)

PARAMETER PERLETAKAN		Tegangan (Mpa)	Tegangan ijin (Mpa)	Keterangan
Posisi Kabel	C	437.45	1676	OK
Perletakan Ujung	S-S			
BWR	1,5			
Tegangan Tunnel	S11	-54.578	366	OK
	S22	-114.370	366	OK
	S12	33.644	366	OK

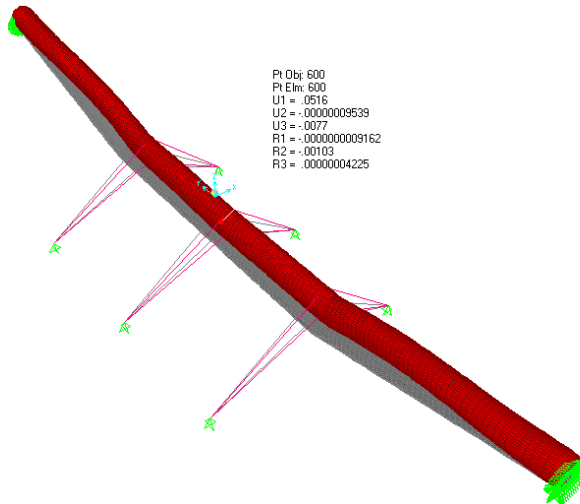


Gambar 7.3 SFT berdasarkan kondisi perletakan efektif (S-S)

7.2 Pemodelan Struktur Efektif

Berdasarkan analisa tiap kondisi yakni, konfigurasi posisi kabel, perletakan dan pengaruh BWR diatas, maka dilakukan analisa ulang dengan menggunakan variabel efektif masing-masing tinjauan. Analisa lanjutan yang dilakukan ini untuk melakukan klarifikasi analisa tiap-tiap penelitian, sehingga mendapatkan konfigurasi struktur yang baik. Pemodelan

dilakukan hanya mengambil langsung parameter efektifnya, yaitu memodelkan dengan kondisi perletakan S-S dengan kondisi kabel A pada sudut 54^0 dan BWR 1,3. Hal ini dilakukan untuk menyederhanakan pemodelan yang terlampau banyak. Berikut struktur efektif yang digabungkan dengan parameternya.



Gambar 7.4 SFT efektif dari masing-masing parameter

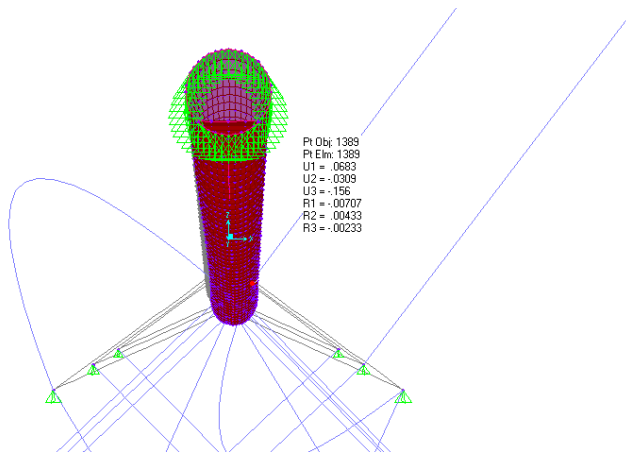
Hasil analisa yang didapatkan, terjadi nilai tekan yang tidak diharapkan pada elemen apabila menggunakan kabel dengan *define properties* “frame” (**Gambar 7.5**). Dengan adanya kondisi tersebut, maka pemodelan efektif dilakukan perubahan yaitu merubah kabel dengan *define properties* “cable”, kemudian diberi *initial tension*. Pemberian *initial tension* dengan besaran nilai bervariasi yaitu 26,1 kN, 90,32 kN, 100 kN, dan *initial tension* maksimum (*default* SAP2000). Variasi nilai *initial tension* di modelkan masing-masing dan dilakukan analisa terhadap hasil. Untuk kondisi *cable* digunakan *analysis type* dari gelombang adalah *linier* dan *non linear*. Hal tersebut dimaksudkan agar nilai yang terjadi pada kabel mengalami tarik

semua. Permodelan efektif yang dimodelkan diatur pada SAP2000 dapat dilihat pada **tabel 7.4**.

Tabel 7.4 Perubahan pemodelan efektif struktur SFT pada SAP2000

NAMA PEMODELAN	PEMODELAN STRUKTUR EFEKTIF		
	DEFINE PROPERTIES KABEL	INITIAL TENSION	ANALYSIS TYPE WAVE
Model A	<i>frame</i>	<i>no initial tension</i>	<i>linear</i>
Model B	<i>cable</i>	26,1 kN	<i>linear</i>
Model C	<i>cable</i>	26,1 kN	<i>non linear</i>
Model D	<i>cable</i>	90,32 kN	<i>non linear</i>
Model E	<i>cable</i>	100 kN	<i>non linear</i>
Model F	<i>cable</i>	<i>maksimum</i>	<i>non linear</i>

Hasil permodelan dengan merubah kabel menjadi elemen *cable* dengan pemberian *initial tension* sebesar 26,1 kN dan gelombang dimodelkan secara *linier* dan *non linier*. Pemodelan dengan pemberian initial tension 26,1 kN dapat dilihat pada **gambar 7.6**.



Gambar 7.5 SFT efektif tanpa *initial tension*

Tabel 7.5 Gaya aksial kabel struktur efektif

Struktur Efektif KOMBINASI 1 (D+H+W+I)	Gaya Aksial Kabel (kN)											
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
Kabel dengan kondisi frame, realease, wave liner	-1979.22	-2222.066	2686.767	2412.601	-2591.116	-2675.67	2380.544	2109.609	-1979.40	-2222.24	2686.931	2412.774

Note: Nilai positif pada tegangan menandakan tarik dan negatif menandakan tekan. Kondisi negatif berada pada posisi struktur yang tidak terpengaruh gaya arus dan gelombang secara langsung.

Tabel 7.6 Kontrol gaya aksial kabel struktur efektif

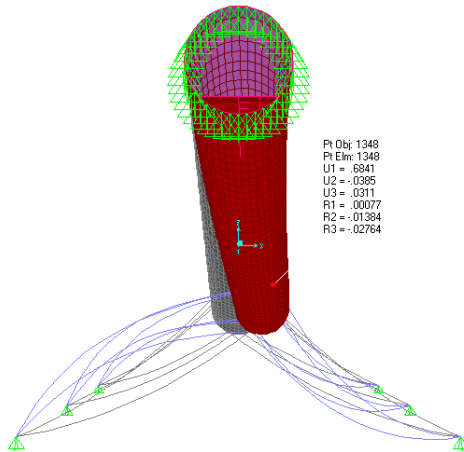
Struktur Efektif Model pada Kabel (D+H+W+I)	Max (N)	Luas Kabel (mm ²)	Diameter Kabel (mm)	σ (N/mm ²)	σ ijin (N/mm ²)	KET
Kabel dengan kondisi frame, realease, wave liner	2686931	8120	101.7	330.903	1676	OK

Tabel 7.7 Defleksi maksimum struktur efektif

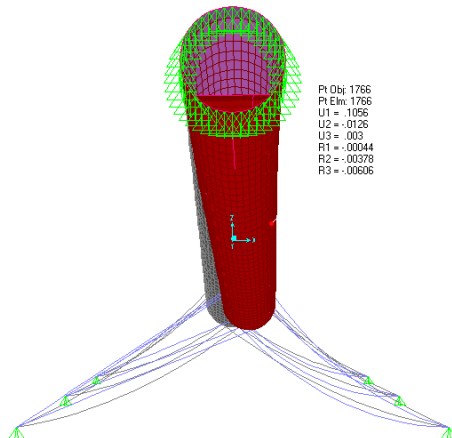
Struktur Efektif KOMBINASI 1 (D+H+W+I)	Defleksi (cm)		
	U1	U2	U3
Kabel dengan kondisi frame, realease, wave liner	5.3943	-9.2E-07	0.963

Tabel 7.8 Tegangan tunnel struktur efektif

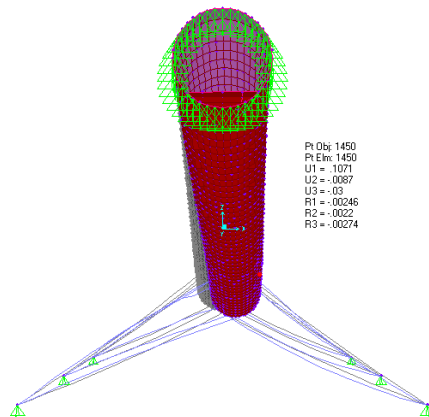
Struktur Efektif (D+H+W)	Elemen Stresses	Tegangan (Mpa)	Tegangan ijin (Mpa)	Keterangan
Kabel dengan kondisi frame, realease, wave liner	S11	-53.896	410	OK
	S22	75.902	410	OK
	S12	-15.272	410	OK



Gambar7.6 SFT efektif dengan diberikan *initial tension* 26,1 kN beban gelombang *linier*



Gambar7.7 SFT efektif dengan diberikan *initial tension* 26,1 kN beban gelombang *nonlinier*



Gambar 7.8 SFT efektif dengan diberikan *initial tension* 90,32 kN beban gelombang *nonlinier*

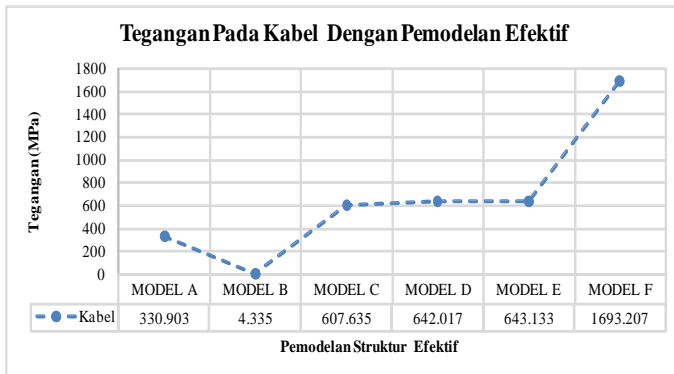
Dari berbagai model tersebut, dimodelkan pula dengan initial tension maksimum yang memiliki nilai *sag* kabel nol. Hal tersebut dilakukan untuk melihat kondisi kabel optimum dengan beban yang bekerja yang sekaligus menjadi dasar pemberian initial tension lain. Hasil berbagai kondisi pemodelan dengan kombinasi pembebanan D+H+W+L dapat dilihat pada **Tabel 7.9**.

Tabel 7.9 Gaya aksial kabel dengan parameter kabel yang diberi initial tension

Struktur Efektif KOMBINASI I (D+H+W+L)	Gaya Aksial Kabel (kN)											
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12
Kabel dengan kondisi frame, release, wave Linier	-1979.22	-2222.066	2686.767	2412.601	-2591.16	-2675.67	2380.544	2109.609	-1979.40	-2222.24	2686.931	2412.774
Kabel dengan initial tension 26.1 kN, wave Linier	30.00	32.51	35.20	32.51	35.19	32.50	35.19	32.50	35.20	32.51	35.20	32.51
Kabel dengan initial tension 26.1 kN, wave Non Linier	35.20	32.51	3198.23	2283.97	35.19	32.50	4716.13	4933.99	35.20	32.51	3200.79	2279.20
Kabel dengan initial tension 90,32 kN, wave Non Linier	103.297	99.613	3833.041	4777.706	103.132	99.53	3617.397	5213.178	103.297	99.613	3833.226	4777.986
Kabel dengan initial tension 100 kN, wave Non Linier	110.79	115.00	3862.83	4830.26	110.67	114.76	3612.67	5222.24	110.79	115.00	3863.02	4830.54
Kabel dengan initial tension Maks, wave Non Linier	181.01	197.56	11986.30	13729.93	8637.67	8104.03	11528.25	13748.84	8837.35	8175.58	11986.49	13730.21

Tabel 7.10 Kontrol tegangan yang terjadi pada kabel dengan pemodelan efektif

Struktur Efektif Model pada Kabel (D+H+W+L)	Max (N)	Luas Kabel (mm ²)	Diameter Kabel (mm)	σ (N/mm ²)	σ ijin (N/mm ²)	KE T
Kabel dengan kondisi frame, release, wave linier	2686931	8120	101.7	330.903	1676	OK
Kabel dengan initial tension 26.1 kN, wave Linier	35198	8120	101.7	4.335	1676	OK
Kabel dengan initial tension 26.1 kN, wave Non Linier	4933993	8120	101.7	607.635	1676	OK
Kabel dengan initial tension 90,32 kN, wave Non Linier	5213178	8120	101.7	642.017	1676	OK
Kabel dengan initial tension 100 kN, wave Non Linier	5222239	8120	101.7	643.133	1676	OK
Kabel dengan initial tension Maks, wave Non Linier	13748839	8120	101.7	1693.207	1676	Not OK



Keterangan :

IT : Initial tension

Frame : Kabel yang dimodelkan sebagai frame yang di release

Gambar 7.9 Hasil tegangan yang terjadi pada kabel dengan pemodelan efektif

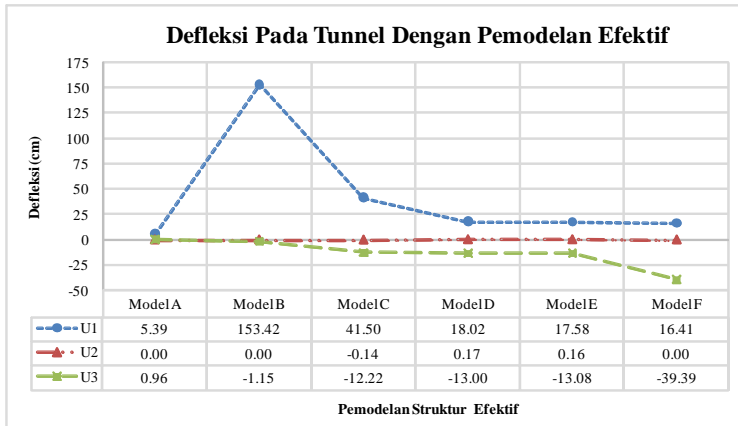
Hasil grafik diatas, terlihat nilai tegangan yang dianggap memiliki *trend* yang sama, yaitu kondisi kabel yang diberikan *initial tension* sebesar 90,32 kN dan 100 kN. Nilai *tension* didapat dengan cara coba-coba berdasarkan nilai *initial tension* maksimum pada *software*. Berdasarkan analisa yang dilakukan didapat pula nilai *defleksi* maksimum yang terjadi pada struktur. Defleksi tersebut dapat dilihat pada **Tabel 7.11**.

Tabel 7.11 Defleksi maksimum yang terjadi pada tunnel dengan pemodelan efektif

No	Struktur Efektif KOMBINASI 1 (D+H+W+L)	Defleksi (cm)		
		U1	U2	U3
1	Kabel dengan kondisi frame, release, wave linier	5.3943	-9.2E-07	0.963
2	Kabel dengan initial tension 26.1 kN, wave Linier	153.4154	0.0002195	-1.1526
3	Kabel dengan initial tension 26.1 kN, wave Non Linier	41.4963	-0.1422	-12.2222
4	Kabel dengan initial tension 90,32 kN, wave Non Linier	18.022	0.166	-13.0026
5	Kabel dengan initial tension 100 kN, wave Non Linier	17.5836	0.1633	-13.0769
6	Kabel dengan initial tension Maks, wave Non Linier	16.406	-9.435E-05	-39.3905

Keterangan:

U1: Defleksi arah x; *U2*: Defleksi arah y; *U3*: Defleksi arah z



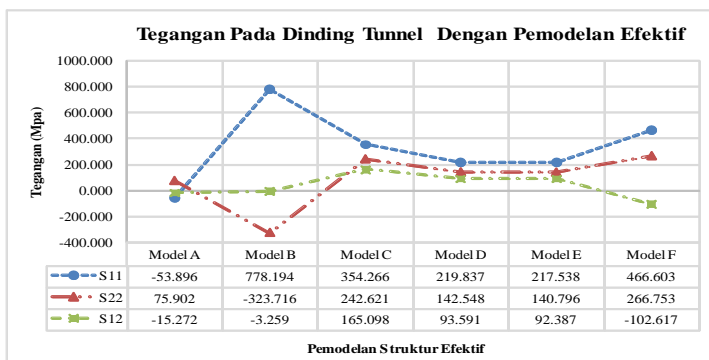
Gambar 7.12 Hasil defleksi yang terjadi pada tunnel dengan pemodelan efektif

Sesuai grafik dan tabel diatas didapat *trend* model yang berbanding lurus dengan besarnya nilai *initial tension*. Sehingga defleksi struktur pun bukan hanya dipengaruhi dari konfigurasi posisi kabel, kondisi perletakan dan variasi BWR akan tetapi dipengaruhi oleh model kabel. Kabel dengan *initial tension* menghasilkan gaya aksial dengan kondisi tarik semua. Sehingga pemodelan dengan kabel merupakan pemodelan yang dianggap lebih cocok. Pemodelan dengan kabel ini akan memiliki kondisi yang menyerupai *frame* apabila diberikan gaya *initial tension* tertentu sesuai grafik diatas. Besarnya *initial tension* didapat dengan cara coba-coba menyesuaikan dengan kondisi maksimum yang terjadi pada kabel dan sesuai spesifikasi kabel pada **Tabel 5.11** dan **5.12**. Begitu hal nya dengan kondisi tegangan *tunnel* yang ditinjau berdasarkan parameter model kabel. Kondisi tegangan pada *tunnel* tersebut dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 7.12 Tegangan yang terjadi pada dinding tunnel dengan pemodelan efektif

Pemodelan Struktur Efektif	Elemen Stresses	Tegangan (Mpa)	Tegangan ijin (Mpa)	Keterangan
Model A	S11	-53.896	366	OK
	S22	75.902	366	OK
	S12	-15.272	220	OK
Model B	S11	778.194	366	TIDAK
	S22	-323.716	366	OK
	S12	-3.259	220	OK
Model C	S11	354.266	366	OK
	S22	242.621	366	OK
	S12	165.098	220	OK
Model D	S11	219.837	366	OK
	S22	142.548	366	OK
	S12	93.591	220	OK
Model E	S11	217.538	366	OK
	S22	140.796	366	OK
	S12	92.387	220	OK
Model F	S11	466.603	366	TIDAK
	S22	266.753	366	OK
	S12	-102.617	220	OK

Sesuai tabel diatas tegangan yang terjadi pada *tunnel* searah S11, S22 dan S12 memenuhi tegangan ijin struktur. Kondisi kabel tersebut memberikan gambaran bahwa kondisi kabel yang diberikan initial tension mempengaruhi perubahan tegangan pada badan *tunnel*. Berikut perubahan tegangan pada *tunnel* berbanding dengan kondisi model kabel.



Gambar 7.12 Hasil tegangan yang terjadi pada dinding tunnel dengan pemodelan efektif

Sesuai dengan Gambar 7.12 didapat tegangan yang terjadi dipengaruhi *initial tension* yang diberikan dengan analisa gelombang *non linier*. Pemodelan gelombang *non linier* menunjukkan pengaruh *trend* yang sama pada kabel.

7.3 Analisa Pemodelan Efektif Struktur

Berdasarkan pemodelan *prototype* SFT yang dibuat dengan parameter yang telah dilakukan analisa. Hasil analisa diperoleh kondisi efektif yaitu BWR 1,3; perletakan ujung sendi-sendi; dan konfigurasi kabel sudut 54° . Hasil analisa tersebut dibuat pemodelan ulang. Dengan pemodelan tersebut digunakan *define properties* “*frame*” dan “*cable*” pada SAP2000. *Frame* menghasilkan gaya aksial lebih kecil dibandingkan *cable*, namun pada *frame* gaya aksial terjadi tarik dan tekan sedangkan *cable* gaya aksial terjadi tarik saja. Melihat kondisi tersebut apabila ada gaya aksial tekan pada kabel, maka bisa terjadi kegagalan struktur *tunnel* karena kabel tidak kuat menahan gaya tekan berlebih. Dengan pertimbangan faktor kemanan struktur, maka dipilih *cable*.

Pada penggunaan *define properties* “*cable*” dicoba pemberian *initial tension* dan analisa gelombang *non linear*. Hasilnya adalah tegangan yang terjadi pada struktur menunjukkan *trend* yang sesuai. Pemberian *initial tension* 26,1 kN; 90,32 kN; 100 kN menghasilkan *output* tegangan pada kabel 607,635 MPa; 624,017 MPa; 643,133 MPa. Untuk *output* tegangan pada dinding dengan *initial tension* 26,1 kN menghasilkan S11; S22; S12 sebesar 354,622 MPa; 242,261 MPa; 165,098 MPa.

BAB VIII PENUTUP

8.1 Kesimpulan

Kesimpulan berdasarkan pemodelan variasi BWR pada struktur *prototype* dengan hasil analisa efektif BWR, dan pemodelan efektif struktur dengan hasil analisa efektif struktur SFT. Pemodelan efektif terdiri dari hasil efektif BWR, perletakan ujung *tunnel*, dan konfigurasi posisi kabel. Adapun kesimpulan yang dapat diambil yaitu :

1. Variasi BWR yang dilakukan analisa adalah 1,1-1,8. Hasil analisa diperoleh nilai BWR 1,4 dengan keluaran defleksi arah Z adalah -0,0733 cm dan nilai BWR 1,3 dengan defleksi arah Z adalah -0,3871 cm. Dengan dasar kriteria desain yang ditentukan dari Mazzolani (2007) yaitu sekitar 1,2-1,3, maka diambil nilai efektif BWR untuk struktur *prototype* SFT adalah 1,3. Hasil defleksi tersebut masih mendekati nilai nol dan tegangan yang terjadi memenuhi nilai ijin yang ditentukan.
2. Pemodelan efektif struktur *prototype* SFT adalah BWR 1,3; perletakan ujung *tunnel* sendi-sendi; dan konfigurasi kabel sudut 54°. Menggunakan *define properties* “*cable*”, dan pemberian *initial tension* sebesar 26,1 kN (spesifikasi material kabel) dengan tipe analisa gelombang *non linier*.

8.2 Saran

Saran yang dapat disampaikan pada studi variasi *buoyancy weight ratio* untuk mendapatkan nilai BWR efektif adalah sebagai berikut :

1. Perlu studi lebih lanjut untuk bentuk dan penempatan ballast yang efisien pada struktur SFT.
2. Nilai *initial tension* perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mendapatkan hasil nilai *stressing* yang sesuai saat dilakukan pelaksanaan dilapangan.
3. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk metode konstruksi yang tepat dan efisien dalam pelaksanaan pembuatan struktur SFT di lapangan.
4. Hasil studi ini ada baiknya jika dilakukan analisa numerik dengan software lain, sehingga didapatkan *software* yang lebih spesifik untuk SFT.

LAMPIRAN 1
ANALISA ARUS DAN GELOMBANG

$$v_{\text{average}} = \left(\frac{m \dot{h}}{r} \right) \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \cos(kx - \sigma t) \quad a_{\text{avg}} = \left(\frac{2m \dot{h}}{r^2} \right) \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t) \quad F = \frac{W}{2g} D C_s v |v| + A C_b \frac{dv}{dt}$$

1. $\frac{m \dot{h}}{r}$ $\frac{2m \dot{h}}{r^2}$ $\frac{W}{2g} D C_s$ $A C_b$

z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
4	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
5	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
6	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
7	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
8	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
10	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
11	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
12	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
13	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
14	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
15	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
17	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
18	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
19	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
20	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
21	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
22	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
24	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
25	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
26	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
27	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
28	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
29	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
30	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

2.

$$t = 10.4136 \text{ s} \quad x = 32.49 \text{ m}$$

d (m)	x (m)	y (m)	$k(d+y)$	$k(d)$	t	$kx \cdot ct$	$\cos(k(d+y))$	$\sin(kd)$	$\sin(kx \cdot ct)$	$\cos(kx \cdot ct)$	v_{max} (m/s)	a_{max} (m/s ²)	v_{sum} (m/s)	C_M	C_H	$V(m/s)$	$ V(m/s) $	A (m ²)	D (m)	F_w/c_{w0} (kN/m)
20	32.491	-20	0.000	0.9669	10.414	-4.7124	1.000	1.125	-0.082	0.997	1.358	-0.068	0.732	2.00	0.70	2.990	2.990	19.625	5	5.217
20	32.491	-19	0.048	0.9669	10.414	-4.7124	1.001	1.125	-0.082	0.997	1.360	-0.068	0.957	2.00	0.70	2.317	2.317	19.625	5	7.041
20	32.491	-18	0.097	0.9669	10.414	-4.7124	1.005	1.125	-0.082	0.997	1.364	-0.068	1.133	2.00	0.70	2.497	2.497	19.625	5	8.621
20	32.491	-16	0.193	0.9669	10.414	-4.7124	1.019	1.125	-0.082	0.997	1.383	-0.069	1.277	2.00	0.70	2.661	2.661	19.625	5	10.123
20	32.491	-14	0.290	0.9669	10.414	-4.7124	1.042	1.125	-0.082	0.997	1.415	-0.070	1.386	2.00	0.70	2.772	2.772	19.625	5	11.159
20	32.491	-12	0.387	0.9669	10.414	-4.7124	1.076	1.125	-0.082	0.997	1.461	-0.073	1.405	2.00	0.70	2.865	2.865	19.625	5	12.034
20	32.491	-11	0.435	0.9669	10.414	-4.7124	1.086	1.125	-0.082	0.997	1.489	-0.074	1.484	2.00	0.70	2.943	2.943	19.625	5	12.796
20	32.491	-9.8776	0.489	0.967	10.41	-4.712	1.122	1.125	-0.082	0.997	1.524	-0.076	1.511	2.00	0.70	3.035	3.035	19.625	5	13.730
20	32.491	-9.2678	0.519	0.967	10.41	-4.712	1.138	1.125	-0.082	0.997	1.545	-0.077	1.569	2.00	0.70	3.114	3.114	19.625	5	14.583
20	32.491	-8.635	0.549	0.967	10.41	-4.712	1.155	1.125	-0.082	0.997	1.568	-0.078	1.624	2.00	0.70	3.192	3.192	19.625	5	15.435
20	32.491	-7.9911	0.585	0.967	10.41	-4.712	1.176	1.125	-0.082	0.997	1.597	-0.079	1.670	2.00	0.70	3.267	3.267	19.625	5	16.263
20	32.491	-7.3489	0.623	0.967	10.41	-4.712	1.201	1.125	-0.082	0.997	1.630	-0.081	1.714	2.00	0.70	3.344	3.344	19.625	5	17.124
20	32.491	-6.7065	0.659	0.967	10.41	-4.712	1.225	1.125	-0.082	0.997	1.664	-0.083	1.794	2.00	0.70	3.457	3.457	19.625	5	18.062
20	32.491	-6.0654	0.690	0.967	10.41	-4.712	1.247	1.125	-0.082	0.997	1.694	-0.084	1.863	2.00	0.70	3.557	3.557	19.625	5	19.084
20	32.491	-5.4234	0.719	0.967	10.41	-4.712	1.270	1.125	-0.082	0.997	1.725	-0.086	2.001	2.00	0.70	3.725	3.725	19.625	5	21.859
20	32.491	-4.7814	0.766	0.967	10.41	-4.712	1.308	1.125	-0.082	0.997	1.776	-0.088	2.136	2.00	0.70	3.911	3.911	19.625	5	24.352
20	32.491	-4.1399	0.844	0.967	10.41	-4.712	1.378	1.125	-0.082	0.997	1.871	-0.093	2.269	2.00	0.70	4.140	4.140	19.625	5	27.518
20	32.491	-0.8775	0.924	0.967	10.41	-4.712	1.459	1.125	-0.082	0.997	1.981	-0.099	2.335	2.00	0.70	4.315	4.315	19.625	5	30.009
20	32.491	0	0.967	0.9669	10.414	-4.7124	1.505	1.125	-0.082	0.997	2.044	-0.102	2.400	2.00	0.70	4.444	4.444	19.625	5	31.938

13000	13001	13002	13003	13004	13005	13006	13007	13008	13009	13010	13011	13012	13013	13014	13015	13016	13017	13018	13019	13020	13021	13022	13023	13024	13025	13026	13027	13028	13029	13030	13031	13032	13033	13034	13035	13036	13037	13038	13039	13040	13041	13042	13043	13044	13045	13046	13047	13048	13049	13050	13051	13052	13053	13054	13055	13056	13057	13058	13059	13060	13061	13062	13063	13064	13065	13066	13067	13068	13069	13070	13071	13072	13073	13074	13075	13076	13077	13078	13079	13080	13081	13082	13083	13084	13085	13086	13087	13088	13089	13090	13091	13092	13093	13094	13095	13096	13097	13098	13099	13100																																																											
20641	20642	20643	20644	20645	20646	20647	20648	20649	20650	20651	20652	20653	20654	20655	20656	20657	20658	20659	20660	20661	20662	20663	20664	20665	20666	20667	20668	20669	20670	20671	20672	20673	20674	20675	20676	20677	20678	20679	20680	20681	20682	20683	20684	20685	20686	20687	20688	20689	20690	20691	20692	20693	20694	20695	20696	20697	20698	20699	20700	20701	20702	20703	20704	20705	20706	20707	20708	20709	20710	20711	20712	20713	20714	20715	20716	20717	20718	20719	20720	20721	20722	20723	20724	20725	20726	20727	20728	20729	20730	20731	20732	20733	20734	20735	20736	20737	20738	20739	20740	20741	20742	20743	20744	20745	20746	20747	20748	20749	20750	20751	20752	20753	20754	20755	20756	20757	20758	20759	20760	20761	20762	20763	20764	20765	20766	20767	20768	20769	20770	20771	20772	20773	20774	20775	20776	20777	20778	20779	20780	20781	20782	20783	20784	20785	20786	20787	20788	20789	20790	20791	20792	20793	20794	20795	20796	20797	20798	20799	20800
13081	13082	13083	13084	13085	13086	13087	13088	13089	13090	13091	13092	13093	13094	13095	13096	13097	13098	13099	13100	13101	13102	13103	13104	13105	13106	13107	13108	13109	13110	13111	13112	13113	13114	13115	13116	13117	13118	13119	13120	13121	13122	13123	13124	13125	13126	13127	13128	13129	13130	13131	13132	13133	13134	13135	13136	13137	13138	13139	13140	13141	13142	13143	13144	13145	13146	13147	13148	13149	13150	13151	13152	13153	13154	13155	13156	13157	13158	13159	13160	13161	13162	13163	13164	13165	13166	13167	13168	13169	13170	13171	13172	13173	13174	13175	13176	13177	13178	13179	13180	13181	13182	13183	13184	13185	13186	13187	13188	13189	13190	13191	13192	13193	13194	13195	13196	13197	13198	13199	13200																																								

13081 13082 13083 13084 13085 13086 13087 13088 13089 13090 13091 13092 13093 13094 13095 13096 13097 13098 13099 13100 13101 13102 13103 13104 13105 13106 13107 13108 13109 13110 13111 13112 13113 13114 13115 13116 13117 13118 13119 13120 13121 13122 13123 13124 13125 13126 13127 13128 13129 13130 13131 13132 13133 13134 13135 13136 13137 13138 13139 13140 13141 13142 13143 13144 13145 13146 13147 13148 13149 13150 13151 13152 13153 13154 13155 13156 13157 13158 13159 13160 13161 13162 13163 13164 13165 13166 13167 13168 13169 13170 13171 13172 13173 13174 13175 13176 13177 13178 13179 13180 13181 13182 13183 13184 13185 13186 13187 13188 13189 13190 13191 13192 13193 13194 13195 13196 13197 13198 13199 13200

4.

 $t = 10.4136 \text{ s}$ $x =$

97.47 m

$d(m)$	$x(m)$	$y(m)$	$K(d+y)$	Kd	r	$Ks \cdot \sigma r$	$\cos h(K(d+y))$	$\sinh(Kd)$	$\sin(Ks \cdot \sigma r)$	$\cos(Ks \cdot \sigma r)$	$V_{ms}(m/s)$	$d_{ms}(m/s^2)$	$V_{sum}(m/s)$	C_M	C_D	$V(m/s)$	$W(m/s)$	$A(m^2)$	$D(m)$	$Fw/c_{ms}(kN/m)$
20	97.473	-20	0.000	0.98669	10.414	-1.5708	1.000	1.125	-0.027	1.000	1.562	-0.023	0.732	2.00	0.70	2.094	2.094	19.625	5	7.994
20	97.473	-19	0.048	0.98669	10.414	-1.5708	1.001	1.125	-0.027	1.000	1.564	-0.023	0.957	2.00	0.70	2.321	2.321	19.625	5	8.923
20	97.473	-18	0.097	0.98669	10.414	-1.5708	1.005	1.125	-0.027	1.000	1.568	-0.023	1.133	2.00	0.70	2.501	2.501	19.625	5	10.513
20	97.473	-16	0.193	0.98669	10.414	-1.5708	1.019	1.125	-0.027	1.000	1.588	-0.023	1.277	2.00	0.70	2.665	2.665	19.625	5	12.043
20	97.473	-14	0.290	0.98669	10.414	-1.5708	1.042	1.125	-0.027	1.000	1.450	-0.023	1.356	2.00	0.70	2.776	2.776	19.625	5	13.126
20	97.473	-12	0.387	0.98669	10.414	-1.5708	1.076	1.125	-0.027	1.000	1.465	-0.024	1.405	2.00	0.70	2.870	2.870	19.625	5	14.065
20	97.473	-11	0.435	0.98669	10.414	-1.5708	1.096	1.125	-0.027	1.000	1.493	-0.025	1.454	2.00	0.70	2.947	2.947	19.625	5	14.867
20	97.473	-9.26578	0.519	0.967	10.41	-1.571	1.138	1.125	-0.027	1.000	1.549	-0.026	1.511	2.00	0.70	3.039	3.039	19.625	5	15.853
20	97.473	-8.8776	0.489	0.967	10.41	-1.571	1.122	1.125	-0.027	1.000	1.528	-0.025	1.511	2.00	0.70	3.039	3.039	19.625	5	15.853
20	97.473	-8.615	0.540	0.967	10.41	-1.571	1.155	1.125	-0.027	1.000	1.573	-0.026	1.569	2.00	0.70	3.119	3.119	19.625	5	16.735
20	97.473	-7.8911	0.585	0.967	10.41	-1.571	1.176	1.125	-0.027	1.000	1.602	-0.027	1.624	2.00	0.70	3.197	3.197	19.625	5	17.621
20	97.473	-7.1089	0.623	0.967	10.41	-1.571	1.201	1.125	-0.027	1.000	1.635	-0.027	1.714	2.00	0.70	3.272	3.272	19.625	5	18.492
20	97.473	-6.365	0.659	0.967	10.41	-1.571	1.225	1.125	-0.027	1.000	1.659	-0.028	1.794	2.00	0.70	3.349	3.349	19.625	5	19.400
20	97.473	-5.7232	0.690	0.967	10.41	-1.571	1.247	1.125	-0.027	1.000	1.699	-0.028	1.863	2.00	0.70	3.462	3.462	19.625	5	20.787
20	97.473	-5.1224	0.719	0.967	10.41	-1.571	1.270	1.125	-0.027	1.000	1.730	-0.029	2.001	2.00	0.70	3.731	3.731	19.625	5	24.274
20	97.473	-4.1654	0.766	0.967	10.41	-1.571	1.308	1.125	-0.027	1.000	1.781	-0.029	2.136	2.00	0.70	3.917	3.917	19.625	5	26.842
20	97.473	-3.5429	0.844	0.967	10.41	-1.571	1.378	1.125	-0.027	1.000	1.877	-0.031	2.269	2.00	0.70	4.145	4.145	19.625	5	30.146
20	97.473	-0.8775	0.924	0.967	10.41	-1.5708	1.459	1.125	-0.027	1.000	1.987	-0.033	2.335	2.00	0.70	4.523	4.521	19.625	5	32.795
20	97.473	0	0.967	0.98669	10.414	-1.5708	1.505	1.125	-0.027	1.000	2.050	-0.034	2.400	2.00	0.70	4.450	4.450	19.625	5	34.816

34.415	5	19.625	4.132	4.132	4.70	2.00	2.03	0.00	1.497	1.000	0.000	1.325	1.427	0	18.414	4.967	0.924	4.8775	29.9084
31.480	5	19.625	4.146	4.146	4.70	2.00	2.349	0.000	1.577	1.000	0.000	1.325	1.378	0	18.414	4.967	0.844	5.8420	29.9084
28.000	5	19.625	3.817	3.817	4.70	2.00	3.116	0.000	1.782	1.000	0.000	1.325	1.308	0	18.414	4.967	0.766	1.654	29.9084
32.417	5	19.625	3.721	3.721	4.70	2.00	2.004	0.000	1.700	1.000	0.000	1.325	1.320	0	18.414	4.967	0.710	1.1214	29.9084
23.214	5	19.625	3.563	3.563	4.70	2.00	1.882	0.000	1.700	1.000	0.000	1.325	1.282	0	18.414	4.967	0.690	2.9222	29.9084
20.517	5	19.625	3.463	3.463	4.70	2.00	1.734	0.000	1.609	1.000	0.000	1.325	1.222	0	18.414	4.967	0.659	6.265	29.9084
20.517	5	19.625	3.250	3.250	4.70	2.00	1.734	0.000	1.606	1.000	0.000	1.325	1.200	0	18.414	4.967	0.623	1.0889	29.9084
16.516	5	19.625	3.273	3.273	4.70	2.00	1.634	0.000	1.400	1.000	0.000	1.325	1.177	0	18.414	4.967	0.585	3.8911	29.9084
18.606	5	19.625	3.108	3.108	4.70	2.00	1.634	0.000	1.372	1.000	0.000	1.325	1.157	0	18.414	4.967	0.549	8.625	29.9084
17.713	5	19.625	3.119	3.119	4.70	2.00	1.530	0.000	1.350	1.000	0.000	1.325	1.138	0	18.414	4.967	0.519	4.3678	29.9084
16.806	5	19.625	3.110	3.110	4.70	2.00	1.511	0.000	1.329	1.000	0.000	1.325	1.122	0	18.414	4.967	0.489	1.8276	29.9084
15.809	5	19.625	2.918	2.918	4.70	2.00	1.432	0.000	1.244	1.000	0.000	1.325	1.096	0	18.414	4.969	0.452	11	29.9084
14.909	5	19.625	2.710	2.710	4.70	2.00	1.402	0.000	1.166	1.000	0.000	1.325	1.076	0	18.414	4.969	0.387	12	29.9084
14.909	5	19.625	2.716	2.716	4.70	2.00	1.234	0.000	1.130	1.000	0.000	1.325	1.042	0	18.414	4.969	0.390	14	29.9084
12.909	5	19.625	2.665	2.665	4.70	2.00	1.237	0.000	1.308	1.000	0.000	1.325	1.019	0	18.414	4.969	0.192	16	29.9084
11.116	5	19.625	2.402	2.402	4.70	2.00	1.132	0.000	1.369	1.000	0.000	1.325	1.005	0	18.414	4.969	0.397	18	29.9084
9.853	5	19.625	2.321	2.321	4.70	2.00	0.925	0.000	1.261	1.000	0.000	1.325	1.001	0	18.414	4.969	0.388	19	29.9084
9.022	5	19.625	2.295	2.295	4.70	2.00	0.722	0.000	1.262	1.000	0.000	1.325	1.000	0	18.414	4.969	0.380	20	29.9084

m
129.96
x
x
16.416

264125	5	19625	4922	4922	0,70	200	2,625	0,000	1,692	1,000	0,000	1,252	1,469	0	2603	4967	0,924	4,8725	264920
314180	5	19625	4146	4146	0,70	200	2,249	0,000	1,172	1,000	0,000	1,252	1,378	0	2603	4967	0,844	2,5420	264920
280400	5	19625	3917	3917	0,70	200	2,116	0,000	1,192	1,000	0,000	1,252	1,208	0	2603	4967	0,766	1,654	264920
25417	5	19625	3721	3721	0,70	200	2,003	0,000	1,110	1,000	0,000	1,252	1,270	0	2603	4967	0,719	5,1214	264920
22147	5	19625	3563	3563	0,70	200	1,883	0,000	1,100	1,000	0,000	1,252	1,347	0	2603	4967	0,690	5,7222	264920
21017	5	19625	3462	3462	0,70	200	1,794	0,000	1,099	1,000	0,000	1,252	1,225	0	2603	4967	0,659	6,3665	264920
20617	5	19625	3400	3400	0,70	200	1,744	0,000	1,076	1,000	0,000	1,252	1,200	0	2603	4967	0,628	1,8000	264920
19425	5	19625	3272	3272	0,70	200	1,670	0,000	1,032	1,000	0,000	1,252	1,176	0	2603	4967	0,585	2,8011	264920
18616	5	19625	3149	3149	0,70	200	1,624	0,000	1,000	1,000	0,000	1,252	1,152	0	2603	4967	0,549	8,625	264920
17723	5	19625	3119	3119	0,70	200	1,570	0,000	1,000	1,000	0,000	1,252	1,138	0	2603	4967	0,519	4,2678	264920
16896	5	19625	3040	3040	0,70	200	1,511	0,000	1,000	1,000	0,000	1,252	1,122	0	2603	4967	0,489	4,8976	264920
15908	5	19625	2980	2980	0,70	200	1,462	0,000	1,000	1,000	0,000	1,252	1,096	0	2603	4969	0,458	11	264920
15000	5	19625	2900	2900	0,70	200	1,402	0,000	1,000	1,000	0,000	1,252	1,060	0	2603	4969	0,407	12	264920
14490	5	19625	2826	2826	0,70	200	1,354	0,000	1,000	1,000	0,000	1,252	1,042	0	2603	4969	0,390	14	264920
13290	5	19625	2665	2665	0,70	200	1,272	0,000	1,000	1,000	0,000	1,252	1,019	0	2603	4969	0,352	16	264920
1144	5	19625	2492	2492	0,70	200	1,132	0,000	1,000	1,000	0,000	1,252	1,008	0	2603	4969	0,307	18	264920
0882	5	19625	2321	2321	0,70	200	0,995	0,000	1,000	1,000	0,000	1,252	1,001	0	2603	4969	0,308	19	264920
8022	5	19625	2095	2095	0,70	200	0,722	0,000	1,203	1,000	0,000	1,252	1,000	0	2603	4969	0,300	20	264920

m = 3249 x = 3 y = 26034

$d \text{ (m)}$	$x \text{ (m)}$	$y \text{ (m)}$	$k(d+y)$	$k(d)$	t	$kx-ct$	$\cosh(k(d+y))$	$\sinh(kd)$	$\sin(kx-ct)$	$\cos(kx-ct)$	$V_{x0} \text{ (m/s)}$	$I_{x0} \text{ (m/s}^2\text{)}$	$V_{x0, \text{var}} \text{ (m/s)}$	C_{x0}	C_{y0}	$V \text{ (m/s)}$	$ M \text{ (m/s)}$	$A \text{ (m}^2\text{)}$	$D \text{ (m)}$	$F_{\text{FwC}} \text{ var (kN/m)}$	
20	64.982	-20	0.000	0.9669	2.6034	1.5708	1.000	1.125	0.027	1.000	1.362	0.023	0.732	2.00	0.70	2.094	2.094	19.625	5	8.943	
20	64.982	-19	0.048	0.9669	2.6034	1.5708	1.001	1.125	0.027	1.000	1.364	0.023	0.957	2.00	0.70	2.321	2.321	19.625	5	10.774	
20	64.982	-18	0.097	0.9669	2.6034	1.5708	1.005	1.125	0.027	1.000	1.368	0.023	1.133	2.00	0.70	2.580	2.580	19.625	5	12.370	
20	64.982	-16	0.195	0.9669	2.6034	1.5708	1.019	1.125	0.027	1.000	1.388	0.023	1.277	2.00	0.70	2.665	2.665	19.625	5	13.926	
20	64.982	-14	0.290	0.9669	2.6034	1.5708	1.042	1.125	0.027	1.000	1.420	0.023	1.356	2.00	0.70	2.776	2.776	19.625	5	15.052	
20	64.982	-12	0.387	0.9669	2.6034	1.5708	1.076	1.125	0.027	1.000	1.465	0.024	1.405	2.00	0.70	2.870	2.870	19.625	5	16.054	
20	64.982	-11	0.435	0.9669	2.6034	1.5708	1.096	1.125	0.027	1.000	1.495	0.025	1.454	2.00	0.70	2.947	2.947	19.625	5	16.893	
20	64.982	-9.5678	0.489	0.967	2.603	1.5708	1.122	1.125	0.027	1.000	1.528	0.025	1.511	2.00	0.70	3.039	3.039	19.625	5	17.927	
20	64.982	-8.635	0.549	0.967	2.603	1.5708	1.155	1.125	0.027	1.000	1.573	0.026	1.569	2.00	0.70	3.119	3.119	19.625	5	18.838	
20	64.982	-7.8911	0.585	0.967	2.603	1.5708	1.176	1.125	0.027	1.000	1.602	0.027	1.624	2.00	0.70	3.272	3.272	19.625	5	19.756	
20	64.982	-7.1039	0.623	0.967	2.603	1.5708	1.201	1.125	0.027	1.000	1.635	0.027	1.670	2.00	0.70	3.449	3.449	19.625	5	20.666	
20	64.982	-6.3685	0.659	0.967	2.603	1.5708	1.225	1.125	0.027	1.000	1.669	0.028	1.714	2.00	0.70	3.549	3.549	19.625	5	21.619	
20	64.982	-5.7322	0.690	0.967	2.603	1.5708	1.247	1.125	0.027	1.000	1.699	0.028	1.794	2.00	0.70	3.562	3.562	19.625	5	23.052	
20	64.982	-5.1224	0.719	0.967	2.603	1.5708	1.270	1.125	0.027	1.000	1.730	0.029	2.001	2.00	0.70	3.731	3.731	19.625	5	24.559	
20	64.982	-4.1654	0.766	0.967	2.603	1.5708	1.308	1.125	0.027	1.000	1.781	0.029	2.136	2.00	0.70	3.917	3.917	19.625	5	26.622	
20	64.982	-2.5429	0.844	0.967	2.603	1.5708	1.378	1.125	0.027	1.000	1.877	0.031	2.269	2.00	0.70	4.145	4.145	19.625	5	29.259	
20	64.982	-0.8775	0.924	0.967	2.603	1.5708	1.459	1.125	0.027	1.000	1.987	0.033	2.335	2.00	0.70	4.321	4.321	19.625	5	32.693	
20	64.982	0	0.967	0.9669	2.6034	1.5708	1.505	1.125	0.027	1.000	2.050	0.034	2.400	2.00	0.70	4.450	4.450	19.625	5	35.492	
20	64.982																			5	37.598

6.

 $t = 2.6034 \text{ s}$ $x =$

0.00 m

d (m)	x (m)	y (m)	$k(d+x)$	$k(d)$	t	$kx \cdot t$	$\cos h(k(d+y))$	$\sinh(k(d))$	$\sinh(kx \cdot t)$	$\cos(kx \cdot t)$	$V_{x \text{ in}}$ (m/s)	$a_{x \text{ in}}$ (m/s ²)	V_{average} (m/s)	C_{v}	C_{h}	V (m/s)	W (m/s)	A (m ²)	D (m)	Fr_{critical} (kN/m)
20	0.000	-20	0.000	0.9669	2.6034	-1.5708	1.000	1.125	-0.027	1.000	1.362	-0.023	0.732	2.00	0.70	2.084	2.084	19.625	5	70.94
20	0.000	-19	0.048	0.9669	2.6034	-1.5708	1.001	1.125	-0.027	1.000	1.364	-0.023	0.897	2.00	0.70	2.321	2.321	19.625	5	80.24
20	0.000	-18	0.097	0.9669	2.6034	-1.5708	1.005	1.125	-0.027	1.000	1.368	-0.023	1.133	2.00	0.70	2.501	2.501	19.625	5	105.13
20	0.000	-16	0.193	0.9669	2.6034	-1.5708	1.019	1.125	-0.027	1.000	1.388	-0.023	1.277	2.00	0.70	2.685	2.685	19.625	5	120.43
20	0.000	-14	0.290	0.9669	2.6034	-1.5708	1.042	1.125	-0.027	1.000	1.420	-0.023	1.356	2.00	0.70	2.776	2.776	19.625	5	131.26
20	0.000	-12	0.387	0.9669	2.6034	-1.5708	1.076	1.125	-0.027	1.000	1.465	-0.023	1.408	2.00	0.70	2.870	2.870	19.625	5	14.065
20	0.000	-11	0.435	0.9669	2.6034	-1.5708	1.096	1.125	-0.027	1.000	1.493	-0.025	1.454	2.00	0.70	2.947	2.947	19.625	5	14.867
20	0.000	-9.2678	0.519	0.967	2.603	-1.571	1.138	1.125	-0.027	1.000	1.538	-0.025	1.511	2.00	0.70	3.039	3.039	19.625	5	15.853
20	0.000	-8.8776	0.489	0.967	2.603	-1.571	1.122	1.125	-0.027	1.000	1.549	-0.026	1.511	2.00	0.70	3.119	3.119	19.625	5	16.735
20	0.000	-8.635	0.549	0.967	2.603	-1.571	1.155	1.125	-0.027	1.000	1.573	-0.026	1.624	2.00	0.70	3.197	3.197	19.625	5	17.621
20	0.000	-7.8911	0.585	0.967	2.603	-1.571	1.176	1.125	-0.027	1.000	1.602	-0.027	1.670	2.00	0.70	3.272	3.272	19.625	5	18.492
20	0.000	-7.1089	0.623	0.967	2.603	-1.571	1.201	1.125	-0.027	1.000	1.635	-0.027	1.714	2.00	0.70	3.349	3.349	19.625	5	19.400
20	0.000	-6.3065	0.659	0.967	2.603	-1.571	1.225	1.125	-0.027	1.000	1.669	-0.028	1.794	2.00	0.70	3.402	3.402	19.625	5	20.787
20	0.000	-5.7322	0.690	0.967	2.603	-1.571	1.247	1.125	-0.027	1.000	1.699	-0.028	1.863	2.00	0.70	3.502	3.502	19.625	5	22.053
20	0.000	-5.1234	0.719	0.967	2.603	-1.571	1.270	1.125	-0.027	1.000	1.730	-0.029	2.001	2.00	0.70	3.731	3.731	19.625	5	24.274
20	0.000	-4.1654	0.766	0.967	2.603	-1.571	1.308	1.125	-0.027	1.000	1.781	-0.031	2.136	2.00	0.70	3.917	3.917	19.625	5	26.842
20	0.000	-2.5429	0.844	0.967	2.603	-1.571	1.378	1.125	-0.027	1.000	1.877	-0.033	2.259	2.00	0.70	4.145	4.145	19.625	5	30.146
20	0.000	-0.8775	0.924	0.967	2.603	-1.571	1.459	1.125	-0.027	1.000	1.987	-0.033	2.335	2.00	0.70	4.331	4.331	19.625	5	32.795
20	0.000	0	0.967	0.9669	2.6034	-1.5708	1.505	1.125	-0.027	1.000	2.050	-0.034	2.400	2.00	0.70	4.450	4.450	19.625	5	34.816

12.

 $t = -5.2008 \text{ s}$ $x = 32.491 \text{ m}$

$d \text{ (m)}$	$x \text{ (m)}$	$y \text{ (m)}$	$k(d+y)$	k_d	t	$kx-ct$	$\cos H(k(d+y))$	$\sinh(kd)$	$\sin(kx-ct)$	$\cos(kx-ct)$	$V_{\text{res}} \text{ (m/s)}$	$t_{\text{res}} \text{ (m/s}^2)$	$V_{\text{amm}} \text{ (m/s)}$	C_M	C_H	$V \text{ (m/s)}$	$ W \text{ (m/s)}$	$A \text{ (m}^2)$	$D \text{ (m)}$	$\text{Fw}^2 \text{ res (kN/m)}$
20	32.491	-20	0.000	0.9669	5.2068	-1.5708	1.000	1.125	-0.027	1.000	1.362	-0.023	0.732	2.00	0.70	2.094	2.094	19.625	5	7.094
20	32.491	-19	0.048	0.9669	5.2068	-1.5708	1.001	1.125	-0.027	1.000	1.364	-0.023	0.957	2.00	0.70	2.321	2.321	19.625	5	8.923
20	32.491	-18	0.097	0.9669	5.2068	-1.5708	1.005	1.125	-0.027	1.000	1.368	-0.023	1.133	2.00	0.70	2.591	2.591	19.625	5	10.513
20	32.491	-16	0.193	0.9669	5.2068	-1.5708	1.019	1.125	-0.027	1.000	1.388	-0.023	1.277	2.00	0.70	2.665	2.665	19.625	5	12.043
20	32.491	-14	0.290	0.9669	5.2068	-1.5708	1.042	1.125	-0.027	1.000	1.420	-0.023	1.356	2.00	0.70	2.776	2.776	19.625	5	13.126
20	32.491	-12	0.387	0.9669	5.2068	-1.5708	1.076	1.125	-0.027	1.000	1.465	-0.024	1.405	2.00	0.70	2.870	2.870	19.625	5	14.065
20	32.491	-11	0.435	0.9669	5.2068	-1.5708	1.096	1.125	-0.027	1.000	1.493	-0.025	1.454	2.00	0.70	2.947	2.947	19.625	5	14.867
20	32.491	-9.2678	0.519	0.967	5.207	-1.571	1.122	1.125	-0.027	1.000	1.528	-0.025	1.511	2.00	0.70	3.039	3.039	19.625	5	15.853
20	32.491	-8.8776	0.489	0.967	5.207	-1.571	1.138	1.125	-0.027	1.000	1.549	-0.026	1.569	2.00	0.70	3.119	3.119	19.625	5	16.735
20	32.491	-8.635	0.540	0.967	5.207	-1.571	1.155	1.125	-0.027	1.000	1.573	-0.026	1.624	2.00	0.70	3.197	3.197	19.625	5	17.621
20	32.491	-7.8911	0.585	0.967	5.207	-1.571	1.176	1.125	-0.027	1.000	1.602	-0.027	1.670	2.00	0.70	3.272	3.272	19.625	5	18.492
20	32.491	-7.1089	0.623	0.967	5.207	-1.571	1.201	1.125	-0.027	1.000	1.655	-0.027	1.714	2.00	0.70	3.349	3.349	19.625	5	19.400
20	32.491	-6.366	0.659	0.967	5.207	-1.571	1.225	1.125	-0.027	1.000	1.669	-0.028	1.794	2.00	0.70	3.462	3.462	19.625	5	20.787
20	32.491	-5.7322	0.690	0.967	5.207	-1.571	1.247	1.125	-0.027	1.000	1.699	-0.028	1.863	2.00	0.70	3.562	3.562	19.625	5	22.053
20	32.491	-4.1224	0.719	0.967	5.207	-1.571	1.270	1.125	-0.027	1.000	1.730	-0.029	2.001	2.00	0.70	3.731	3.731	19.625	5	24.274
20	32.491	-1.1654	0.766	0.967	5.207	-1.571	1.308	1.125	-0.027	1.000	1.781	-0.029	2.136	2.00	0.70	3.917	3.917	19.625	5	26.842
20	32.491	-0.5429	0.844	0.967	5.207	-1.571	1.378	1.125	-0.027	1.000	1.877	-0.031	2.269	2.00	0.70	4.145	4.145	19.625	5	30.146
20	32.491	-0.8775	0.924	0.967	5.207	-1.571	1.459	1.125	-0.027	1.000	1.987	-0.033	2.335	2.00	0.70	4.321	4.321	19.625	5	32.795
20	32.491	0	0.967	0.9669	5.2068	-1.5708	1.505	1.125	-0.027	1.000	2.050	-0.034	2.400	2.00	0.70	4.450	4.450	19.625	5	34.816

d (m)	x (m)	y (m)	$k(d+x)$	$k(d)$	t	$kx-ct$	$\cosh(k(d+x))$	$\sinh(kd)$	$\sin(kx-ct)$	$\cos(kx-ct)$	$V_{x1}(m/s)$	$a_{x1}(m/s^2)$	$V_{average}(m/s)$	C_u	C_w	$V(m/s)$	$W(m/s)$	$A(m^2)$	D (m)	$Fr_{c1}(kN/m)$
20	97.473	-20	0.000	0.9669	5.2068	1.5708	1.000	1.125	0.027	1.000	1.962	0.023	0.732	2.00	0.70	2.084	2.094	19.625	5	8843
20	97.473	-19	0.048	0.9669	5.2068	1.5708	1.001	1.125	0.027	1.000	1.964	0.023	0.897	2.00	0.70	2.321	2.321	19.625	5	10174
20	97.473	-18	0.097	0.9669	5.2068	1.5708	1.005	1.125	0.027	1.000	1.968	0.023	1.133	2.00	0.70	2.801	2.801	19.625	5	12370
20	97.473	-16	0.195	0.9669	5.2068	1.5708	1.019	1.125	0.027	1.000	1.988	0.023	1.277	2.00	0.70	2.685	2.685	19.625	5	13926
20	97.473	-14	0.290	0.9669	5.2068	1.5708	1.042	1.125	0.027	1.000	1.420	0.023	1.356	2.00	0.70	2.776	2.776	19.625	5	15052
20	97.473	-12	0.387	0.9669	5.2068	1.5708	1.076	1.125	0.027	1.000	1.465	0.024	1.408	2.00	0.70	2.870	2.870	19.625	5	16054
20	97.473	-11	0.455	0.9669	5.2068	1.5708	1.096	1.125	0.027	1.000	1.493	0.025	1.454	2.00	0.70	2.947	2.947	19.625	5	16893
20	97.473	-9.2678	0.519	0.9667	5.207	1.5708	1.138	1.125	0.027	1.000	1.538	0.025	1.511	2.00	0.70	3.039	3.039	19.625	5	17927
20	97.473	-8.8776	0.489	0.9667	5.207	1.5708	1.122	1.125	0.027	1.000	1.538	0.025	1.511	2.00	0.70	3.119	3.119	19.625	5	18.838
20	97.473	-8.635	0.549	0.9667	5.207	1.5708	1.155	1.125	0.027	1.000	1.573	0.026	1.569	2.00	0.70	3.197	3.197	19.625	5	19.756
20	97.473	-7.8911	0.585	0.9667	5.207	1.5708	1.176	1.125	0.027	1.000	1.602	0.027	1.624	2.00	0.70	3.272	3.272	19.625	5	20.666
20	97.473	-7.1089	0.623	0.9667	5.207	1.5708	1.201	1.125	0.027	1.000	1.635	0.027	1.714	2.00	0.70	3.349	3.349	19.625	5	21.619
20	97.473	-6.5065	0.659	0.9667	5.207	1.5708	1.225	1.125	0.027	1.000	1.669	0.028	1.794	2.00	0.70	3.462	3.462	19.625	5	22.602
20	97.473	-5.7322	0.690	0.9667	5.207	1.5708	1.247	1.125	0.027	1.000	1.699	0.028	1.863	2.00	0.70	3.562	3.562	19.625	5	24.559
20	97.473	-5.1234	0.719	0.9667	5.207	1.5708	1.270	1.125	0.027	1.000	1.730	0.029	2.001	2.00	0.70	3.731	3.731	19.625	5	26.622
20	97.473	-4.1654	0.766	0.9667	5.207	1.5708	1.308	1.125	0.027	1.000	1.781	0.029	2.136	2.00	0.70	3.917	3.917	19.625	5	29.259
20	97.473	-2.5429	0.844	0.9667	5.207	1.5708	1.378	1.125	0.027	1.000	1.877	0.031	2.269	2.00	0.70	4.145	4.145	19.625	5	32.693
20	97.473	-0.8775	0.924	0.9667	5.207	1.5708	1.459	1.125	0.027	1.000	1.987	0.033	2.335	2.00	0.70	4.331	4.331	19.625	5	35.492
20	97.473	0	0.967	0.9669	5.2068	1.5708	1.505	1.125	0.027	1.000	2.050	0.034	2.400	2.00	0.70	4.450	4.450	19.625	5	37.998

d (m)	x (m)	y (m)	$k(d+y)$	kd	t	$kxct$	$\cos(\theta(d+y))$	$\sin(\theta(d+y))$	$\sin(\theta x - ct)$	$\cos(\theta x - ct)$	$V_{x-}(m/s)$	$a_{x-}(m/s^2)$	$V_{y-}(m/s)$	C_y	C_w	$ V_{(x,y)} $	$ W_{(x,y)} $	A (m ²)	D (m)	$F_{\text{ave}}(kN/m)$
20	0.000	-20	0.000	0.9669	7.8102	-4.7124	1.000	1.125	-0.082	0.997	1.588	-0.068	0.732	2.00	0.70	2.090	2.090	19.625	5	5.217
20	0.000	-19	0.048	0.9669	7.8102	-4.7124	1.001	1.125	-0.082	0.997	1.560	-0.068	0.957	2.00	0.70	2.317	2.317	19.625	5	7.041
20	0.000	-18	0.097	0.9669	7.8102	-4.7124	1.005	1.125	-0.082	0.997	1.564	-0.068	1.133	2.00	0.70	2.497	2.497	19.625	5	8.621
20	0.000	-16	0.195	0.9669	7.8102	-4.7124	1.019	1.125	-0.082	0.997	1.585	-0.069	1.277	2.00	0.70	2.661	2.661	19.625	5	10.125
20	0.000	-14	0.290	0.9669	7.8102	-4.7124	1.042	1.125	-0.082	0.997	1.615	-0.070	1.356	2.00	0.70	2.772	2.772	19.625	5	11.159
20	0.000	-12	0.387	0.9669	7.8102	-4.7124	1.076	1.125	-0.082	0.997	1.661	-0.073	1.405	2.00	0.70	2.865	2.865	19.625	5	12.054
20	0.000	-11	0.485	0.9669	7.8102	-4.7124	1.096	1.125	-0.082	0.997	1.689	-0.074	1.454	2.00	0.70	2.943	2.943	19.625	5	12.796
20	0.000	-9.8776	0.519	0.967	7.810	-4.712	1.122	1.125	-0.082	0.997	1.524	-0.076	1.511	2.00	0.70	3.035	3.035	19.625	5	13.730
20	0.000	-8.635	0.549	0.967	7.81	-4.712	1.155	1.125	-0.082	0.997	1.568	-0.078	1.569	2.00	0.70	3.114	3.114	19.625	5	14.585
20	0.000	-7.4911	0.585	0.967	7.81	-4.712	1.176	1.125	-0.082	0.997	1.597	-0.079	1.624	2.00	0.70	3.192	3.192	19.625	5	15.435
20	0.000	-7.1089	0.623	0.967	7.81	-4.712	1.201	1.125	-0.082	0.997	1.630	-0.081	1.714	2.00	0.70	3.344	3.344	19.625	5	17.124
20	0.000	-6.565	0.659	0.967	7.81	-4.712	1.225	1.125	-0.082	0.997	1.664	-0.083	1.794	2.00	0.70	3.457	3.457	19.625	5	18.462
20	0.000	-5.7322	0.690	0.967	7.81	-4.712	1.247	1.125	-0.082	0.997	1.694	-0.084	1.863	2.00	0.70	3.557	3.557	19.625	5	19.684
20	0.000	-4.1634	0.719	0.967	7.81	-4.712	1.270	1.125	-0.082	0.997	1.725	-0.086	2.001	2.00	0.70	3.725	3.725	19.625	5	21.959
20	0.000	-2.5429	0.844	0.967	7.81	-4.712	1.378	1.125	-0.082	0.997	1.871	-0.093	2.269	2.00	0.70	4.140	4.140	19.625	5	27.518
20	0.000	-0.8775	0.924	0.967	7.81	-4.712	1.459	1.125	-0.082	0.997	1.981	-0.099	2.335	2.00	0.70	4.315	4.315	19.625	5	30.009
20	0.000	0	0.967	0.9669	7.8102	-4.7124	1.505	1.125	-0.082	0.997	2.044	-0.102	2.400	2.00	0.70	4.444	4.444	19.625	5	31.938

31.413	5	19.625	4.110	4.110	0.70	2.00	2.315	0.166	1.084	0.918	0.825	1.225	1.465	1.142	2.81	0.927	0.924	0.822	32.49230
38.841	5	19.625	4.143	4.143	0.70	2.00	2.310	0.163	1.074	0.918	0.825	1.225	1.375	1.142	2.81	0.927	0.844	0.822	32.49230
35.646	5	19.625	3.815	3.815	0.70	2.00	2.316	0.159	1.070	0.918	0.825	1.225	1.306	1.142	2.81	0.927	0.766	0.822	32.49230
25.045	5	19.625	2.520	2.520	0.70	2.00	2.061	0.157	1.070	0.918	0.825	1.225	1.206	1.142	2.81	0.927	0.719	0.822	32.49230
20.876	5	19.625	2.161	2.161	0.70	2.00	1.862	0.156	1.071	0.918	0.825	1.225	1.248	1.142	2.81	0.927	0.670	0.822	32.49230
19.672	5	19.625	2.160	2.160	0.70	2.00	1.714	0.154	1.071	0.918	0.825	1.225	1.232	1.142	2.81	0.927	0.629	0.822	32.49230
18.249	5	19.625	2.147	2.147	0.70	2.00	1.744	0.153	1.071	0.918	0.825	1.225	1.240	1.142	2.81	0.927	0.632	0.822	32.49230
17.284	5	19.625	2.170	2.170	0.70	2.00	1.670	0.152	1.071	0.918	0.825	1.225	1.177	1.142	2.81	0.927	0.585	0.822	32.49230
16.524	5	19.625	2.195	2.195	0.70	2.00	1.674	0.152	1.071	0.918	0.825	1.225	1.175	1.142	2.81	0.927	0.529	0.822	32.49230
15.665	5	19.625	2.117	2.117	0.70	2.00	1.570	0.151	1.071	0.918	0.825	1.225	1.173	1.142	2.81	0.927	0.529	0.822	32.49230
14.297	5	19.625	2.158	2.158	0.70	2.00	1.571	0.151	1.071	0.918	0.825	1.225	1.122	1.142	2.81	0.927	0.489	0.822	32.49230
13.925	5	19.625	2.146	2.146	0.70	2.00	1.426	0.149	1.071	0.918	0.825	1.125	1.096	1.125	2.81	0.927	0.325	0.822	32.49230
13.045	5	19.625	2.008	2.008	0.70	2.00	1.408	0.148	1.071	0.918	0.825	1.125	1.076	1.125	2.81	0.927	0.387	0.822	32.49230
12.147	5	19.625	2.174	2.174	0.70	2.00	1.384	0.147	1.071	0.918	0.825	1.125	1.042	1.125	2.81	0.927	0.380	0.822	32.49230
11.087	5	19.625	2.163	2.163	0.70	2.00	1.275	0.146	1.071	0.918	0.825	1.125	1.019	1.125	2.81	0.927	0.313	0.822	32.49230
9.571	5	19.625	2.180	2.180	0.70	2.00	1.132	0.145	1.071	0.918	0.825	1.125	1.005	1.125	2.81	0.927	0.318	0.822	32.49230
7.986	5	19.625	2.110	2.110	0.70	2.00	0.925	0.145	1.071	0.918	0.825	1.125	1.001	1.125	2.81	0.927	0.318	0.822	32.49230
6.150	5	19.625	2.102	2.102	0.70	2.00	0.723	0.145	1.071	0.918	0.825	1.125	1.000	1.125	2.81	0.927	0.318	0.822	32.49230

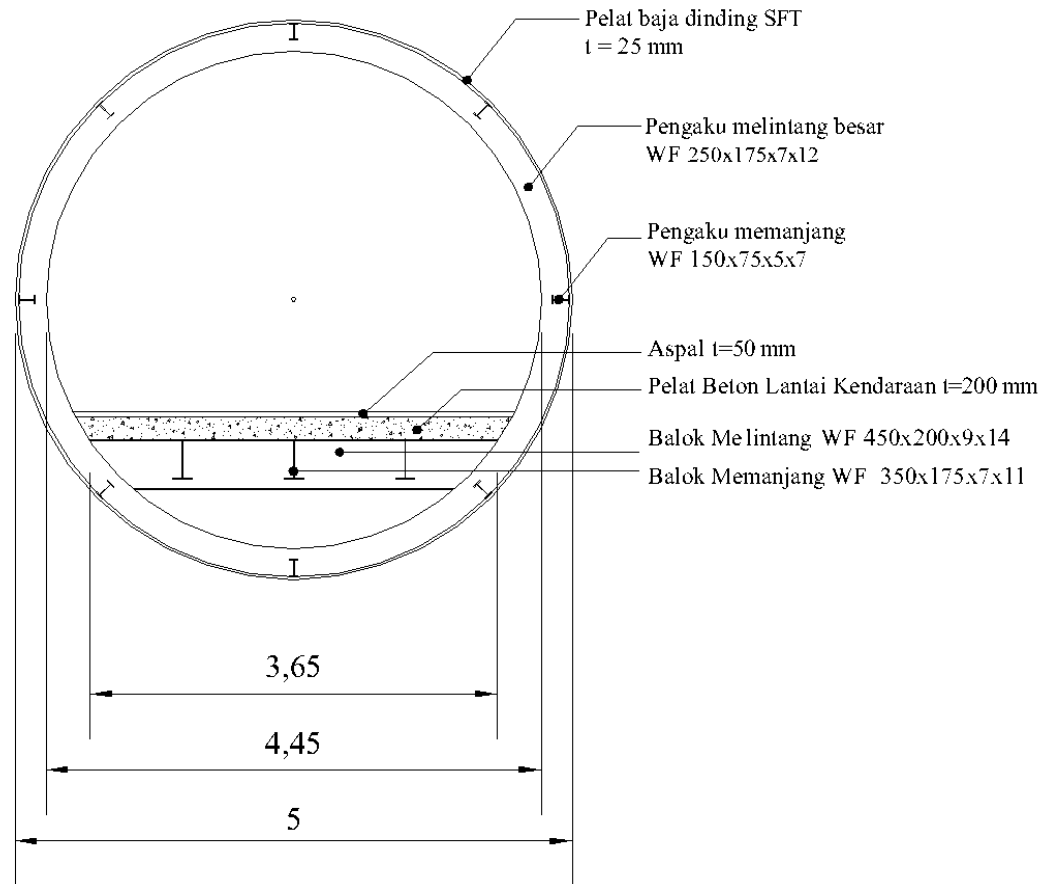
m = 22.49 x = 5 r = 7.1462

d (m)	x (m)	y (m)	$k(d+y)$	Kd	t	$kx-ct$	$\cos(k(d+y))$	$\sinh(Kd)$	$\sin(Kx-ct)$	$\cos(Kx-ct)$	V_{xs} (m/s)	a_{xs} (m/s ²)	$V_{yztotal}$ (m/s)	C_M	C_D	V (m/s)	$ W $ (m/s)	A (m ⁻²)	D (m)	$F^{viscous}$ (kN/m)	
20	64.982	-20	0.000	0.9669	7.8102	-1.5708	1.000	1.125	-0.027	1.000	1.562	-0.023	0.732	2.00	0.70	2.094	2.321	2.094	19.625	5	7.094
20	64.982	-19	0.048	0.9669	7.8102	-1.5708	1.001	1.125	-0.027	1.000	1.564	-0.023	0.957	2.00	0.70	2.231	2.321	19.625	5	8.923	
20	64.982	-18	0.097	0.9669	7.8102	-1.5708	1.005	1.125	-0.027	1.000	1.568	-0.023	1.133	2.00	0.70	2.501	2.501	19.625	5	10.513	
20	64.982	-16	0.195	0.9669	7.8102	-1.5708	1.019	1.125	-0.027	1.000	1.588	-0.023	1.277	2.00	0.70	2.665	2.665	19.625	5	12.043	
20	64.982	-14	0.290	0.9669	7.8102	-1.5708	1.042	1.125	-0.027	1.000	1.420	-0.023	1.356	2.00	0.70	2.776	2.776	19.625	5	13.126	
20	64.982	-12	0.387	0.9669	7.8102	-1.5708	1.076	1.125	-0.027	1.000	1.465	-0.024	1.454	2.00	0.70	2.870	2.870	19.625	5	14.065	
20	64.982	-11	0.455	0.9669	7.8102	-1.5708	1.096	1.125	-0.027	1.000	1.493	-0.025	1.484	2.00	0.70	2.947	2.947	19.625	5	14.867	
20	64.982	-9.2678	0.489	0.9667	7.81	-1.571	1.122	1.125	-0.027	1.000	1.538	-0.025	1.511	2.00	0.70	3.039	3.039	19.625	5	15.853	
20	64.982	-8.635	0.549	0.9667	7.81	-1.571	1.155	1.125	-0.027	1.000	1.549	-0.026	1.569	2.00	0.70	3.197	3.119	19.625	5	16.735	
20	64.982	-7.8911	0.585	0.9667	7.81	-1.571	1.176	1.125	-0.027	1.000	1.573	-0.027	1.624	2.00	0.70	3.197	3.197	19.625	5	17.621	
20	64.982	-7.1089	0.623	0.9667	7.81	-1.571	1.201	1.125	-0.027	1.000	1.602	-0.027	1.670	2.00	0.70	3.272	3.272	19.625	5	18.492	
20	64.982	-6.365	0.659	0.9667	7.81	-1.571	1.225	1.125	-0.027	1.000	1.635	-0.027	1.714	2.00	0.70	3.349	3.349	19.625	5	19.400	
20	64.982	-5.7322	0.690	0.9667	7.81	-1.571	1.247	1.125	-0.027	1.000	1.669	-0.028	1.794	2.00	0.70	3.462	3.462	19.625	5	20.787	
20	64.982	-5.1234	0.719	0.9667	7.81	-1.571	1.270	1.125	-0.027	1.000	1.730	-0.029	2.001	2.00	0.70	3.562	3.562	19.625	5	22.053	
20	64.982	-4.1654	0.766	0.9667	7.81	-1.571	1.308	1.125	-0.027	1.000	1.781	-0.029	2.136	2.00	0.70	3.917	3.917	19.625	5	24.274	
20	64.982	-2.5429	0.844	0.9667	7.81	-1.571	1.378	1.125	-0.027	1.000	1.897	-0.031	2.269	2.00	0.70	4.145	4.145	19.625	5	26.842	
20	64.982	-0.8775	0.924	0.9667	7.81	-1.5708	1.459	1.125	-0.027	1.000	1.987	-0.033	2.335	2.00	0.70	4.321	4.321	19.625	5	30.146	
20	64.982	0	0.967	0.9669	7.8102	-1.5708	1.505	1.125	-0.027	1.000	2.050	-0.034	2.400	2.00	0.70	4.450	4.450	19.625	5	32.795	
20	64.982	0	0.967	0.9669	7.8102	-1.5708	1.505	1.125	-0.027	1.000	2.050	-0.034	2.400	2.00	0.70	4.450	4.450	19.625	5	34.816	

20.

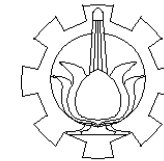
 $t = 7.8102 \text{ s}$ $x =$ 129.96 m

$d \text{ (m)}$	$x \text{ (m)}$	$Y \text{ (m)}$	$k(d+y)$	kd	t	$kx \cdot \sigma t$	$\cos(k(d+y))$	$\sin(kd)$	$\sin(kx \cdot \sigma t)$	$\cos(kx \cdot \sigma t)$	$V_{xc} \text{ (m/s)}$	$a_{xc} \text{ (m/s}^2\text{)}$	$V_{ymini} \text{ (m/s)}$	C_v	C_o	$V \text{ (m/s)}$	$M \text{ (m/s)}$	$A \text{ (m}^2\text{)}$	$D \text{ (m)}$	$Fr \cdot V_{xc} \text{ (ks}^2/\text{m)}$
20	129.964	-20	0.000	0.93669	7.8102	1.5708	1.000	1.125	0.027	1.000	1.362	0.023	0.732	2.00	0.70	2.094	2.094	19.625	5	89.43
20	129.964	-19	0.048	0.93669	7.8102	1.5708	1.001	1.125	0.027	1.000	1.364	0.023	0.987	2.00	0.70	2.321	2.321	19.625	5	10.774
20	129.964	-18	0.097	0.93669	7.8102	1.5708	1.005	1.125	0.027	1.000	1.368	0.023	1.133	2.00	0.70	2.500	2.500	19.625	5	12.370
20	129.964	-16	0.193	0.93669	7.8102	1.5708	1.019	1.125	0.027	1.000	1.388	0.023	1.277	2.00	0.70	2.665	2.665	19.625	5	13.976
20	129.964	-14	0.290	0.93669	7.8102	1.5708	1.042	1.125	0.027	1.000	1.420	0.023	1.356	2.00	0.70	2.776	2.776	19.625	5	15.052
20	129.964	-12	0.387	0.93669	7.8102	1.5708	1.076	1.125	0.027	1.000	1.465	0.024	1.454	2.00	0.70	2.870	2.870	19.625	5	16.054
20	129.964	-11	0.435	0.93669	7.8102	1.5708	1.096	1.125	0.027	1.000	1.493	0.025	1.484	2.00	0.70	2.947	2.947	19.625	5	16.893
20	129.964	-9.8776	0.489	0.9367	7.81	1.5708	1.122	1.125	0.027	1.000	1.528	0.025	1.511	2.00	0.70	3.039	3.039	19.625	5	17.927
20	129.964	-9.2678	0.519	0.9367	7.81	1.5708	1.138	1.125	0.027	1.000	1.549	0.026	1.569	2.00	0.70	3.119	3.119	19.625	5	18.338
20	129.964	-8.635	0.549	0.9367	7.81	1.5708	1.155	1.125	0.027	1.000	1.573	0.026	1.624	2.00	0.70	3.197	3.197	19.625	5	19.756
20	129.964	-7.8911	0.585	0.9367	7.81	1.5708	1.176	1.125	0.027	1.000	1.602	0.027	1.676	2.00	0.70	3.272	3.272	19.625	5	20.666
20	129.964	-7.1089	0.623	0.9367	7.81	1.5708	1.201	1.125	0.027	1.000	1.635	0.027	1.714	2.00	0.70	3.349	3.349	19.625	5	21.619
20	129.964	-6.3065	0.659	0.9367	7.81	1.5708	1.225	1.125	0.027	1.000	1.669	0.028	1.794	2.00	0.70	3.402	3.402	19.625	5	23.052
20	129.964	-5.7322	0.690	0.9367	7.81	1.5708	1.247	1.125	0.027	1.000	1.699	0.028	1.863	2.00	0.70	3.562	3.562	19.625	5	24.859
20	129.964	-5.1224	0.719	0.9367	7.81	1.5708	1.270	1.125	0.027	1.000	1.730	0.029	2.001	2.00	0.70	3.731	3.731	19.625	5	26.622
20	129.964	-4.1654	0.766	0.9367	7.81	1.5708	1.308	1.125	0.027	1.000	1.781	0.029	2.136	2.00	0.70	3.917	3.917	19.625	5	29.259
20	129.964	-2.5329	0.844	0.9367	7.81	1.5708	1.378	1.125	0.027	1.000	1.877	0.031	2.269	2.00	0.70	4.145	4.145	19.625	5	32.693
20	129.964	-0.8775	0.924	0.9367	7.81	1.5708	1.459	1.125	0.027	1.000	1.987	0.033	2.335	2.00	0.70	4.321	4.321	19.625	5	35.492
20	129.964	0	0.967	0.93669	7.8102	1.5708	1.505	1.125	0.027	1.000	2.050	0.034	2.400	2.00	0.70	4.450	4.450	19.625	5	37.596



PENAMPANG PENGAKU MELINTANG BESAR

SKALA 1 : 50



JURUSAN LIFITAS JALUR TERKIN SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUHNOPEMBER
SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

VARIASI
BUOYANCY WEIGHT RATIO (BWR)
PADA STRUKTUR SUBMERGED
FLOATING TUNNEL (SFT)

MAHASISWA

AGUS MARDI SANTOSO
3112105038

DOSEN PEMBIMBING

Endah Wahyuni ST, MSc, Ph.D

JUDUL GAMBAR

PENAMPANG PENGAKU
MELINTANG BESAR

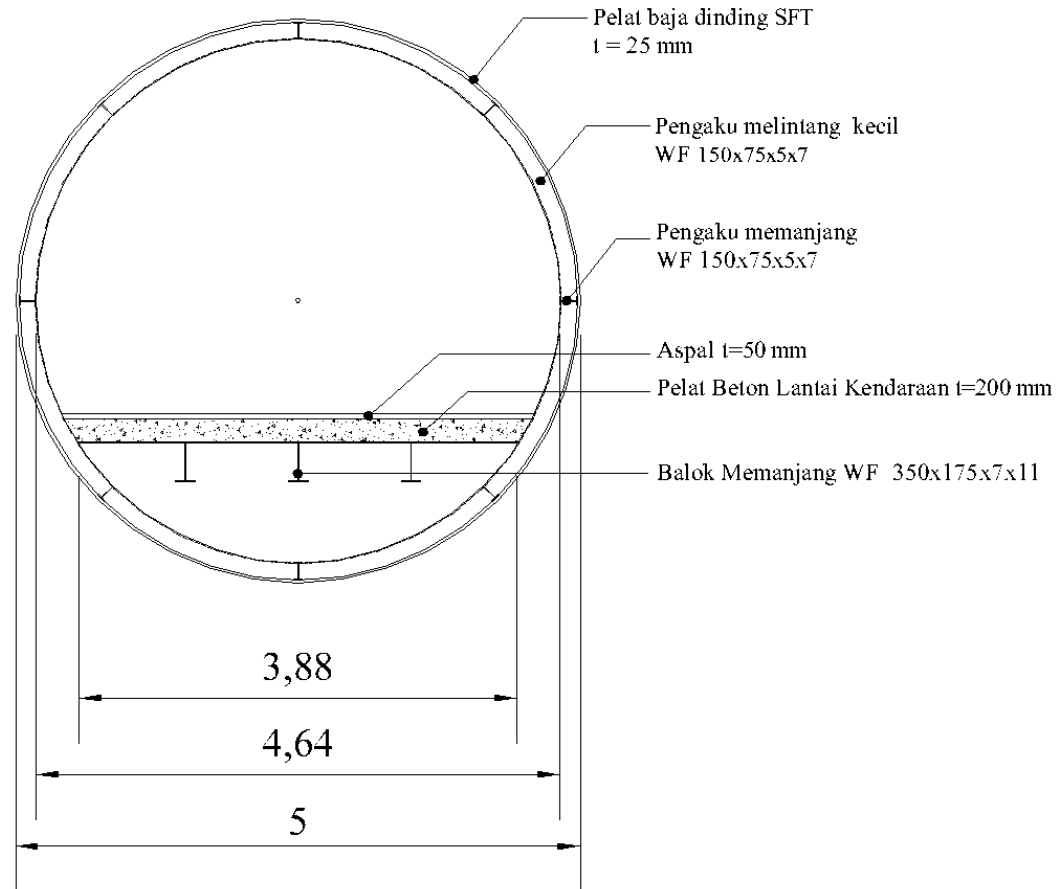
SKALA

1 : 50

SATUAN

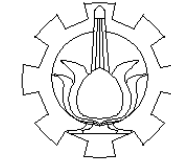
M

NO. GAMBAR



PENAMPANG PENGAKU MELINTANG KECIL

SKALA 1 : 50



JURUSAN LIFELAS JALUR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUHNOPEMBER
SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

VARIASI
BUOYANCY WEIGHT RATIO (BWR)
PADA STRUKTUR SUBMERGED
FLOATING TUNNEL (SFT)

MAHASISWA

AGUS MARDI SANTOSO
3112105038

DOSEN PEMBIMBING

Endah Wahyuni ST, MSc, Ph.D

JUDUL GAMBAR

PENAMPANG PENGAKU
MELINTANG KECIL

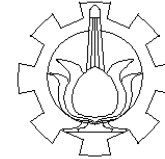
SKALA

1 : 50

SATUAN

M

NO. GAMBAR



JURUSAN LIFTAS JALUR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUHNOPEMBER
SURABAYA

JUDUL TUGAS AKHIR

VARIASI
BUOYANCY WEIGHT RATIO (BWR)
PADA STRUKTUR SUBMERGED
FLOATING TUNNEL (SFT)

MAHASISWA

AGUS MARDI SANTOSO
3112105038

DOSEN PEMBIMBING

Endah Wahyuni ST, MSc, Ph.D

JUDUL GAMBAR

POTONGAN MEMANJANG SFT

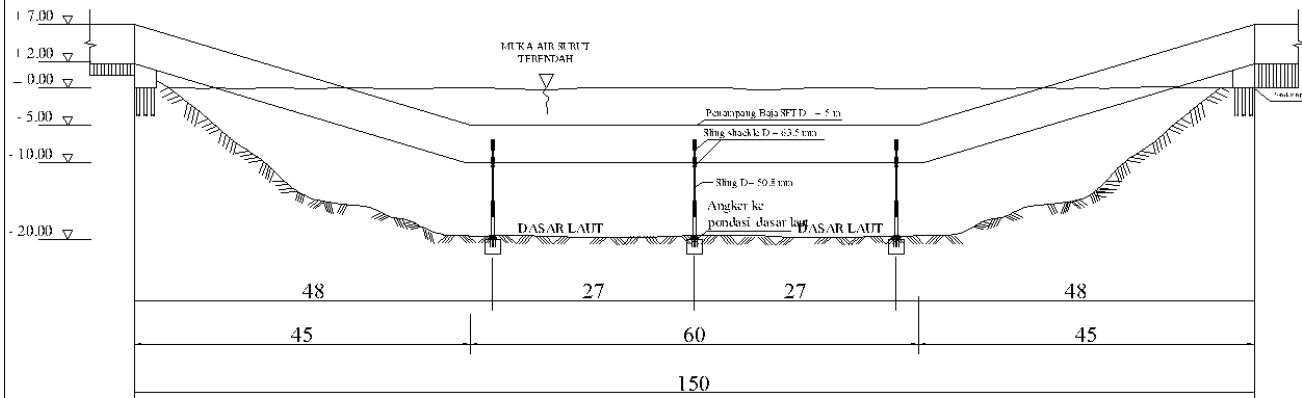
SKALA

1: 750

SATUAN

M

NO. GAMBAR



POTONGAN MEMANJANG SFT

SKALA 1 : 750

BIODATA PENULIS



Agus Mardi Santoso, dilahirkan di Kota Surabaya, pada Agustus 1988, dari ayah bernama Marlan dan ibu bernama Saimah, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Menempuh pendidikan formal di SDN Medokan Ayu I/270 Kota Surabaya, SMP Negeri 17 Surabaya, SMK Negeri 5 (STM Pembangunan) Surabaya jurusan Bangunan Gedung. Diploma III Teknik Sipil kerjasama Kementerian Pekerjaan Umum, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Merasa ilmu dalam bidang teknik sipil yang di dapat selama diploma masih kurang, maka penulis melanjutkan jenjang pendidikan Sarjana. Penulis diterima sebagai mahasiswa di Program Sarjana Lintas Jalur Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2012 terdaftar dengan NRP. 3112 105 038.