

**SIMULASI GAYA *DRAG* PADA *TWIN SUBMERGED FLOATING TUBE*
DENGAN *SOFTWARE* ANSYS FLUENT**

Oleh

FRID FORGHANJAYA

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister Teknik

Pada

Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

SIMULASI GAYA *DRAG* PADA *TWIN SUBMERGED FLOATING TUBE* DENGAN SOFTWARE ANSYS FLUENT

Oleh

FRID FORGHANJAYA

Penyeberangan antar pulau menjadi salah satu isu besar di Indonesia dan negara-negara kepulauan lainnya. Salah satu alternatif sarana penyeberangan antar pulau adalah *Submerged Floating Tunnel (SFT)*. Meskipun memiliki banyak keunggulan, minimnya data analisis dinamik, membuat ragu banyak pihak terhadap teknologi ini. Salah satu struktur SFT yang ditawarkan adalah terowongan model kembar atau model tandem (*twin tube*). Penelitian terkait model struktur terowongan kembar tersebut telah dilakukan diantaranya oleh Shi Deng, yang meneliti pengaruh rasio perbandingan diameter dengan jarak sumbu antar silinder terhadap karakteristik VIV. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak sumbu antar silinder, diameter, dan kedalaman pemasangan struktur silinder ganda terhadap gaya seret yang timbul. Penelitian ini dilakukan secara numerik dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Tiga macam silinder model yang digunakan berturut-turut berdiameter 76,2 mm, 63,5 mm dan 50,8 mm dengan panjang silinder (l) 600 m yang diposisikan horisontal. Disusun secara tandem dengan jarak pusat antara silinder hulu (*upstream*) dan silinder hilir (*downstream*), memakai notasi x , masing-masing adalah $\frac{1}{4} L$, $\frac{1}{2} L$, $\frac{3}{4} L$ dan $1L$. Dimana nilai L adalah parameter panjang gelombang ombak dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa resultan gaya seret kedua silinder memiliki nilai terkecil pada jarak sumbu antar silinder sebesar $\frac{1}{4} L$. Nilai gaya seret tiap silinder berbanding terbalik dengan kedalaman lokasi pemasangan, serta berbanding lurus dengan diameter tabung..

Kata kunci : *SFT, Twin-tube*, gaya seret, *Computational Fluid Dynamics*, panjang gelombang.

ABSTRACT

DRAG FORCE SIMULATION ON TWIN SUBMERGED FLOATING TUBE WITH ANSYS FLUENT SOFTWARE

By

FRID FORGHANJAYA

Inter-island crossing has become one of the major issues in Indonesia and other island states. One alternative means of inter-island crossing is the Submerged Floating Tunnel (*SFT*). Despite having many advantages, the minimality of dynamic analysis data, questioned many parties against this technology. One of the *SFT* structures offered is a twin-tube or tandem-tunnel model. Research related to the twin tunnel structure model has been carried out among others by Shi Deng, who has studied the effect of the ratio of diameter comparison with the axis distance between cylinders on the VIV characteristics. This study aims to determine the impact of the axis distance between cylinders, diameter, and depth of installation of the double cylinder structure on the resulting drag force. Using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method, three types of cylinders with diameters of 76.2 mm, 63.5 mm and 50.8 mm with a length of (l) 600 mm are placed horizontally. Arranged in tandem with the center distance between the upstream and downstream cylinders (using the x notation) respectively $1/4 L$, $1/2 L$, $3/4 L$ and $1L$. Where the value L is the parameter of the wavelength. The results of the study showed that the drag force resultant of both cylinder had the smallest value at the axis distance between the cylinders of $1/4 L$. The drag force value of each cylinder was inversely compared to the depth of the installation site, as well as compared straight to the diameter of the tube.

Keyword : *SFT*, Twin-tube, drag force, Computational Fluid Dynamics, wavelength

**SIMULASI GAYA *DRAG* PADA *TWIN SUBMERGED FLOATING TUBE*
DENGAN SOFTWARE ANSYS FLUENT**

Oleh

FRID FORGHANJAYA

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister Teknik

Pada

Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul Tesis : SIMULASI GAYA *DRAG* PADA
TWIN SUBMERGED FLOATING
TUBE DENGAN SOFTWARE
ANSYS FLUENT

Nama Mahasiswa : Frid Forghanjaya

Nomor Pokok Mahasiswa : 2125021003

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II



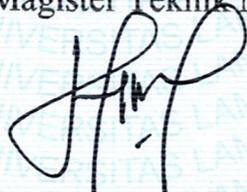
Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.
NIP. 196908011999031002



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

MENGETAHUI

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



Dr. Harmen, S.T., M.T.
NIP. 196906202000031001

Lembar Pengesahan

1. Tim Penguji

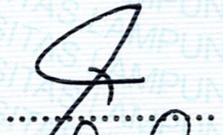
Ketua : **Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.**



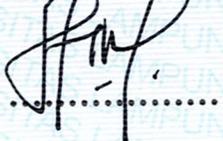
Anggota Penguji : **Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph.D.**



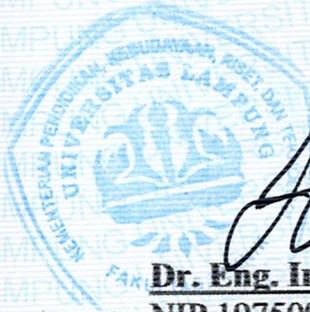
Penguji Utama I : **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.**



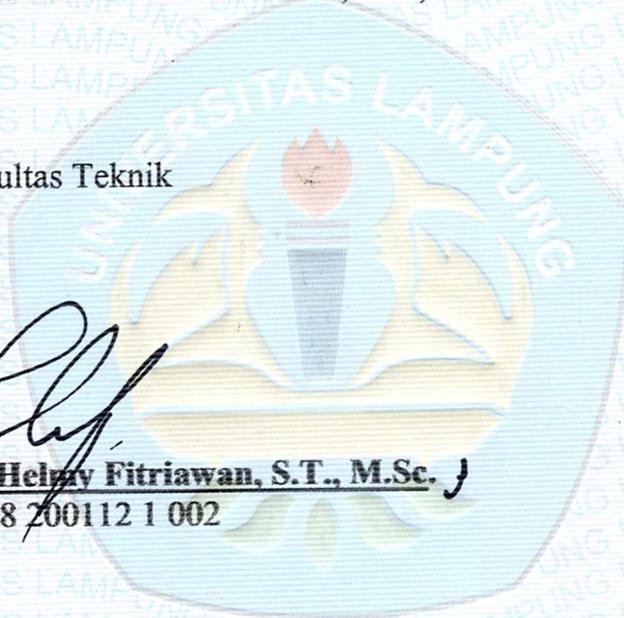
Penguji Utama II : **Dr. Harmen, S.T., M.T.**



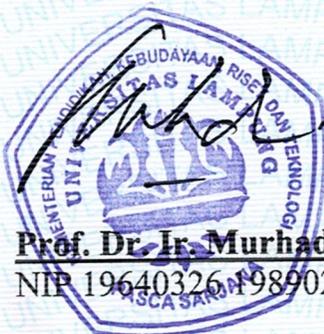
2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. J
NIP 19750928 200112 1 002



3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP 19640326 198902 1 001

Tanggal Lulus Ujian Tesis: **19 Desember 2023**

PERNYATAAN PENULIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam Naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Bandar Lampung, 28 November 2023

Yang Membuat,



Frid Forghanjaya
NPM 2125021003

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Frid Forghanjaya Titisa, dilahirkan di Jakarta pada tanggal 18 Mei 1979 dan merupakan anak bungsu dari dua bersaudara dari pasangan Thomas Notoatmodjo dan Irine Sri D. Penulis mengawali pendidikan di Sekolah Dasar Santo Antonius Jakarta Timur, dan lulus pada tahun 1991. Selanjutnya menempuh pendidikan di Sekolah Menengah Pertama Kolese Kanisius Jakarta selama 3 tahun sampai tahun 1994. Kemudian melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Atas Kolese Johannes de Britto Yogyakarta hingga lulus di tahun 1997.

Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Program Studi D3 Teknik Mesin Akademi Teknik Mesin Industri (ATMI) Surakarta pada tahun 1997 dan menyelesaikan program studi D3 pada tahun 2000.

Selepas lulus D3, penulis bekerja di PT. Selamat Sempurna Jakarta sebagai pengajar di *Automotive Diesel Radiator Training Center* (ADR TC) selama 2 tahun. Penulis kemudian melanjutkan bekerja di CV. Karya Hidup Sentosa selama 10 tahun berikutnya sebagai Engineering yang bertanggungjawab terhadap desain dan pembuatan (machining) alat bantu (Tool Dies) produksi Traktor tangan QUICK. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan bekerja di Sekolah Vokasi Sugar Group Companies sampai saat ini.

Karena kesibukan bekerja selepas lulus D3, penulis baru mendapat kesempatan melanjutkan pendidikan ke jenjang S1 pada tahun 2014 di Universitas Muhammadiyah Metro dan lulus pada tahun 2016. Tahun 2021 Penulis mendapatkan beasiswa dari perusahaan untuk melanjutkan pendidikan magister di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung (UNILA) dengan mengambil konsentrasi konstruksi dan perancangan. Sebagai tugas akhir (tesis) Penulis melakukan penelitian dengan judul *Simulasi Gaya Drag Pada Twin Submerged Floating Tube Dengan Software ANSYS Fluent* di bawah bimbingan Dr. Jamiatul Akmal dan Dr. Asnawi Lubis.

MOTTO

“ Every truth has four corners: as a teacher I give you one corner, and it is for you to find the other three. ”

~ Confucius

"Mintalah, maka akan diberikan kepadamu, carilah, maka kamu akan mendapat, ketoklah, maka pintu akan dibukakan bagimu. Karena setiap orang yang meminta, menerima dan setiap orang yang mencari, mendapat dan setiap orang yang mengetok, baginya pintu dibukakan."

~ Matius 7 : 7 - 8

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmatNya sehingga penulis mampu menyelesaikan tesis dengan lancar dan tetap dalam keadaan sehat. Tesis ini dibuat sebagai sebuah karya tulis yang merupakan hasil dari pengerjaan tugas akhir yang telah dilakukan. Diharapkan karya tulis ini dapat menjadi salah satu bentuk perkembangan dalam ilmu di bidang mekanika, terkhusus dalam bidang mekanika struktur. Tesis ini juga merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik pada jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Semoga karya tulis ini dapat membawa manfaat bagi pembacanya dan dapat dikembangkan lebih jauh lagi.

Selesainya tesis ini berkat bantuan, bimbingan dan arahan dari banyak pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Juli Kurnia Jati dan Alejandro Farren, istri dan anak tercinta yang selalu mendukung dan memberikan kebahagiaan bagi penulis..
2. Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I Tesis yang telah memberikan masukan dan bimbingannya kepada penulis sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Dr. Asnawi Lubis selaku Dosen Pembimbing II Tesis yang memberikan koreksi dan bimbingan yang bermanfaat bagi penulis.
4. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Utama.

5. Dr. Harmen, S.T., M.T selaku Ketua Prodi Magister Teknik Mesin Universitas Lampung sekaligus Dosen Anggota Penguji.
6. Segenap Pimpinan, dosen, dan staf pengajar Magister Teknik Mesin Universitas Lampung
7. Rekan-rekan Tim Laboratorium Mekanika Struktur yang banyak memberikan bantuan pada penelitian ini.
8. Rekan-rekan mahasiswa Magister Teknik Mesin angkatan 2021 yang telah memberikan banyak bantuan dan dukungan.
9. Semua pihak yang telah membantu penulis namun tidak bisa disebutkan namanya satu persatu, penulis ucapkan terima kasih semoga Tuhan Yang Maha Pengasih membalas segala kebaikan kalian.

Penulis menyadari bahwa isi tesis ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan tesis ini. Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Bandar Lampung, 28 November 2023

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
PERNYATAAN PENULIS	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
MOTTO	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR SIMBOL	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Sistematika Penulisan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Struktur Submerged Floating Tunnel	8
2.2 Teori Gelombang	9
2.2.1 Teori gelombang amplitudo kecil	11
2.2.2 Teori gelombang non linear	13
2.2.3 Profil muka air dan cepat rambat gelombang.	17
2.3 Beban Hidrodinamik	19
2.3.1 Gaya Seret (<i>Drag force</i>)	20
2.3.2 Gaya Inersia	23
2.3.3 Bilangan KC	25

2.3.4	Efek kekasaran permukaan silinder.....	28
2.3.5	Perhitungan Gaya Hidrodinamik	30
2.4	Teori Open Channel Wave BC (<i>Boundary Condition</i>)	36
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	38
3.1	Waktu dan Tempat	38
3.2	Parameter Penelitian.....	39
3.3	Finite Elemen Method (ANSYS <i>Fluent Open Channel Wave</i>).....	41
3.3.1	Preprocessing	42
3.3.2	Solution	44
3.3.3	Postprocessing.....	58
3.4	Target Hasil Simulasi	60
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	61
4.1	Validasi.....	61
4.2	Hasil.....	67
4.3	Pembahasan	71
4.3.1	Pengaruh Jarak Antar Silinder Terhadap Gaya <i>Drag</i>	72
4.3.2	Pengaruh Diameter Silinder Terhadap Gaya <i>Drag</i>	79
4.3.3	Pengaruh Kedalaman Silinder Terbenam Terhadap Gaya <i>Drag</i>	81
4.3.4	Perbandingan dengan Data Hasil Eksperimen	84
4.3.5	Pengaruh Jarak Antar Silinder Terhadap Laju Aliran Streamline ..	90
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	94
5.1	Kesimpulan.....	94
5.2	Saran.....	95
DAFTAR PUSTAKA	96

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi Submerged Floating Tunnel atau SFT (Norwegian Public Road Administration (NPRA), 2012)	8
Gambar 2.2 Jenis sistem penahan SFT: (a) <i>SFT with pontoons</i> ; (b) <i>SFT support on columns</i> ; (c) <i>SFT with tethers to the bottom</i> ; (d) <i>SFT unanchored</i>	9
Gambar 2.3 Sketsa definisi gelombang.....	11
Gambar 2.4 Klasifikasi teori gelombang	13
Gambar 2.5 Bentuk variasi profil gelombang (Mehaute, 1976)	14
Gambar 2.6 Daerah validasi untuk bermacam teori gelombang (Mehaute, 1976) 14	
Gambar 2.7 Perbandingan orde kedua (Stokes) dengan teori linier (Airy) (Triatmodjo, 1999)	15
Gambar 2.8 Profil gelombang soliter	16
Gambar 2.9 Profil gelombang Cnoidal	17
Gambar 2.10 Profil perambatan gelombang dan orbit partikel pada gelombang Airy (Triatmodjo, 2010).....	18
Gambar 2.11 Gerak orbit partikel di laut dangkal, transisi dan dalam. (Triatmodjo, 2010)	19
Gambar 2.12 (a) Aliran air melewati silinder sirkular dan (b) Notasi untuk menentukan gaya <i>drag</i> & gaya lift pada silinder sirkular.	21
Gambar 2.13 Grafik Nilai koefisien seret (<i>drag</i>) untuk silinder melingkar sebagai fungsi dari bilangan Reynold	22
Gambar 2.14 Tipe pola aliran dari grafik pada Gambar 2.13	23
Gambar 2.15 Variasi gaya seret dan inersia (Sumer, B.M. and FredsØe, 2006) .	26
Gambar 2.16 Wilayah penerapan gaya inersia dan seret (Sundar, 2016).	27
Gambar 2.17 Sebuah plot ulang data Keulegan-Carpenter, yaitu (a) Koefisien seret, (b) Koefisien inersia sebagai fungsi bilangan Re dan KC, (Sarpkaya, 2010)	28
Gambar 2.18 Efek kekasaran permukaan pada koefisien gaya <i>in-line</i> . Data eksperimen dari Justesen di tahun 1989.....	29

Gambar 3.1 Diagram alur penelitian	39
Gambar 3.2 Ilustrasi parameter dan profil gelombang.....	40
Gambar 3.3 Gambar peralatan kolam ombak yang dimiliki Laboratorium Mekanika Struktur, Teknik Mesin, Universitas Lampung.....	40
Gambar 3.4 ANSYS Workbench Fluid Flow (Fluent).....	42
Gambar 3.5 Contoh Geometri yang dibuat di ANSYS	43
Gambar 3.6. Pemberian label kondisi batas simulasi.....	44
Gambar 3.7 Proses meshing geometri simulasi	44
Gambar 3.8 Tampilan awal <i>Setup ANSYS Fluent</i>	45
Gambar 3.9 Kotak dialog <i>Setup : General</i>	45
Gambar 3.10 Pemilihan material (fluida).....	46
Gambar 3.11 Pengaturan <i>Multiphase : Models</i>	47
Gambar 3.12 Pengaturan <i>Multiphase : Phase Interaction</i>	47
Gambar 3.13 Pengaturan parameter <i>Viscous</i>	48
Gambar 3.14 <i>Boundary Condition dialog box</i> untuk silinder kembar.	49
Gambar 3.15 Velocity Inlet.....	50
Gambar 3.16 Pengaturan parameter <i>velocity inlet</i> bagian <i>multiphase</i>	50
Gambar 3.17 Input perintah pada Console.....	51
Gambar 3.18 Informasi pada console untuk memeriksa input parameter ombak .	51
Gambar 3.19 Pengaturan <i>Pressure Outlet</i>	52
Gambar 3.20 Pengaturan tipe <i>Wall</i> untuk kondisi batas <i>Sky, Wall, Upstream</i> dan <i>Downstream Cylinder</i>	52
Gambar 3.21 Pengaturan parameter <i>Numerical beach</i>	53
Gambar 3.22 <i>Reference Values</i>	54
Gambar 3.23 Parameter <i>Solution method</i>	55
Gambar 3.24 Cara memilih <i>Drag force</i> pada <i>Report definition</i>	55
Gambar 3.25 Pengaturan <i>Report Definition Drag Force</i>	56
Gambar 3.26 Parameter <i>Initialization</i>	57
Gambar 3.27 Run Calculation.....	58
Gambar 3.28 Ansys Fluent Simulation Report	59
Gambar 3.29 Solusi status hasil simulasi yang telah konvergen	59
Gambar 3.30 <i>File notepad</i> hasil simulasi.....	60

Gambar 4.1 Nilai gaya <i>drag</i> , gaya inersia dan gaya Morison hasil simulasi matlab proses validasi 1	64
Gambar 4.2 ANSYS Fluent Simulation Report untuk proses validasi 1	64
Gambar 4.3 ANSYS Fluent Simulation Report untuk proses Validasi 2	65
Gambar 4.4 Nilai gaya <i>drag</i> , gaya inersia dan gaya Morison hasil simulasi Matlab proses validasi 2	66
Gambar 4.5 Grafik gabungan Nilai gaya <i>drag</i> F_d , gaya inersia F_i dan gaya Morison F_t hasil simulasi Matlab Proses Validasi 2	66
Gambar 4.6 Grafik Nilai gaya <i>drag</i> untuk silinder kembar \varnothing 3” pada kedalaman z 100 mm.	69
Gambar 4.7 Grafik Nilai gaya <i>drag</i> untuk silinder kembar \varnothing 2.5” pada kedalaman z 100 mm.....	69
Gambar 4.8 Grafik Nilai gaya <i>drag</i> untuk silinder kembar \varnothing 2” pada kedalaman z 100 mm.	70
Gambar 4.9 Grafik Nilai gaya <i>drag</i> untuk silinder kembar \varnothing 3” pada kedalaman z 200 mm	70
Gambar 4.10 Grafik Nilai gaya <i>drag</i> untuk silinder kembar \varnothing 2.5” pada kedalaman z 200 mm	70
Gambar 4.11 Grafik Nilai gaya <i>drag</i> untuk silinder kembar \varnothing 2” pada kedalaman z 200 mm.....	71
Gambar 4.12 Contoh Grafik Simulasi ANSYS untuk Gaya <i>drag</i> pada kedua silinder (fd1 dan fd) untuk t=5 s/d 16.25 detik	72
Gambar 4.13 Contoh nilai gaya <i>drag</i> hasil simulasi ANSYS untuk silinder kembar, diameter 3 inchi , kedalaman z 100mm dan jarak antar silinder $x = \frac{1}{2} L$	72
Gambar 4.14 Grafik Nilai Gaya <i>Drag</i> pada Silinder Kembar dengan Variasi Jarak Antar Silinder pada (a) kedalaman 100 mm dan (b) kedalaman 200 mm	73
Gambar 4.15 Aliran vortex pada pipa	76
Gambar 4.16 Beda fase kedua silinder dengan variasi jarak antar sumbu silinder : a) jarak $x = \frac{1}{4} L$, b) jarak $x = \frac{1}{2} L$, c) jarak $x = \frac{3}{4} L$, d) jarak $x = 1L$	78

Gambar 4.17 Grafik (a) kecepatan dan (b) percepatan partikel untuk tiap kedalaman pada kolam ombak dalam penelitian ini.	84
Gambar 4.18 Laju Aliran streamline yang diterima kedua silinder dengan variasi jarak antar sumbu silinder : a) jarak $x = 1L$, b) jarak $x = \frac{3}{4} L$, c) jarak $x = \frac{1}{2} L$, d) jarak $x = \frac{1}{4} L$	91
Gambar 4.19 Laju Aliran streamline 3D sesuai gambar 4.17 : a) jarak $x = 1L$, b) jarak $x = \frac{3}{4} L$, c) jarak $x = \frac{1}{2} L$, d) jarak $x = \frac{1}{4} L$	92
Gambar 4.20 Kontur ombak hasil simulasi ANSYS Fluent dengan metode VOF93	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai Koefisien massa hidrodinamik untuk beberapa bentuk penampang (Sumer, B.M. and FredsØe, 2006)	24
Tabel 2.2 rumus kecepatan dan percepatan partikel air berdasarkan kedalaman relatif.	32
Tabel 2.3 Nilai C_M dan C_D yang direkomendasikan <i>US Army Coastal Engineering Center</i>	35
Tabel 3.1 Parameter Simulasi.....	41
Tabel 4.1 Parameter untuk validasi	62
Tabel 4.2 Nilai validasi Gaya <i>drag</i> menggunakan parameter Validasi 1	62
Tabel 4.3 Nilai gaya <i>drag</i> , inersia dan Morison dari proses validasi 2.....	65
Tabel 4.4 Nilai Gaya <i>Drag</i> Hasil Simulasi ANSYS Fluent untuk Silinder kembar berdiameter 3, 2.5, dan 2 inchi pada kedalaman 100 mm dengan variasi jarak sumbu	68
Tabel 4.5 Nilai Gaya <i>Drag</i> Hasil Simulasi ANSYS Fluent untuk Silinder kembar berdiameter 3, 2.5, dan 2 inchi pada kedalaman 200 mm dengan variasi jarak sumbu	68
Tabel 4.6 Nilai Gaya <i>Drag</i> Hasil Simulasi ANSYS Fluent untuk Silinder kembar diameter 3 inchi pada kedalaman 0.1m, 0.2m, dan 0.3m dengan variasi jarak sumbu	81
Tabel 4.7. Nilai Gaya <i>Morison</i> Hasil Eksperimen untuk Silinder kembar berdiameter 2.5 inchi pada kedalaman 200 mm dengan variasi jarak sumbu.....	84
Tabel 4.8 Nilai Parameter <i>KC-ka- Re</i> Penelitian	85
Tabel 4.9 Nilai Koefisien <i>Drag</i> untuk Silinder <i>Upstream</i> dan <i>Downstream</i> pada kedalaman z 0.1m.....	87
Tabel 4.10 Nilai Koefisien <i>Drag</i> untuk Silinder <i>Upstream</i> dan <i>Downstream</i> pada kedalaman z 0.2m.....	87

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
φ	Potensial Kecepatan	m/s
η	Profil Muka Air	m, mm
d	Kedalaman air	m, mm
a, A	Amplitudo	m, mm
x	Jarak Horisontal titik yang ditinjau	m, mm
y	Jarak Vertikal titik yang ditinjau	m, mm
k	Bilangan Gelombang	
L	Panjang Gelombang	m, mm
ω	Frekuensi Gelombang	Rad/s
T	Periode	s
g	Percepatan gravitasi	m/s ²
t	Waktu	s
c	Cepat Rambat Gelombang	s
F_D atau f_d	Gaya <i>drag</i>	N
ρ	Densitas	kg/m ³
D	Diameter Silinder	inch, mm
C_D	Koefisien <i>Drag</i>	-
C_M	Koefisien Inersia	-
u atau v atau u_x	Kecepatan partikel air arah horisontal	m/s
Re	Bilangan Reynold	-
ν	Viskositas Kinematik Fluida	m ² /s
f_{fk}	Gaya <i>Froude-Krylov</i>	N
f_{mh}	Gaya Massa Hidrodinamik	N
A	Luas Area	m ²
\ddot{u} atau \ddot{v} atau a_x	Percepatan partikel air arah horisontal	m/s ²
F_I	Gaya inersia	N
KC	Bilangan Keulegan-Carpenter	-

ka	Parameter Penyebaran	-
H, ζ	Tinggi gelombang	m, mm
l	Panjang Silinder	m, mm
z	Kedalaman silinder	m, mm
F_T	Gaya Morison	N
ω_e	Frekuensi Gelombang Efektif	m, mm
ϵ	Perbedaan Fase	m, mm

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dikutip dari laman Direktorat Pendayagunaan Pesisir dan Pulau-Pulau Kecil, Indonesia merupakan negara kepulauan dengan jumlah 16.671 pulau yang dilaporkan ke PBB melalui sidang UNGEGN (*United Nation Group of Expert on Geographical Names*) pada tahun 2019. Jumlah tersebut bertambah menjadi 16.771 pulau pada tahun 2020 seperti tertera pada Gasetir Nasional (daftar nama rupabumi yang telah dibakukan secara nasional menurut Perpres 112 / 2006). Dengan banyaknya pulau tadi, penyeberangan antar pulau menjadi salah satu isu besar di Indonesia dan negara-negara kepulauan lainnya. Berbagai macam gagasan dan ide telah diajukan sebagai sarana penyeberangan antar pulau, di antaranya adalah jembatan dan terowongan bawah laut. Tetapi tidak semua lokasi memungkinkan untuk dibangun jembatan dan terowongan bawah laut, jarak penyeberangan dan kedalaman laut menjadi faktor yang dipertimbangkan untuk merealisasikannya. Meningkatnya jarak dan kedalaman berbanding lurus dengan meningkatnya risiko keamanan dan biaya konstruksi.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, para peneliti memunculkan ide untuk membangun sebuah struktur berupa terowongan apung terendam yang dikenal sebagai *Submerged Floating Tunnel* (SFT). Ada 4 jenis SFT yang ditempatkan di bawah permukaan air, dimana posisinya dipertahankan menggunakan tali tambat, tiang pancang, pelampung/ponton, ataupun tanpa

penguat (Arthi & Murugeswari, 2012). Struktur SFT dapat digunakan terutama pada kondisi dasar laut yang berbatu, terlalu dalam atau terlalu jauh jarak antar tepinya. SFT merupakan konsep baru yang belum pernah digunakan sebelumnya, bahkan untuk jarak dekat. Dibandingkan dengan jembatan dan terowongan konvensional, SFT memiliki banyak keuntungan (Jiang et al., 2018), di antaranya biaya konstruksi yang rendah, waktu konstruksi yang cepat, ramah lingkungan, dapat dipindahkan dan digunakan kembali (Budiman et al., 2017). Selain itu konsep jalur silinder terbenam mengambang dalam laut seperti SFT tidak hanya dapat digunakan untuk jalur transportasi manusia (Zambon, 2019), konsep serupa dapat digunakan untuk jalur kabel dan pipa bawah laut (Shankar et al., 1988) yang melalui perairan yang terlalu dalam dan dengan dasar yang berbatu. Salah satu struktur SFT yang ditawarkan adalah terowongan model kembar atau model tandem (*twin tube*). Model SFT Silinder kembar dipilih karena hasil tes untuk struktur tersebut menunjukkan perilaku yang stabil di bawah aksi arus dan gelombang, sehingga mengurangi kebutuhan akan solusi desain tambahan untuk menghilangkan gerakan yang tidak terkendali (Olsen et al., 2016). Adanya dua jalur dapat digunakan untuk jalur pergi dan pulang. Selain itu saat terjadi gangguan atau masalah pada salah satu jalur, maka jalur lainnya dapat digunakan sebagai sarana keluar dari jalur tersebut. Namun, konsep struktur ini juga memiliki berbagai jenis gangguan, salah satunya adalah gelombang laut. Eksperimen terhadap pengaruh gelombang permukaan memakai fenomena banjir dan Particle Image Velocimetry (PIV), telah dilakukan untuk memeriksa aliran wake dari silinder sirkular dekat dengan permukaan bebas (Sheridan et al., 1997). Dalam penelitian lainnya (Reichl et al., 2005) digunakan model numerik dua

dimensi untuk menyelidiki interaksi antara permukaan air dan silinder sirkular dalam aliran Reynolds yang rendah ($Re = 180$). Ditemukan bahwa Frekuensi pembuangan vortex di belakang silinder tergantung pada besar bilangan Froude serta jarak antara silinder dan permukaan air. Gelombang laut merupakan gangguan utama pada struktur SFT, khususnya untuk SFT yang terletak di laut dengan arus yang cukup kuat dan gelombang yang cukup tinggi. Turbulensi gelombang yang terlalu besar dan SFT yang dihasilkan dengan desain yang tidak tepat akan menyebabkan getaran berlebihan pada struktur dan akan terjadi kerusakan. Permasalahan *vortex-induced vibration* (VIV) yang terjadi pada silinder fleksibel panjang di medan gelombang dan aliran seperti SFT, tambatan, dan pipa bawah laut harus menjadi perhatian khusus. Hal ini disebabkan karena gaya eksitasi yang disebabkan oleh ketidak stabilan arus yang ditandai dengan timbulnya vorteks air secara periodik, akan menyebabkan terjadinya getaran pada struktur silinder. Selanjutnya getaran tersebut akan meningkatkan gaya hambat yang bekerja pada struktur. Jika hal ini terus terjadi, kerusakan kelelahan dapat terjadi pada struktur tersebut (Bearman, 2011).

Dengan menggunakan persamaan Morison dapat diukur besar gaya hidrodinamik pada tiang pancang atau struktur di pantai yang terkena ombak. Dengan menggunakan persamaan tersebut dan spektrum arah gelombang permukaan, dilakukan dua eksperimen skala kecil untuk melihat seberapa terpercaya perhitungan prediksi persamaan Morison dengan beban aktual, dengan hasil akhir bahwa persamaan ini sangat efektif baik untuk silinder vertikal ataupun horizontal (Boccotti et al., 2013). Artinya persamaan Morison juga efektif diterapkan pada struktur SFT yang terbenam memanjang di dalam laut. Selain itu karena

perkembangan teknologi komputer, dapat dilakukan simulasi numerik langsung dari interaksi gelombang-struktur berdasarkan model Navier-Stokes (N-S). Pemodelan numerik dalam CFD dapat menyajikan lebih banyak informasi lokal dibandingkan dengan eksperimen, karena kekuatan dan sifat aliran dapat diperoleh dari setiap titik dalam domain komputasi. Selain itu, mereka jauh lebih mudah dimodifikasi, apakah itu perubahan geometris atau fisik. Metodologi CFD dengan demikian menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan dengan pengujian atau eksperimen. Ini termasuk biaya, kecepatan dan peningkatan kemampuan untuk merubah model yang ada (Eriksson, 2017).

Sementara penelitian untuk model struktur terowongan kembar juga telah dilakukan yaitu studi numerik interaksi *Vortex Induced Vibrations* (VIV) antara empat silinder tegak fleksibel dengan konfigurasi *in line square* dalam aliran uniform (Rahmawati et al., 2012). Kemudian di tahun 2020 dilakukan penelitian tentang hubungan rasio antara diameter silinder dengan jarak antar sumbu dua silinder terhadap respon *Vortex Induced Vibrations* telah dilakukan (Chu et al., 2020). Dalam studi tersebut, elemen terowongan terapung disajikan dalam bentuk yang disederhanakan sebagai model dua silinder tandem yang digabungkan secara kaku. Pengujian getaran bebas dari model silinder kembar dua dimensi dengan rasio jarak yang berbeda dalam arah aliran silang (*cross flow*) dilakukan untuk memeriksa karakteristik VIV SFT. Respon amplitudo dan gaya angkat diukur dengan sensor perpindahan linier dan transduser gaya masing-masing. Keandalan pengaturan eksperimental pertama kali diverifikasi dengan membandingkan hasil eksperimen dari model dua silinder tetap tandem dan model silinder tunggal yang didukung secara elastis dengan data yang dipublikasikan dalam literatur.

Selanjutnya secara kolektif diperiksa torsi yang dihasilkan dari respons VIV, gaya angkat silinder hulu (*upstream cylinder*) dan silinder hilir (*downstream cylinder*), serta perbedaan gaya angkat pada rasio jarak yang berbeda, dibandingkan dengan hasil silinder tunggal.

Berkaitan dengan penelitian Deng (2020), penulis bermaksud melakukan penelitian dalam bentuk simulasi untuk melihat gaya *drag* yang diterima silinder hulu dan silinder hilir akibat perubahan rasio jarak antar sumbu *twin tube* terhadap panjang gelombang air. Sementara rekan lain juga melakukan penelitian yang sama namun dalam bentuk eksperimen. Hipotesis awal adalah terdapat korelasi antara jarak sumbu kedua silinder (*twin tube* atau tabung kembar) dengan panjang gelombang air. Dimana pada jarak sumbu tertentu dihasilkan gaya hidrodinamik terkecil yang diterima kedua silinder. Untuk membuktikan hipotesis tersebut maka penulis melakukan penelitian dengan metode simulasi menggunakan software *ANSYS Fluent 2023 R1*. Parameter geometri yang digunakan mengacu pada alat uji dan kolam ombak yang ada di Laboratorium Mekanika Struktur Teknik Mesin Universitas Lampung. Adapun parameter yang digunakan meliputi: panjang gelombang (L), tinggi gelombang (H) serta periode gelombang (T) yang dihasilkan pembangkit pada kolam ombak, lalu diameter (D) serta panjang (l) *twin tube*, kedalaman (d) air pada kolam ombak, kedalaman letak silinder (z), dan jarak sumbu (x) *twin tube*. Sedangkan parameter yang divariasikan adalah diameter *twin tube*, jarak sumbu *twin tube*, dan kedalaman letak silinder. Selain mengetahui besar gaya seret (gaya *drag*) yang diterima silinder hulu (*upstream cylinder*) dan silinder hilir (*downstream cylinder*) akibat pengaruh rasio jarak sumbu *twin tube* terhadap panjang gelombang air, dari

penelitian ini juga dapat diketahui pengaruh perubahan diameter dan kedalaman silinder dari permukaan air terhadap besar gaya *drag* tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dapat dirumuskan permasalahan yaitu bagaimanakah besar gaya seret (*drag*) yang diterima kedua silinder dengan perubahan rasio jarak sumbu *twin tube* terhadap panjang gelombang air.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besar gaya *drag* yang diterima kedua silinder dengan perubahan rasio jarak sumbu *twin tube* terhadap panjang gelombang air dengan menggunakan software *ANSYS Fluent*.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian yang penulis lakukan dibatasi dalam beberapa hal, yaitu:

- 1) Penulis hanya melakukan analisis gaya *drag* hasil simulasi menggunakan ANSYS Fluent 2023 R1.
- 2) Karakteristik ombak yang digunakan sesuai dengan alat yang menjadi rujukan yaitu peralatan kolam ombak yang dimiliki oleh Laboratorium Mekanika Struktur Teknik Mesin, Universitas Lampung.
- 3) Perhitungan gaya ombak diformulasikan menggunakan teori Morison.
- 4) Proses meshing maksimal menggunakan 512000 cell.
- 5) Simulasi tidak memperhitungkan kekasaran permukaan silinder (setting mengikuti default ANSYS Fluent)

- 6) Gangguan pada silinder hanya berupa gelombang air, dengan arah gelombang datang hanya dari depan silinder *upstream* dan diasumsikan *uniform*.

1.5 Sistematika Penulisan

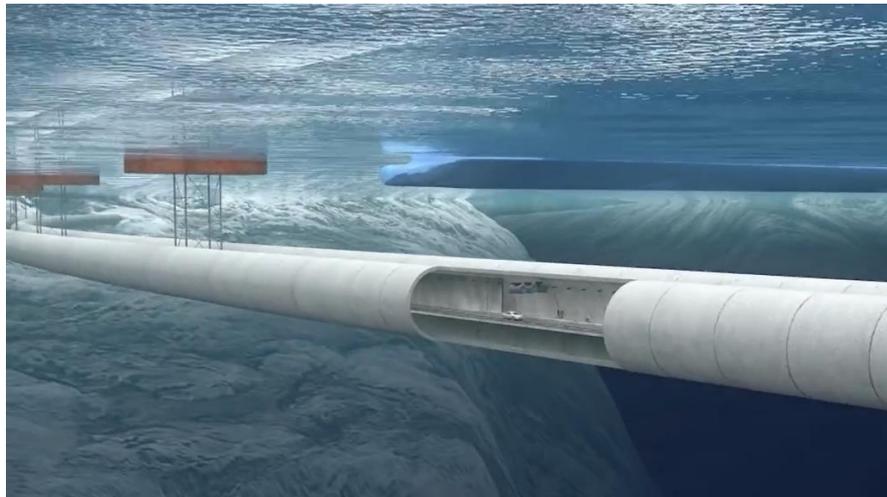
Laporan tesis ditulis dalam 5 bab dengan sistematika penulisan diawali bagian Pendahuluan. Pada bagian ini dijelaskan secara singkat latar belakang dilakukannya penelitian. Kemudian dijelaskan pula secara singkat mengenai metode yang akan digunakan dan batasannya. Bab selanjutnya adalah Tinjauan Pustaka yang berisi tentang teori dasar yang digunakan untuk dapat menunjang penelitian. Teori tersebut meliputi : Struktur SFT, teori gelombang, beban hidrodinamis, dan *open wave channel* pada ANSYS. Metodologi Penelitian yang ditulis ke dalam Bab 3, menjabarkan tahapan yang dilakukan untuk mendapatkan hasil penelitian. Termasuk di dalamnya adalah agenda dan rancangan waktu penelitian. Setelah data penelitian diperoleh, hasilnya akan ditulis ke dalam Bab 4 yang berisi Hasil dan Pembahasan. Data hasil penelitian dijabarkan pada awal bab ini dan dilanjutkan dengan pembahasan hasil yang telah didapatkan. Untuk Bab terakhir berisi kesimpulan penelitian ini yang dituliskan secara ringkas dan jelas, lalu dilanjutkan dengan saran untuk kelanjutan penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Struktur Submerged Floating Tunnel

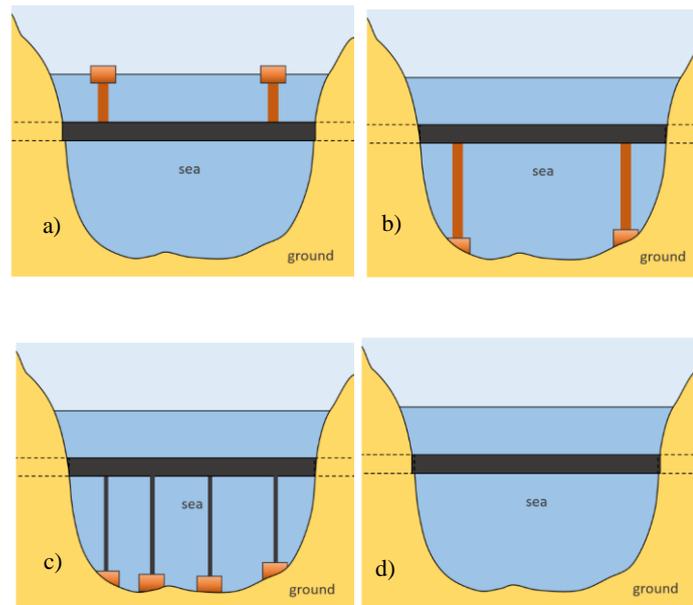
Submerged Floating Tunnel atau SFT adalah sebuah konsep baru di bidang infrastruktur transportasi. Konsep ini meletakkan sebuah struktur tabung yang ditempatkan di bawah permukaan air pada kedalaman tertentu menggunakan gaya apung Archimedes sebagai daya dukungnya (Mazzolani et al., 2008). Karena lokasinya yang terletak di bawah permukaan air, kapal penyeberangan memungkinkan untuk melintas di atasnya. SFT dilengkapi dengan struktur penyangga (*support*) yang berguna untuk mempertahankan posisinya dari pengaruh ombak, arus, gempa bumi dan pengaruh lingkungan lainnya. Selain berfungsi sebagai sarana penyeberangan laut, sungai atau danau, SFT dapat digunakan untuk jalur kabel dan pipa bawah laut.



Gambar 2.1 Ilustrasi Submerged Floating Tunnel atau SFT (Norwegian Public Road Administration (NPRA), 2012)

SFT memiliki 4 jenis sistem penahan atau penyangga, yaitu ponton atau apung, tiang penyangga (*columns*), tali tambat (*tethers to the bottom*), dan

penyangga bebas (*unanchored*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (railsystem.net, 2023). Dari keempat penyangga, masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Pemilihan jenis penyangga didasarkan oleh faktor beban dan kondisi lingkungan.



Gambar 2.2 Jenis sistem penahan SFT: (a) *SFT with pontoons*; (b) *SFT support on columns*; (c) *SFT with tethers to the bottom*; (d) *SFT unanchored*

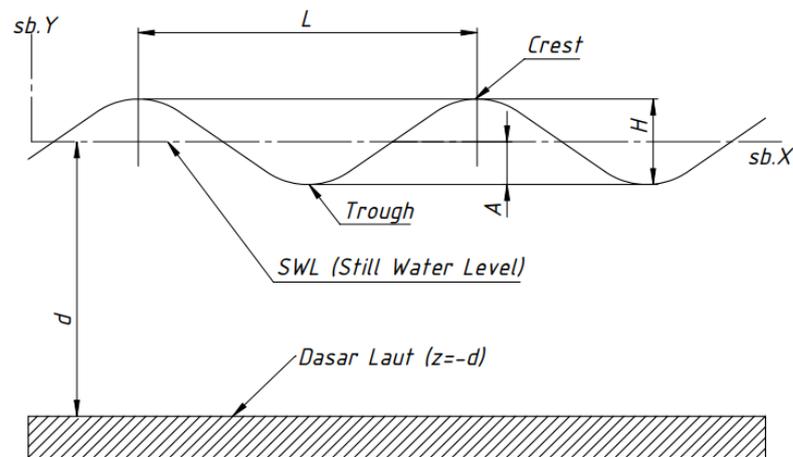
2.2 Teori Gelombang

Gelombang merupakan pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk kurva atau grafik sinusoidal. Gelombang di laut dapat terjadi karena dibangkitkan oleh tiupan angin di permukaan laut (gelombang angin), gaya tarik matahari serta bulan terhadap bumi (gelombang pasang surut), gempa atau letusan gunung berapi di laut (gelombang tsunami), kapal yang bergerak dan sebagainya (Triatmodjo, 1999). Suatu gelombang jika digambarkan pada kordinat x dan y , dengan arah perambatan ke arah sumbu x dapat dilihat pada Gambar 2.3 Dari gambar tersebut dapat dilihat parameter suatu gelombang, yaitu :

- 1) *Crest* adalah titik tertinggi atau puncak gelombang.
- 2) *Trough* adalah titik terendah atau palung gelombang.
- 3) Tinggi gelombang H yaitu jarak vertikal antara titik tertinggi (*crest*) dan terendah (*trough*) permukaan gelombang.
- 4) Amplitudo gelombang A yang besarnya adalah $\frac{1}{2}$ kali tinggi gelombang H
- 5) Periode gelombang T adalah waktu yang dibutuhkan *crest* untuk kembali pada titik semula atau interval waktu antara titik mula dan akhir suatu gelombang.
- 6) Frekuensi gelombang f ialah waktu yang dibutuhkan untuk sebuah gelombang melintasi satu titik, satuannya adalah hertz (Hz). Frekuensi dan periode memiliki hubungan sebagai berikut:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2-1)$$

- 7) Panjang gelombang L adalah jarak berturut-turut antara 2 buah *crest* atau *trough*.
- 8) Kedalaman d diukur dari permukaan rata air (*SWL=Still Water Level*) sampai ke dasar.



Gambar 2.3 Sketsa definisi gelombang

Pada umumnya gelombang yang terjadi di laut timbul karena tiupan angin. Selain itu bentuk gelombang di alam sangat kompleks dan sulit dijelaskan secara matematis karena bentuknya non-linear, tiga dimensi dan acak (dimana suatu deret gelombang memiliki ketinggian dan periode yang berbeda-beda). Karena itu para ahli membuat beberapa teori yang menjelaskan bentuk gelombang sederhana dan merupakan perkiraan gelombang yang ada di alam. Beberapa teori memiliki kompleksitas dan akurasi yang berbeda-beda untuk menggambarkan gelombang di alam, diantaranya teori Airy, Stokes, dan Knoidal.

2.2.1 Teori gelombang amplitudo kecil

Teori gelombang amplitudo kecil dikembangkan oleh *George Biddell Airy* pada tahun 1845, sering disebut juga dengan teori *Stokes* orde pertama yang secara umum dapat diaplikasikan untuk semua d/L (rasio kedalaman air terhadap panjang gelombang). Teori ini diturunkan berdasar persamaan Laplace untuk aliran tak berotasi (*irrotational flow*) dengan kondisi batas di permukaan air (diperoleh dari persamaan Bernoulli untuk aliran *unsteady* yang dilinearkan) dan kondisi batas di dasar laut. Hasil penyelesaian persamaan tersebut memberikan

potensial kecepatan periodik untuk aliran tak berotasi, yang kemudian digunakan untuk menurunkan persamaan-persamaan gelombang, seperti profil muka air, kecepatan serta percepatan partikel, tekanan dan cepat rambat gelombang. Berikut persamaan potensial kecepatan φ yang dihasilkan dari teori amplitudo kecil (Triatmodjo, 1999) :

$$\varphi = \frac{ag}{\omega} \cdot \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2-2)$$

Sedangkan profil muka air dapat dihitung dari kondisi batas di muka air, yaitu :

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad \text{di } y = 0, \text{ dengan memasukkan ke dalamnya persamaan}$$

nilai potensial kecepatan φ maka diperoleh,

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{ag}{\omega} \cdot (-\omega) \frac{\cosh kd}{\cosh kd} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (2-3)$$

Persamaan tersebut dapat ditulis menjadi

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) \quad (2-4)$$

dimana,

$$\varphi = \text{potensial kecepatan} \quad (\text{m/s})$$

$$\eta = \text{profil muka air} \quad (\text{m})$$

$$d = \text{kedalaman atau jarak antara SWL dengan dasar air} \quad (\text{m})$$

$$a = \text{amplitudo gelombang} \quad (\text{m})$$

$$x = \text{jarak horizontal titik tertentu yang ditinjau} \quad (\text{m})$$

$$y = \text{jarak vertikal antara SWL dengan titik tertentu yang ditinjau} \quad (\text{m})$$

$$k = \text{bilangan gelombang} = \frac{2\pi}{L} \quad (2-5)$$

L = panjang gelombang (m)

$$\omega = \text{frekuensi gelombang} = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{rad/detik}) \quad (2-6)$$

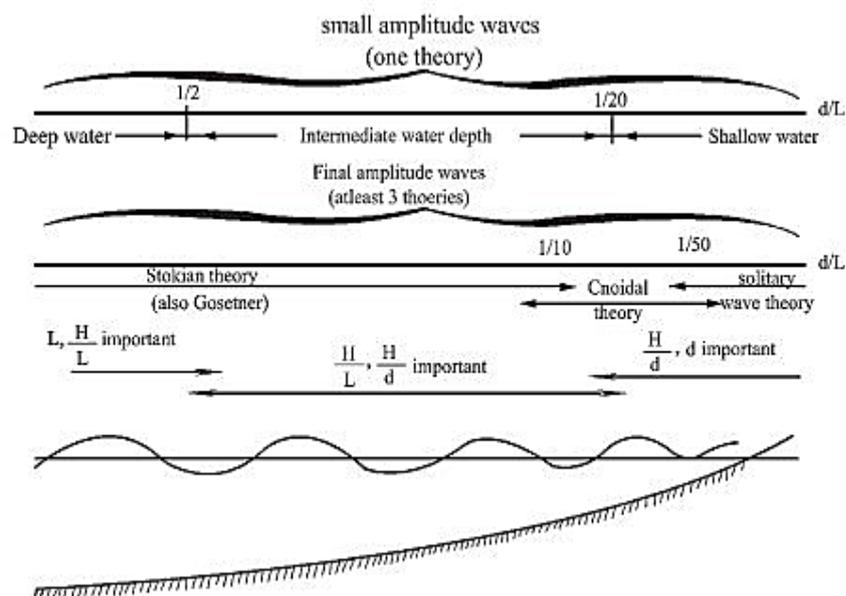
T = periode gelombang (detik)

g = gravitasi (m/s^2)

t = waktu (detik)

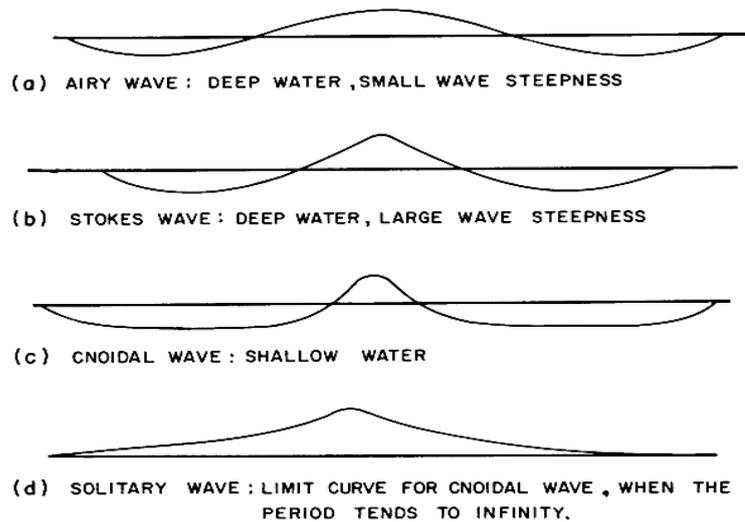
2.2.2 Teori gelombang non linear

Teori non-linier telah dikembangkan untuk profil permukaan yang bervariasi. Bentuknya telah dimunculkan dalam $\cos n(kx - \omega t)$, dimana $n = 0, 1, 2, 3$, dan seterusnya, seperti gelombang *irrotational*. Pada air yang dalam, suku yang melibatkan $(H/L)^3$ dan pangkat yang lebih besar diabaikan dari deret *Fourier* yang melibatkan analisis semacam itu.

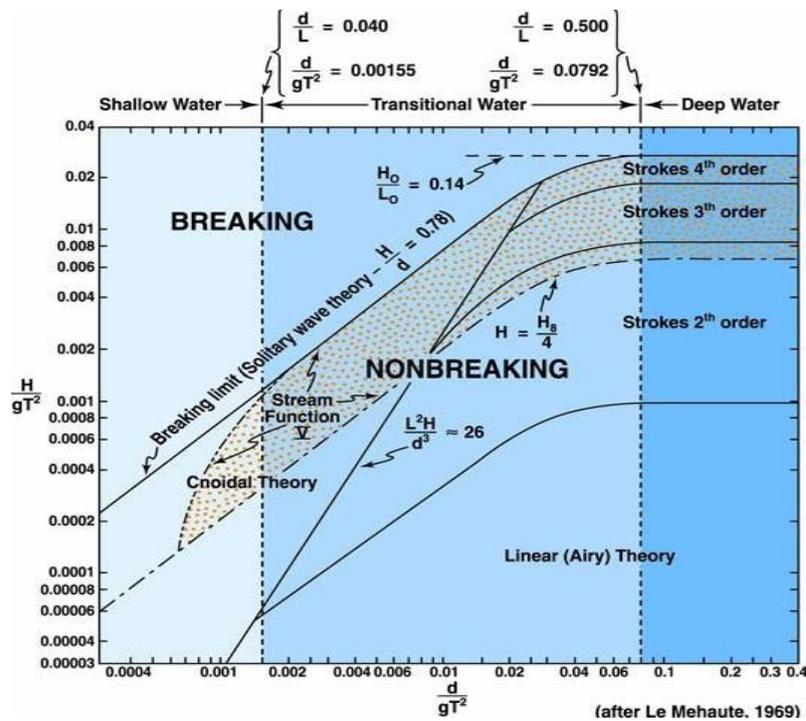


Gambar 2.4 Klasifikasi teori gelombang

Rasio H/L meningkat, puncak menjadi semakin tajam dan palung lebih datar dibanding gelombang *Airy*. Ini memiliki dampak pada median ketinggian ombak relatif terhadap *Still Water Level (SWL)* (Sundar, 2016)

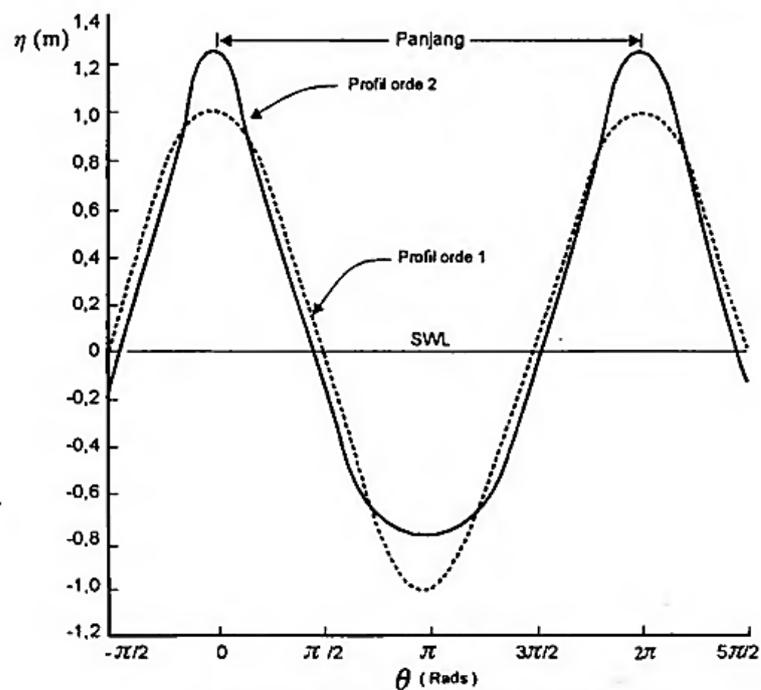


Gambar 2.5 Bentuk variasi profil gelombang (Mehaute, 1976)



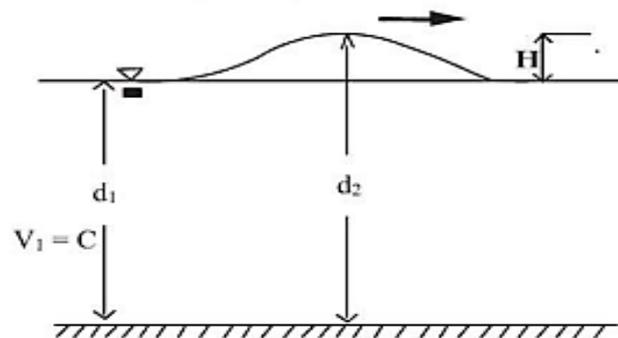
Gambar 2.6 Daerah validasi untuk bermacam teori gelombang (Mehaute, 1976)

Hubungan kecepatan partikel dan bentuk gelombang menjadi kompleks karena jumlah suku yang dipertahankan meningkat. Penggunaan komputer digital telah memungkinkan solusi cepat diperoleh untuk formulasi tingkat tinggi. Ada sejumlah besar teori gelombang nonlinier, masing-masing dengan kekuatan dan keterbatasannya sendiri. Tiga diantaranya adalah: Stokes (1847) teori orde kedua, ketiga, dan kelima, teori streamfunction Dean (1965) untuk gelombang curam, dan teori gelombang cnoidal Korteweg dan de Vries (1895) (Sarpkaya, 2010). Selanjutnya teori orde kelima dikembangkan lebih jauh oleh peneliti lain (Skjelbreia, L. and Hendrickson, 1960). Dalam praktiknya, gelombang *Stokes* orde kelima sering digunakan dalam memperkirakan gaya gelombang pada struktur, karena banyak konstanta eksperimental yang diturunkan dari pengukuran lapangan telah berkorelasi dengan teori ini. Perbandingan tipikal profil *Stokes* orde dua dengan profil gelombang linier ditunjukkan pada Gambar 2.7.



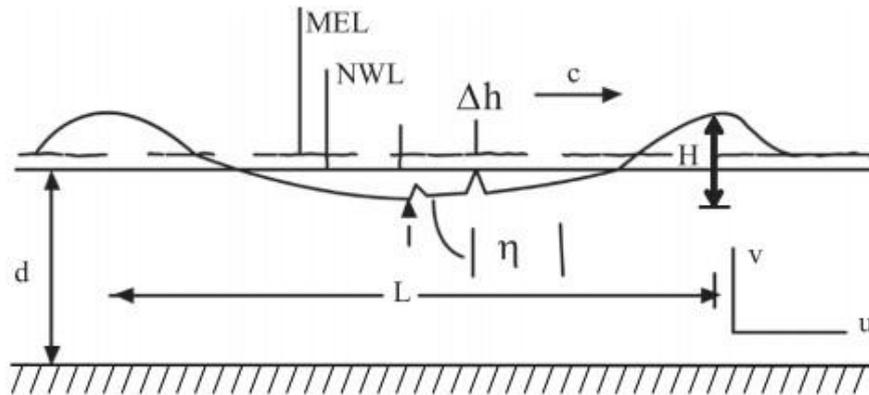
Gambar 2.7 Perbandingan orde kedua (Stokes) dengan teori linier (Airy) (Triatmodjo, 1999)

Pada perairan yang sangat dangkal, puncak gelombang menjadi semakin runcing dan lembahnya melandai. Profil permukaan seluruhnya di atas *SWL*, dalam kasus ini digunakan teori gelombang soliter. Pada abad ke-19 telah ditemukan bahwa karakteristik gelombang soliter berada pada kedalaman perairan dangkal. Gelombang soliter telah terbukti berguna dalam masalah teknik seperti studi tentang gelombang yang sangat panjang seperti tsunami, kemudian untuk menentukan sifat gelombang yang hampir pecah di perairan dangkal dan untuk mempelajari kecuraman gelombang maksimum di perairan dalam. Dalam kondisi seperti itu, karakteristik gelombang tidak bergantung pada L dan T dan hanya bergantung pada H dan d .



Gambar 2.8 Profil gelombang soliter

Teori gelombang lainnya, yaitu teori gelombang *Cnoidal*, dapat diaplikasikan pada rentang $1/50 < d/L < 1/10$. Teori gelombang *Stokes* dan *Solitary* adalah valid bila digunakan pada rentang yang sama. Teori ini mempertimbangkan syarat orde dua dan oleh karena itu akan memberikan hasil yang lebih akurat yang mungkin diperlukan dalam keadaan khusus. Selain itu, teori gelombang *Cnoidal* berlaku untuk parameter *Ursell*, $(L^3H)/d^3 > 26$. Tipikal gelombang *Cnoidal* ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Profil gelombang Cnoidal

Teori gelombang Cnoidal berguna dalam pemahaman perilaku gelombang di perairan dalam, serta dalam perencanaan dan perancangan struktur bangunan yang dapat terpengaruh oleh gelombang laut, seperti pelabuhan, jembatan dan struktur maritim lainnya.

2.2.3 Profil muka air dan cepat rambat gelombang.

Pada Gambar 2.10 dapat dilihat profil gelombang dengan arah perambatan C dan kedalaman d . Notasi-notasi yang berkaitan erat dengan profil gelombang adalah sebagai berikut :

$$\eta_{(x,t)} = \text{fluktuasi muka air terhadap muka air diam (SWL)} \quad (\text{m})$$

$$d = \text{jarak antara SWL dengan dasar air} \quad (\text{m})$$

$$a = \text{amplitude gelombang (} \frac{1}{2} \text{ kali tinggi gelombang } H) \quad (\text{m})$$

$$H = \text{tinggi gelombang.} \quad (\text{m})$$

$$L = \text{panjang gelombang.} \quad (\text{m})$$

$$T = \text{periode gelombang} \quad (\text{detik})$$

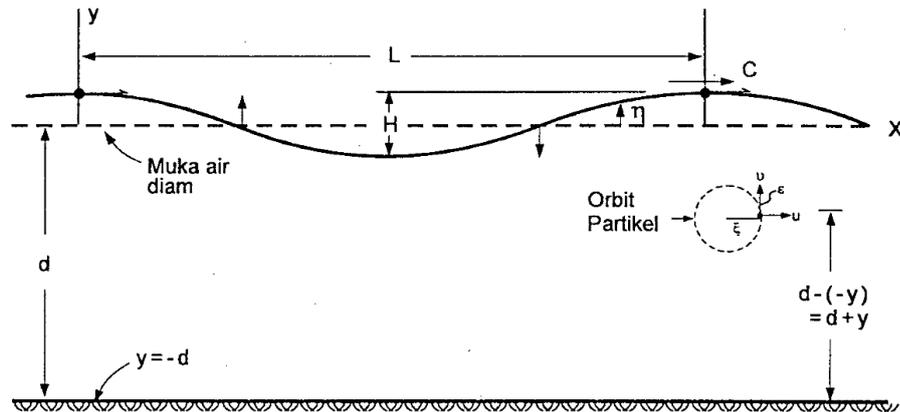
$$C = \text{cepat rambat gelombang} = L/T \quad (\text{m/s}) \quad (2-7)$$

x = jarak horizontal titik tertentu yang ditinjau (m) (m)

y = jarak vertikal antara SWL dengan titik tertentu yang ditinjau (m)

k = bilangan gelombang

ω = frekuensi gelombang



Gambar 2.10 Profil perambatan gelombang dan orbit partikel pada gelombang Airy (Triatmodjo, 2010)

Tidak seperti aliran air di sungai dimana partikel air bergerak searah aliran, pada gelombang partikel air bergerak dalam satu orbit tertutup sehingga tidak bergerak maju. Posisi partikel diberikan oleh kordinat horisontal (ξ) dan kordinat vertikal (ϵ). Untuk komponen kecepatan dan percepatan horisontal diwakili oleh u dan v , sedangkan profil muka air dinyatakan dengan η yang merupakan fungsi ruang (x) dan waktu (t) dalam bentuk persamaan:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2-8)$$

Untuk cepat rambat C dan panjang gelombang L diberikan persamaan berikut:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) = \frac{gT}{2\pi} \tanh(k \cdot d) \quad (2-9)$$

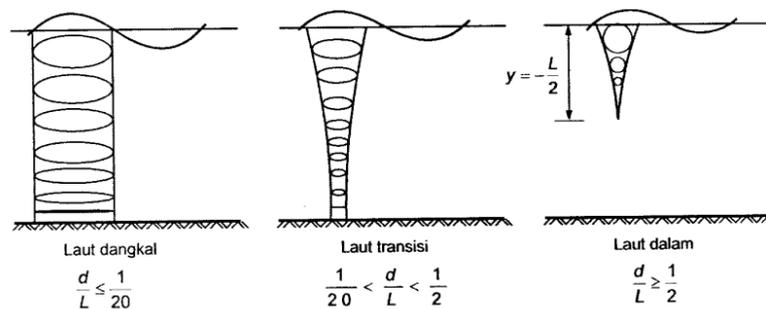
$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(k \cdot d) \quad (2-10)$$

Jika diketahui periode T dan kedalaman d , maka persamaan (2-10) dapat diselesaikan dengan metode coba banding (iterasi).

Berdasarkan kedalaman relatif, yaitu perbandingan kedalaman d dan panjang gelombang L , gelombang dibagi menjadi 3 jenis : (2-11)

- Gelombang laut dangkal, jika nilai $d/L < 0.05$
- Gelombang laut transisi, jika nilai $0.05 < d/L < 0.5$
- Gelombang laut dalam, jika nilai $d/L > 0.5$

Untuk laut dalam dengan nilai $d/L > 0.5$, maka nilai $\tanh(k.d)$ akan mendekati 1, sedangkan untuk laut dangkal dengan nilai $d/L < 0.05$ maka nilai $\tanh(k.d) = kd$.



Gambar 2.11 Gerak orbit partikel di laut dangkal, transisi dan dalam. (Triatmodjo, 2010)

2.3 Beban Hidrodinamik

Lokasi SFT yang terletak di bawah permukaan air menyebabkan terjadinya interaksi antara fluida dan struktur SFT berupa gaya hidrodinamik. Cara paling sederhana dan paling banyak digunakan untuk menghitung beban hidrodinamik adalah dengan menggunakan persamaan Morison. Persamaan ini mendefinisikan total gaya yang diterima oleh silinder yang merupakan jumlah dari gaya seret dan inersia (Morison et al., 1950). Gaya Morison merupakan gaya

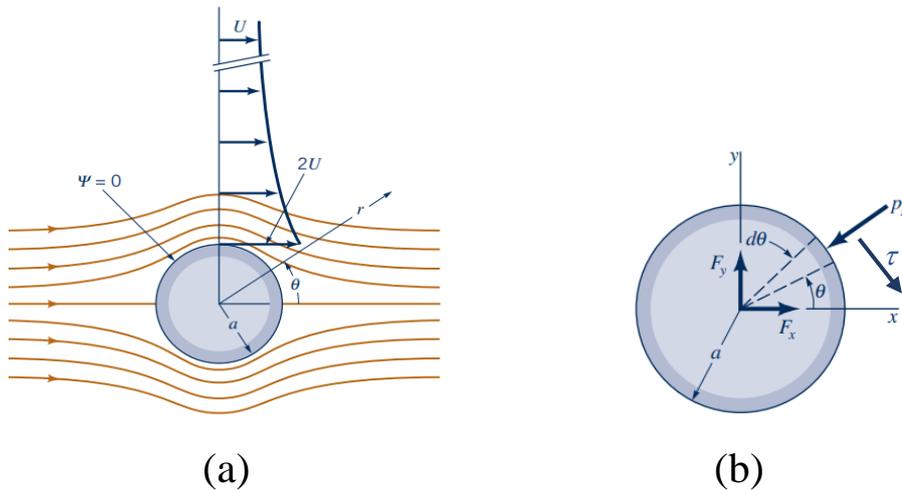
terdistribusi sepanjang struktur SFT sehingga memiliki besaran gaya per satuan panjang. Gaya inersia terdiri dari gaya Froude-Krylov dan gaya massa hidrodinamik (massa tambah). Karena persamaan Morison mengabaikan efek difraksi, maka hanya berlaku pada silinder kecil ($D/L < 0.2$). Secara umum persamaan Morison untuk satuan panjang dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan (2-12).

$$f_t = \underbrace{\frac{1}{2}\rho D C_D v|v|}_{\text{Gaya seret}} + \underbrace{\rho A \dot{v}}_{\text{Gaya Froude-Krylov}} + \underbrace{\rho A C_M \dot{v}}_{\text{Gaya massa hidrodinamik}} \quad (2-12)$$

Untuk gaya hidrodinamik pada silinder besar dengan rasio $D/L > 0.2$, efek difraksi harus dihitung menggunakan teori difraksi (MacCamy & Fuchs, 1954). Pada umumnya desain SFT adalah struktur silinder kecil memanjang, dengan rasio diameter terhadap panjang silinder relatif kecil. Oleh karena itu, pada subbab ini dijelaskan lebih rinci perhitungan gaya hidrodinamik menggunakan persamaan Morison.

2.3.1 Gaya Seret (*Drag force*)

Gaya seret timbul akibat dari pemisahan aliran air yang melewati silinder. Aliran air terbagi dua sehingga menimbulkan efek tekanan P dan tegangan geser τ pada permukaan silinder (Munson et al., 1994), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 (b).



Gambar 2.12 (a) Aliran air melewati silinder sirkular dan (b) Notasi untuk menentukan gaya *drag* & gaya lift pada silinder sirkular.

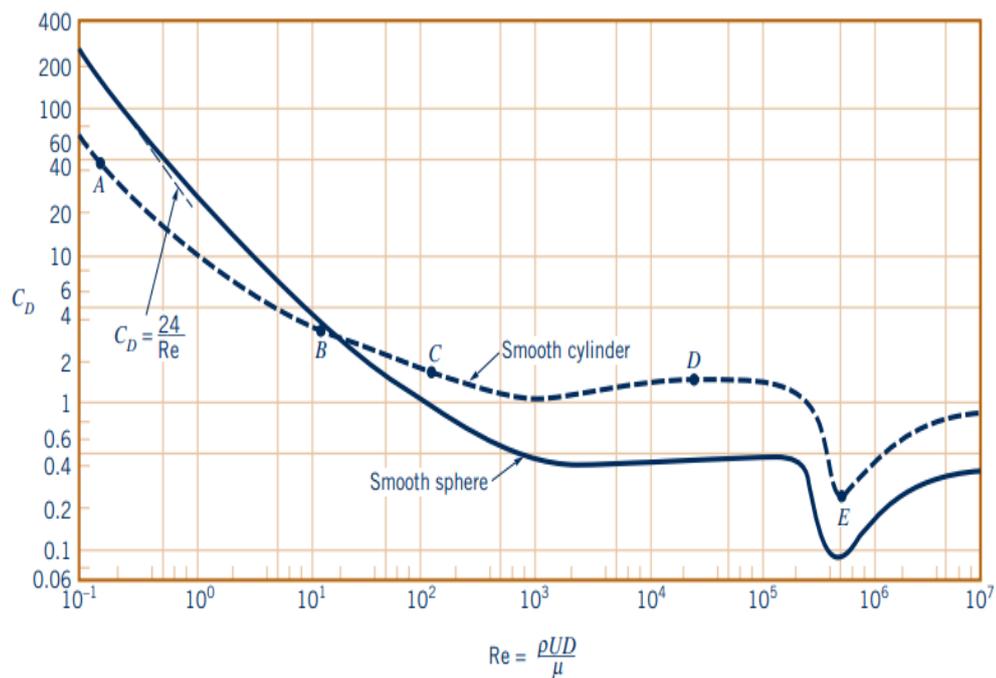
Notasi F_x pada Gambar 2.12 (b) mewakili gaya seret (gaya yang sejajar dengan arah aliran seragam) dan F_y adalah gaya angkat (gaya yang tegak lurus terhadap arah aliran). Gaya seret merupakan jumlah dari komponen horisontal yang ditimbulkan oleh gaya akibat tekanan P dan tegangan geser τ . Selanjutnya besarnya gaya seret dilambangkan dengan f_d dinyatakan dengan persamaan (2-13), dimana ρ , D , C_D dan v masing-masing adalah massa jenis fluida, diameter silinder, koefisien seret dan kecepatan aliran.

$$f_d = \frac{1}{2} \rho D C_D v^2 \quad (2-13)$$

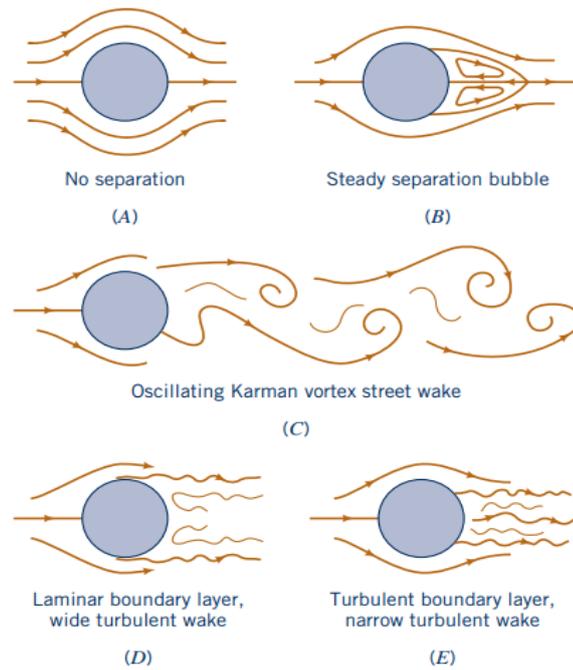
Besarnya koefisien seret C_D tergantung pada bilangan Reynold yang dinyatakan dengan persamaan (2-14). Di mana U mewakili nilai kecepatan dan ν adalah viskositas kinematik fluida.

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2-14)$$

Diketahui bahwa bilangan Reynold, yang dikemukakan pertama kali oleh Osborne Reynolds, adalah parameter untuk menentukan jenis aliran di sekitar silinder, sehingga nilai C_D di setiap aliran laminar maupun turbulen berbeda-beda. Banyak eksperimen selanjutnya yang telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh bilangan Reynold terhadap koefisien seret C_D misalnya yang dilakukan oleh Herman Schlichting, Keulegan dan Carpenter serta ilmuwan lainnya (Sarpkaya, 2010). Salah satu hasil penelitian tersebut dirangkum dalam Gambar 2.13 dan 2.14, yang menunjukkan grafik pengaruh bilangan Reynold Re terhadap koefisien seret C_D (Munson et al., 1994).



Gambar 2.13 Grafik Nilai koefisien seret (*drag*) untuk silinder melingkar sebagai fungsi dari bilangan Reynold



Gambar 2.14 Tipe pola aliran dari grafik pada Gambar 2.13

Pada kasus aliran air yang terosilasi, untuk memastikan arah gaya seret sesuai dengan arah kecepatan aliran, maka v^2 pada persamaan (2-13) ditulis menjadi v / v . Sehingga gaya seret pada aliran terosilasi dinyatakan dengan persamaan (2-15),

$$f_d = \frac{1}{2} \rho D C_D v |v| \quad (2-15)$$

2.3.2 Gaya Inersia

Gaya inersia pada struktur silinder merupakan jumlah dari gaya Froude-Krylov dan gaya massa hidrodinamik (massa tambah). Karena diberi beban ombak, struktur bergerak relatif terhadap aliran fluida. Percepatan fluida pada daerah aliran terluar menciptakan gradien tekanan yang menyebabkan gaya Froude-Krylov. Besarnya gaya Froude-Krylov f_{fk} dinyatakan dengan persamaan (2-16).

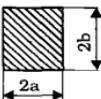
$$f_{fk} = \rho A \dot{v} \quad (2-16)$$

Gaya massa hidrodinamik tergantung pada besarnya massa hidrodinamik. Massa hidrodinamik atau sering disebut juga massa tambah adalah massa fluida di sekitar struktur yang mengalami percepatan ketika struktur bergerak. Massa fluida ini memberikan efek massa tambah pada struktur. Untuk menggerakkan struktur, dibutuhkan gaya inersia tambahan akibat keberadaan massa hidrodinamik. Gaya tambahan inilah yang disebut gaya massa hidrodinamik. Besarnya gaya massa hidrodinamik f_{mh} dinyatakan dengan persamaan (2-17).

$$f_{mh} = \rho A C_M \dot{v} \quad (2-17)$$

Setiap struktur memiliki koefisien massa hidrodinamik C_M yang berbeda-beda nilainya tergantung pada bentuk struktur tersebut. Nilai C_M merupakan nilai empirik yang diperoleh dari hasil eksperimen. Koefisien massa hidrodinamik dari beberapa macam bentuk penampang ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Nilai Koefisien massa hidrodinamik untuk beberapa bentuk penampang (Sumer, B.M. and FredsØe, 2006)

Section through body	Direction of motion	$\frac{a}{b}$	C_m	A
	↑↓		1.0	πa^2
	↑↓		1.0	πa^2
	↑↓		1.0	πa^2
	↑↓		1.0	πa^2
	↑↓	∞ 10.0 5.0 2.0 1.0 0.5 0.2 0.1	1.00 1.14 1.21 1.36 1.51 1.70 1.98 2.23	πa^2

Untuk persamaan (2-17) akan berlaku apabila struktur dalam kondisi diam (*fixed*), sehingga kurang tepat diterapkan pada SFT. Karena SFT bergerak secara fleksibel terhadap ombak, sehingga terjadi kecepatan relatif struktur dan aliran fluida. Untuk menghitung gaya massa hidrodinamik SFT, persamaan (2-17) dapat dimodifikasi menjadi persamaan (2-18).

$$f_{mh} = \rho AC_M(\dot{v} - \ddot{w}) \quad (2-18)$$

Sebelumnya pada persamaan (2-14) telah diketahui bahwa gaya inersia total adalah penjumlahan antara gaya Froude-Krylov dan gaya massa hidrodinamik. Dengan mendefinisikan koefisien inersia C_I sesuai dengan persamaan (2-19),

$$C_I = C_M + 1 \quad (2-19)$$

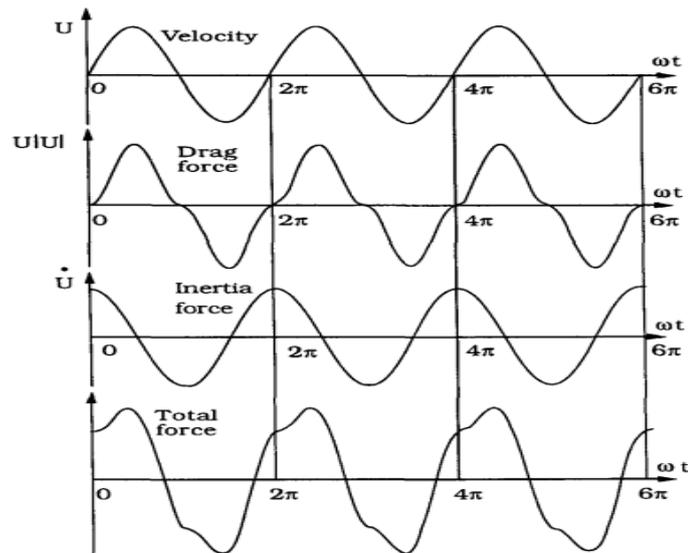
gaya inersia total dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$f_i = \rho AC_I \dot{v} \quad (2-20)$$

Namun untuk selanjutnya, dalam penelitian ini digunakan notasi C_M sebagai koefisien inersia

2.3.3 Bilangan KC

Besarnya gaya yang ditimbulkan oleh ombak pada struktur SFT sangat bergantung pada kinematika partikel air. Diketahui bahwa kecepatan dan percepatan air memiliki beda fase sebesar 90° . Karena gaya seret dan inersia bergantung pada kecepatan dan percepatan air, maka gaya maksimum seret dan inersia memiliki beda fase sebesar 90° seperti ditunjukkan pada Gambar 2.15.

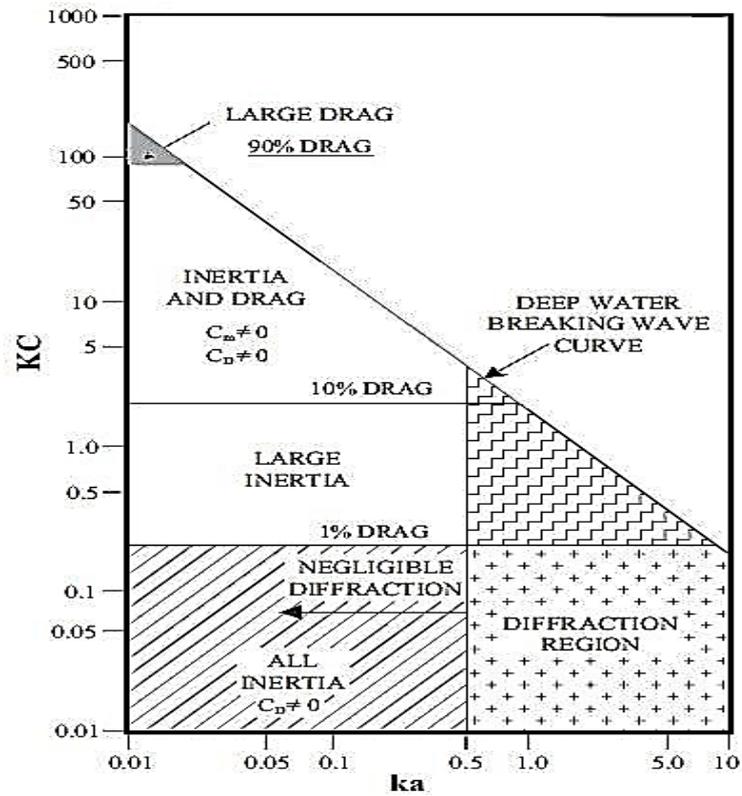


Gambar 2.15 Variasi gaya seret dan inersia (Sumer, B.M. and FredsØe, 2006)

Untuk menyatakan perbandingan gaya inersia dan gaya seret, digunakan bilangan KC (Keulegan-Carpenter). Bilangan KC dinyatakan dengan persamaan (2-21). Dimana v_{max} dan T masing-masing adalah kecepatan maksimum ombak dan periode ombak.

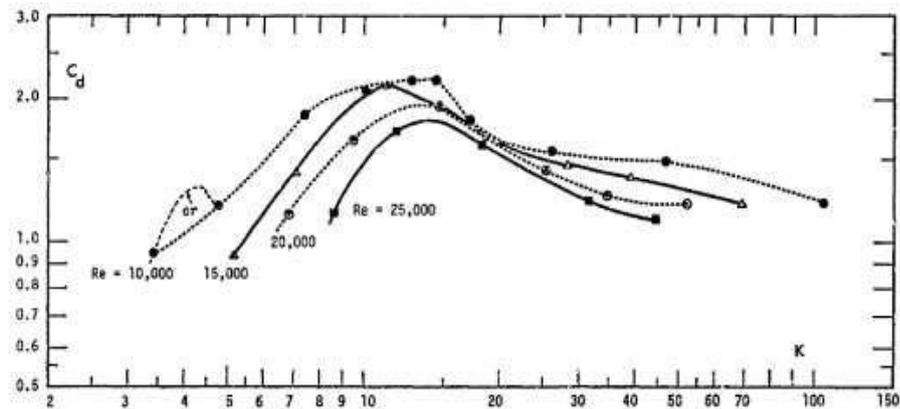
$$KC = \frac{v_{max} \cdot T}{D} \quad (2-21)$$

Bilangan KC merupakan perbandingan gerakan ombak ($v_{max}T$) terhadap diameter silinder (D). Pada bilangan KC yang kecil, gerakan partikel air di dekat silinder relatif kecil dibanding dengan diameter silinder. Artinya pada bilangan KC yang kecil tidak terjadi pembelahan aliran fluida, sehingga gaya inersia lebih dominan terhadap gaya seret. Pada bilangan KC yang besar, gerakan partikel air relatif besar dibanding diameter silinder, sehingga terjadi pembelahan aliran bahkan pelepasan pusaran air (*vortex shedding*). Pada keadaan ini gaya seret lebih dominan. Daerah penerapan gaya yang dominan bersumber pada bilangan KC serta parameter penyebaran $ka = \pi D/L$ seperti yang ditunjukkan Gambar 2.16.

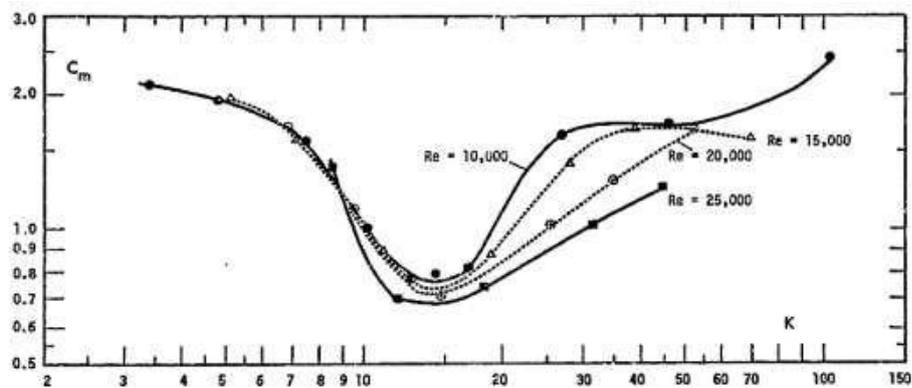


Gambar 2.16 Wilayah penerapan gaya inersia dan seret (Sundar, 2016).

Beberapa eksperimen menyimpulkan bahwa, pada aliran terosilasi koefisien seret C_D dan inersia C_I bergantung pada bilangan Reynold dan bilangan KC. Gambar 2.17 menunjukkan variasi koefisien seret dan inersia terhadap bilangan Reynold dan KC.



(a)



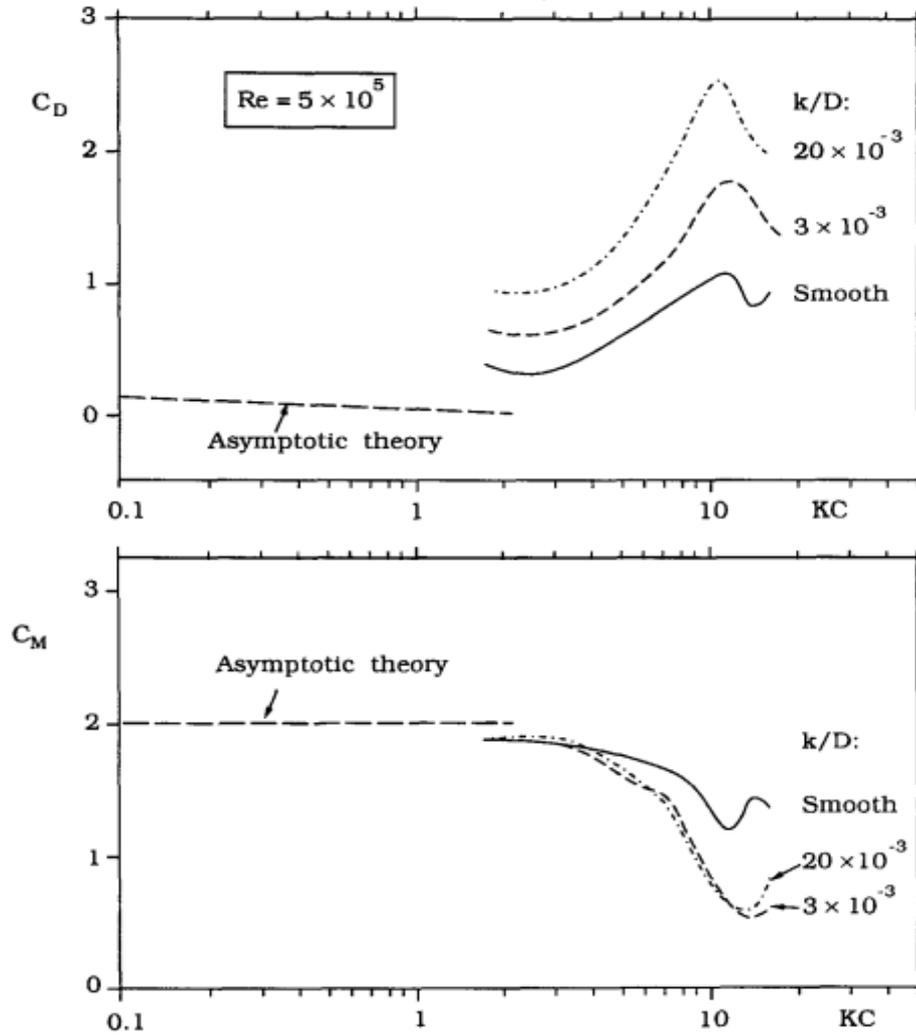
(b)

Gambar 2.17 Sebuah plot ulang data Keulegan-Carpenter, yaitu (a) Koefisien seret, (b) Koefisien inersia sebagai fungsi bilangan Re dan KC, (Sarpkaya, 2010)

2.3.4 Efek kekasaran permukaan silinder

Pada permukaan silinder yang kasar, kekasaran tersebut bisa mengganti aspek aliran seperti ketidakstabilan hidrodinamik (*vortex shedding* dan interaksi *vortex*), sudut pelepasan pusaran, tingkatan turbulensi, panjang korelasi, serta kekuatan pusaran. Perihal ini dipengaruhi oleh bertambahnya diameter serta proyeksi luas silinder. Oleh sebab itu, diharapkan kalau dampak kekasaran bisa berpengaruh

pada aspek gaya. Gambar 2.18 memperlihatkan pengaruh kekasaran pada koefisien gaya inline (Sumer, B.M. and FredsØe, 2006).



Gambar 2.18 Efek kekasaran permukaan pada koefisien gaya *in-line*. Data eksperimen dari Justesen di tahun 1989.

Dari Gambar 2.18 dapat dilihat bahwa koefisien gaya meningkat dan koefisien inersia menurun ketika silinder berubah dari silinder permukaan halus ke permukaan kasar dengan $k/D = 3 \times 10^{-3}$. C_D meningkat dengan meningkatnya kekasaran. C_M tidak terpengaruh banyak dengan meningkatnya kekasaran (Sumer, B.M. and FredsØe, 2006).

2.3.5 Perhitungan Gaya Hidrodinamik

Persamaan Morison merupakan persamaan yang banyak digunakan untuk menghitung besar gaya ombak. Persamaan ini menganggap bahwa ada dua gaya yang bekerja di dalamnya, yaitu :

- 1) Gaya hambat (F_D) atau *drag* yang disebabkan oleh pemisahan aliran di sekitar tiang pancang.
- 2) Gaya inersia (F_I) yang timbul karena percepatan aliran.

Dalam jurnalnya (Morison et al., 1950) merumuskan besarnya kecepatan orbital u (partikel air) arah horizontal yang diperoleh melalui hasil diferensial terhadap waktu, sebagai :

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh \frac{2\pi}{L} (d+z)}{\sinh \frac{2\pi d}{L}} \cdot \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (2-22)$$

dimana,

u = kecepatan orbital/partikel air (m/s)

H = tinggi gelombang. (m)

T = periode gelombang (detik)

L = panjang gelombang. (m)

d = jarak antara SWL dengan dasar air (m)

z = jarak vertikal antara SWL dengan titik tertentu yang ditinjau (m)

sedangkan percepatan partikel air pada setiap posisi diperoleh dengan diferensiasi

nilai kecepatan u sebagai :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{-2\pi^2 H}{T^2} \cdot \frac{\cosh \frac{2\pi}{L}(d+z)}{\sinh \frac{2\pi d}{L}} \cdot \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (2-23)$$

dimana,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{percepatan orbital/partikel air} \quad (\text{m/s}^2)$$

$$H = \text{tinggi gelombang.} \quad (\text{m})$$

Mengacu kedua persamaan di atas dirumuskan persamaan Morison, yaitu jumlah gaya seret dan inersia per satuan panjang pada tiang pancang berdiameter D sebagai,

$$dF = [C_M \left(\frac{\rho \pi D^2}{4} \right) \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \pm C_D \frac{\rho D u^2}{2}] dz \quad (2-24)$$

dimana, C_M = koefisien inersia

C_D = koefisien seret (*drag*)

D = Diameter silinder

Menggunakan persamaan (2-4) di awal dan penggunaan fungsi invers dari fungsi trigonometri maka persamaan (2-22) dan (2-23) dapat ditulis sebagai persamaan

(2-25) dan (2-26). Sedangkan untuk perhitungan struktur SFT dengan panjang l , maka persamaan (2-24) dapat ditulis menjadi persamaan (2-27).

$$u_x = \frac{\pi H \cosh[k(z+d)]}{T \sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (2-25)$$

$$a_x = \frac{2\pi^2 H \cosh[k(z+d)]}{T^2 \sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2-26)$$

$$F_T = \frac{1}{4} C_M \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^2 \cdot l \cdot a_x \pm \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot D \cdot u_x^2 \cdot l \quad (2-27)$$

dimana,

$$F_T = \text{Gaya Morison}$$

$$u_x = u = \text{kecepatan orbital arah horisontal}$$

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = \text{percepatan partikel air pada arah horisontal.}$$

$$l = \text{panjang silinder SFT.}$$

Dengan adanya kedalaman relatif, maka nilai kecepatan dan percepatan partikel air dapat dituliskan seperti pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 rumus kecepatan dan percepatan partikel air berdasarkan kedalaman relatif.

Free surface elevation: $\eta(x, t) = H / 2 \cos(kx - \omega t) = a \cos(kx - \omega t)$			
	Intermediate waves $0.05L < d < 0.5L$, ketergantungan pada nilai T dan d	Deep waves $d \geq 0.5L$ ketergantungan pada nilai T	Shallow waves $d \leq 0.5L$ ketergantungan pada nilai d
u	$\frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(-)$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(-)$	$\frac{\pi H}{T} \frac{1}{kd} \cos(-)$
$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t}$	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(-)$	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \sin(-)$	$\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{1}{kd} \sin(-)$
w	$\frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(-)$	$\frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(-)$	$\frac{\pi H}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin(-)$
$\dot{w} = \frac{\partial w}{\partial t}$	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(-)$	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \cos(-)$	$-\frac{2\pi^2 H}{T^2} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cos(-)$
Cos (-) = Cos ($kx - \omega t$) dan Sin (-) = Sin ($kx - \omega t$) z bernilai negative karena berada di bawah SWL			

Notasi u dan \dot{u} mewakili kecepatan dan percepatan arah horisontal, sedangkan w dan \dot{w} mewakili arah vertikal. Karena kecepatan dan percepatan memiliki beda fase 90° , maka ketika nilai kecepatan u maksimal nilai \dot{u} adalah 0, begitu juga sebaliknya. Untuk itu perlu dicari nilai $(kx - \omega t)$ agar menghasilkan total gaya hidrodinamik maksimal. Dengan mensubstitusi nilai kecepatan dan percepatan

pada persamaan (2-24) dengan persamaan pada Tabel 2.2 sesuai kedalaman relatifnya, maka pada akhirnya dapat diperoleh persamaan gaya total hidrodinamik yang maksimal. Dalam penelitian ini dengan $d > \frac{1}{2} L$ ($0.6 > 0.2935$) maka digunakan persamaan pada Tabel 2.2 untuk kolom *Deep waves*.

Untuk perhitungan gaya *drag*, substitusikan $\frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \omega t)$ untuk nilai u pada persamaan (2.24) sehingga untuk bagian gaya *drag* akan diperoleh persamaan berikut,

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot D \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \cos(kx - \omega t) | \cos(kx - \omega t) | e^{2kz} \quad (2-28)$$

Ulangi langkah yang serupa untuk komponen gaya inersia dengan diawali substitusi nilai \dot{u} pada Tabel 2.2 ke dalam persamaan (2-24), maka pada akhirnya untuk bagian gaya inersia akan diperoleh persamaan F_I berikut,

$$F_I = \frac{1}{2} C_M \rho \frac{\pi^3 D^2 H}{T^2} e^{kz} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2-29)$$

Setelah didapatkan persamaan F_D dan F_I , maka persamaan Morison untuk kategori *deep waves* dapat ditulis sebagai,

$$F_T = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot D \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \cos(kx - \omega t) | \cos(kx - \omega t) | e^{2kz} + \frac{1}{2} C_M \rho \frac{\pi^3 D^2 H}{T^2} e^{kz} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2-30)$$

Persamaan (2-30) dapat digunakan untuk mendapatkan nilai gaya hidrodinamik maksimal, yaitu ketika nilai $\cos(kx - \omega t)$ sama dengan nilai $\sin(kx - \omega t)$. Jika $(kx - \omega t)$ dapat dilambangkan dengan Y sedangkan hasil perhitungan (selain $\cos(kx - \omega t)$) untuk persamaan (2-28) dilambangkan dengan A dan untuk

persamaan (2-29) dilambangkan dengan B, maka persamaan (2-30) dapat ditulis menjadi $F_T = A \cdot \cos(Y) \cdot \cos(Y) + B \cdot \sin(Y)$ atau

$$F_T = A \cdot \cos^2(Y) + B \cdot \sin(Y) \quad (2-31)$$

Jika persamaan (2-31) diintegalkan terhadap nilai Y maka,

$$\frac{dF_T}{dY} = \frac{d}{dY} A \cdot \cos^2(Y) + \frac{d}{dY} B \cdot \sin(Y)$$

$$\frac{dF_T}{dY} = -2A \cdot \cos(Y) \cdot \sin(Y) + B \cdot \cos(Y)$$

Lebih lanjut dapat diperoleh nilai Y,

$$\frac{dF_T}{dY} = 0 ; \quad Y = \text{Arc Sin} \left(\frac{B}{-2A} \right)$$

$$(kx - \omega t) = \text{Arc Sin} \left(\frac{B}{-2A} \right) \quad (2-32)$$

Perhitungan Morison juga membutuhkan nilai koefisien seret C_D dan koefisien inersia C_M , dimana dalam praktiknya menetapkan nilai C_M dan C_D yang akurat akan sulit dilakukan. Salah satu caranya dapat menggunakan Gambar 2.13 untuk mencari nilai C_D sedangkan dari Tabel 2.1 dapat diperoleh nilai C_M .

Selain itu mengacu kepada banyak hasil percobaan laboratorium, Pusat Teknik Pesisir Angkatan Darat Amerika Serikat telah menyusun dan merekomendasikan nilai keduanya (C_M dan C_D) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.3 (Reeve et al., 2018). Disarankan dalam pemakaian tabel tersebut, perhitungan bilangan Reynold harus menggunakan nilai kecepatan maksimal.

Tabel 2.3 Nilai C_M dan C_D yang direkomendasikan *US Army Coastal Engineering Center*

<i>Reynolds number</i>	C_M
$R < 2.5 \times 10^5$	2.0
$2.5 \times 10^5 < R < 5 \times 10^5$	$C_M = 2.5 - R/(5 \times 10^5)$
$R > 5 \times 10^5$	$C_M = 1.5$

<i>Reynolds number</i>	C_D
$R < 10^5$	1.2
$10^5 < R < 4 \times 10^5$	$1.2 < C_D < 0.6$
$R > 4 \times 10^5$	$C_D = 0.6-0.7$

Untuk menghitung gaya hidrodinamik pada suatu struktur SFT langkah-langkah yang harus dilakukan adalah :

- 1) Menentukan parameter ombak seperti tinggi dan periode gelombang (H dan T), kedalaman air (d) serta diameter struktur (D).
- 2) Menentukan panjang gelombang L memakai persamaan (2-10) dan metode iterasi menggunakan fitur *add in solver* pada program *Microsoft Excel*.
- 3) Menghitung kecepatan partikel ombak u_x memakai persamaan (2-22) dengan $t = 0$ (u_x maksimal)
- 4) Menghitung percepatan partikel ombak a_x memakai persamaan (2-23) dengan $t = \frac{3}{4} L$ (a_x maksimal)
- 5) Menghitung bilangan Reynold memakai persamaan (2-14)
- 6) Menentukan nilai C_M dan C_D dari Tabel 2.3
- 7) Menghitung gaya hidrodinamik maksimal memakai persamaan (2-30).

Persamaan Morison berasal dari kombinasi pertimbangan teoritis dan bukti empiris, di dalamnya tidak termasuk gaya angkat (*lift force*) dan gaya tumbukan. Penerapan persamaan tersebut lebih sesuai untuk model struktur-struktur seperti tiang atau pipa yang terkena gaya ombak dengan karakteristik gelombang yang relatif teratur dan tidak rusak (*unbroken waves*). Dalam kasus gelombang yang patah atau pecah (*breaking waves*), persamaan Morison mungkin tidak sesuai karena tidak memperhitungkan gaya tumbukan yang timbul akibat tabrakan gelombang. Oleh karena itu, penting untuk memahami jenis gelombang yang mempengaruhi struktur tertentu dan memilih metode perhitungan yang sesuai sesuai dengan karakteristik gelombang yang dihadapi.

2.4 Teori Open Channel Wave BC (*Boundary Condition*)

Open Channel Wave Boundary Condition memungkinkan pengguna untuk dapat melakukan simulasi perambatan gelombang, yang berguna dalam industri kelautan untuk menganalisis kinematika gelombang dan beban akibat gelombang pada benda bergerak dan struktur lepas pantai (ANSYS Inc., 2021). Ini adalah kondisi batas hulu dan diterapkan pada saluran masuk kecepatan model *VOF* (*Volume of Fluid*). Bentuk profil untuk gelombang datang dapat dijelaskan sebagai berikut :

$$\zeta = A \cos(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon) \quad (2-33)$$

ζ adalah tinggi gelombang, A adalah amplitudo gelombang, ϵ (perbedaan fasa), t (waktu) dan k_x dan k_y merupakan bilangan ombak untuk arah x dan y .

$$k_x = k \cos \theta \text{ dan } k_y = k \sin \theta \quad (2-34)$$

Dengan besar nilai θ disini adalah $kx - \omega t$.

Mengambil persamaan (2-4), bilangan gelombang k ditentukan sebagai :

$$k = 2\pi/L$$

L adalah panjang gelombang dan frekuensi gelombang efektif ω_e

$$\omega_e = \omega + kU \quad (2-35)$$

U merupakan *uniform incident wave velocity* dan ω sebagai frekuensi gelombang.

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (2-36)$$

Dimana d adalah tinggi atau kedalaman fluida dan g adalah besar percepatan gravitasi. Komponen kecepatan untuk kondisi batas gelombang datang dapat digambarkan dalam bentuk gelombang dangkal (*shallow waves*) dan gelombang gravitasi pendek (*short gravity waves*). Gelombang dangkal ditentukan oleh,

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{g \cdot k \cdot A \cdot \sinh(k(z+d))}{\omega \cosh(k \cdot d)} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \cos(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon) \quad (2-37)$$

$$W = \frac{g \cdot k \cdot A \cdot \sinh(k(z+d))}{\omega \cosh(k \cdot d)} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \sin(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon) \quad (2-38)$$

Gelombang gravitasi pendek sebagai,

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{g \cdot k \cdot A}{\omega} e^{kz} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \cos(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon) \quad (2-39)$$

$$W = \frac{g \cdot k \cdot A}{\omega} e^{kz} \sin(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon) \quad (2-40)$$

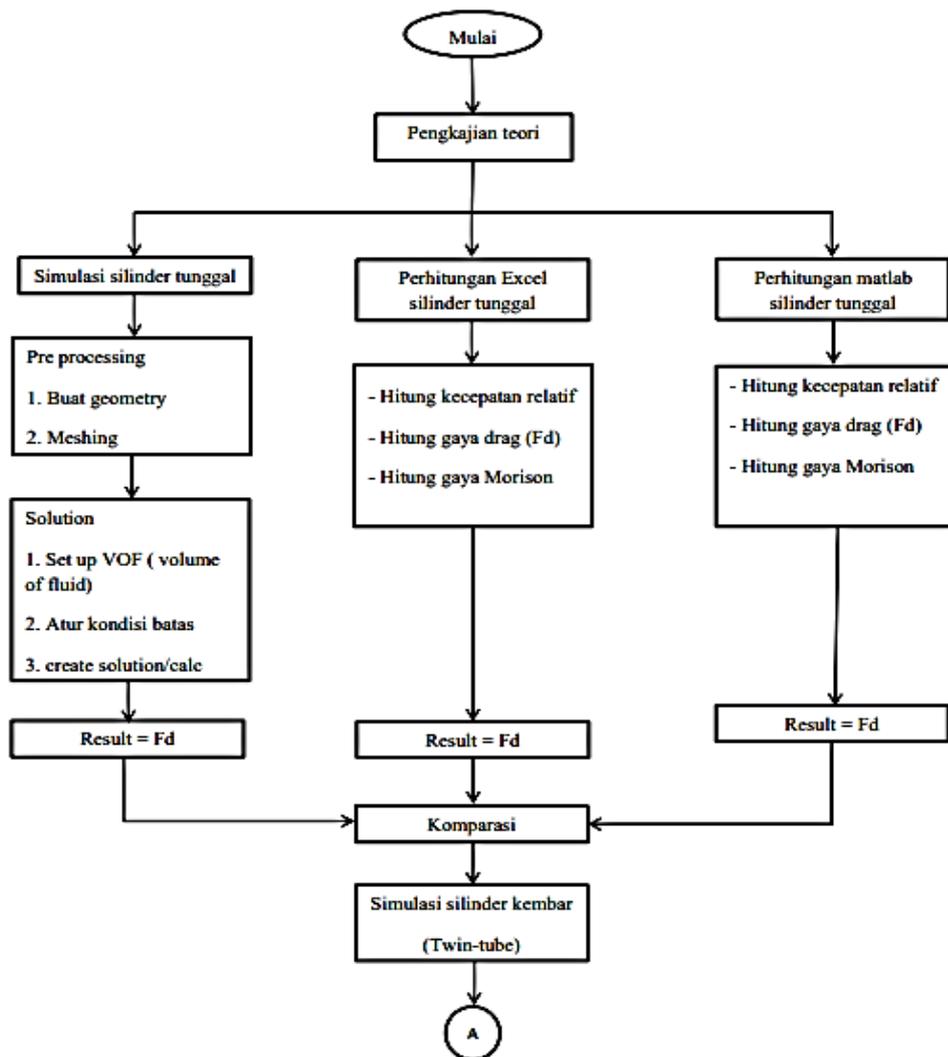
Notasi u , v , dan ω adalah komponen kecepatan, dimana u didasarkan pada arah aliran yang ditentukan dalam metode spesifikasi kecepatan gelombang, ω didasarkan pada arah gravitasi, dan v searah dengan arah aliran dan gravitasi.

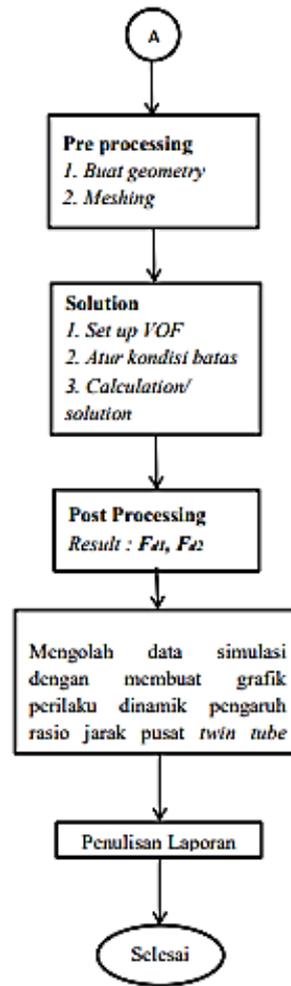
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan mulai dari September 2022 hingga Oktober 2023 di Laboratorium Mekanika Struktur Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Penelitian dilaksanakan menggunakan metode simulasi fluida. *Software* yang digunakan adalah *ANSYS 2023 R1 student version*. Penelitian ini dilaksanakan dengan tahapan seperti yang terlihat pada Gambar 3.1.

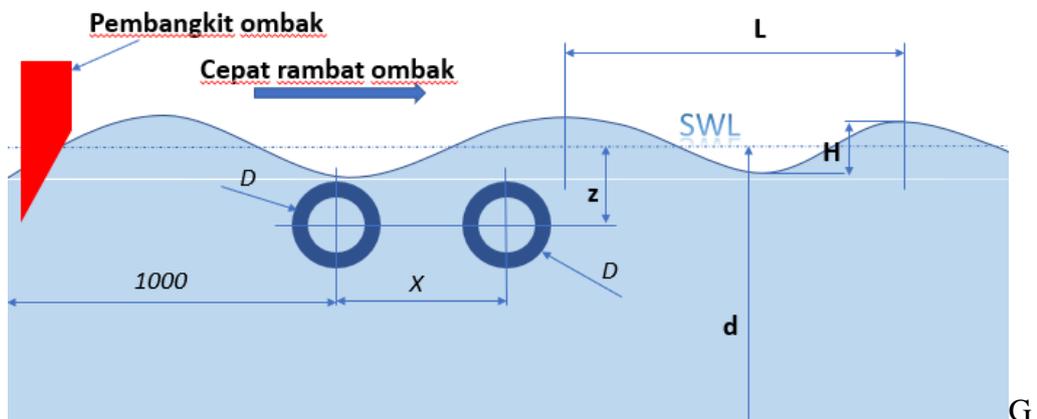




Gambar 3.1 Diagram alur penelitian

3.2 Parameter Penelitian

Parameter yang digunakan mengacu data penelitian yang dilakukan pada kolam ombak di Laboratorium Mekanika Struktur, Teknik Mesin, Universitas Lampung. yaitu tinggi gelombang $H = 48$ mm, panjang gelombang $L = 587$ mm, panjang silinder 600 mm, dan periode ombak $T = 0.625$ detik dimana semuanya bernilai tetap.



ambar 3.2 Ilustrasi parameter dan profil gelombang



mbar 3.3 Gambar peralatan kolam ombak yang dimiliki Laboratorium Mekanika Struktur, Teknik Mesin, Universitas Lampung

Untuk parameter yang bersifat variatif adalah jarak sumbu *twin tube* (x), diameter silinder (D), dan kedalaman pemasangan silinder (z). Tabel 3.1 menampilkan parameter yang digunakan dalam simulasi.

Tabel 3.1 Parameter simulasi

No.	Parameter	Simulasi
1	Diameter D (inch /mm) (Dengan Panjang pipa 600mm)	3 / 76.2
		2,5 / 63.5
		2 / 50.8
2	Rasio kedalaman z/d (mm)	100/600
		200/600
3	Panjang gelombang L (mm)	587
4	Jarak sumbu <i>twin-tube</i> x (mm)	146.75 (1/4L)
		293.5 (1/2L)
		440.25 (3/4L)
		587(1L)
5	Periode T (s)	0,625
6	Tinggi gelombang H (mm)	48

3.3 Finite Elemen Method (ANSYS *Fluent Open Channel Wave*)

Simulasi dilakukan mengikuti ketentuan sebagai berikut :

- a) Gelombang memiliki tinggi, panjang, dan frekuensi yang nilainya sesuai alat uji pada kolam ombak.

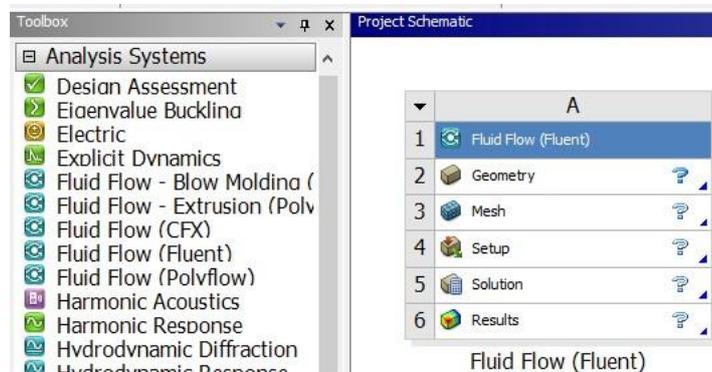
- b) Silinder yang disimulasikan tidak perlu bergerak karena penelitian ini tidak menghitung besar perpindahan silinder, melainkan hanya menghitung besar gaya yang dialami silinder.
- c) Parameter gelombang yang digunakan pada simulasi sama seperti pada Tabel 3.1. Tahapan dalam simulasi terbagi menjadi tiga, yaitu *Preprocessing*, *Solution*, dan *Postprocessing*. Selanjutnya akan dijelaskan ketiga tahapan simulasi tersebut secara detail.

3.3.1 Preprocessing

Preprocessing dimulai dari pemodelan geometri hingga *meshing* sebelum memasuki tahapan *Solution*.

a. Buka software ANSYS Workbench < Fluid Flow (Fluent)

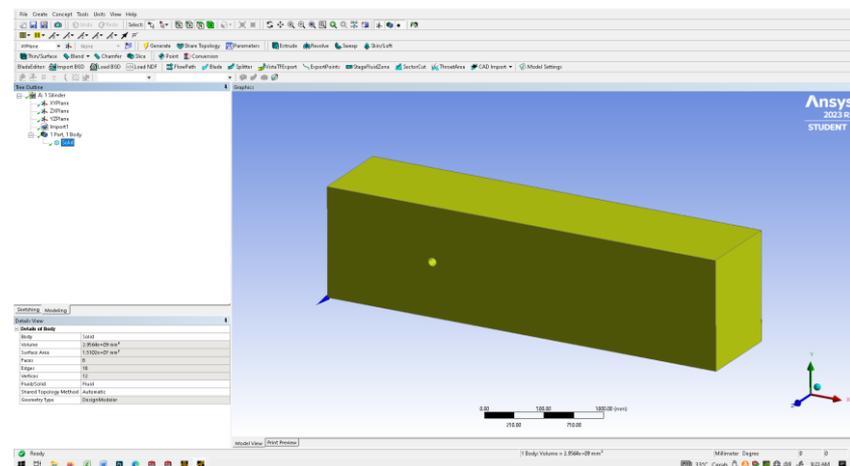
Setelah membuka *software ANSYS Workbench* pilih menu **Fluid Flow (Fluent)** yang dapat dilihat tampilannya pada Gambar 3.4. Dari menu tersebut dapat dilihat tahapan prosesnya yang dimulai dari *Geometry* hingga *Result*.



Gambar 3.4 ANSYS Workbench Fluid Flow (Fluent)

b. Geometry

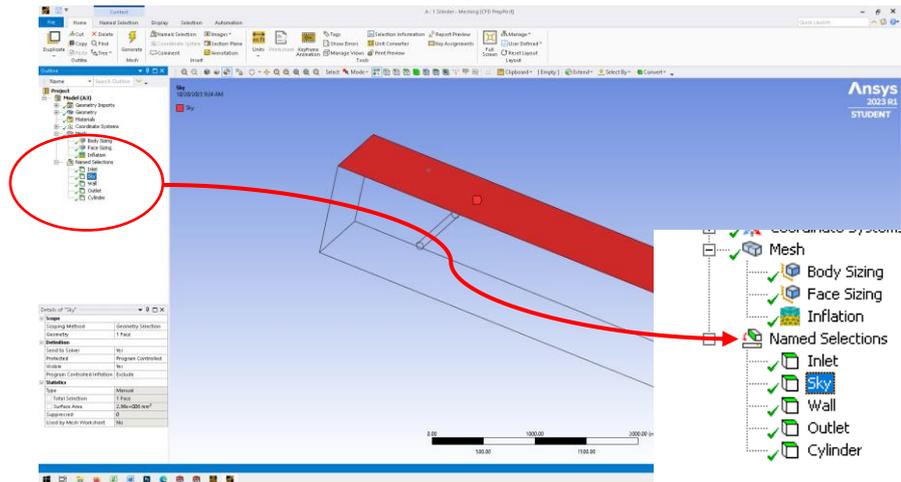
Membuat geometri dengan membuka **Geometry > Edit with Design Modeler**. Geometri silinder merupakan hasil *import* dari *file* yang telah dibuat menggunakan *Solidworks* dengan format *.igs*



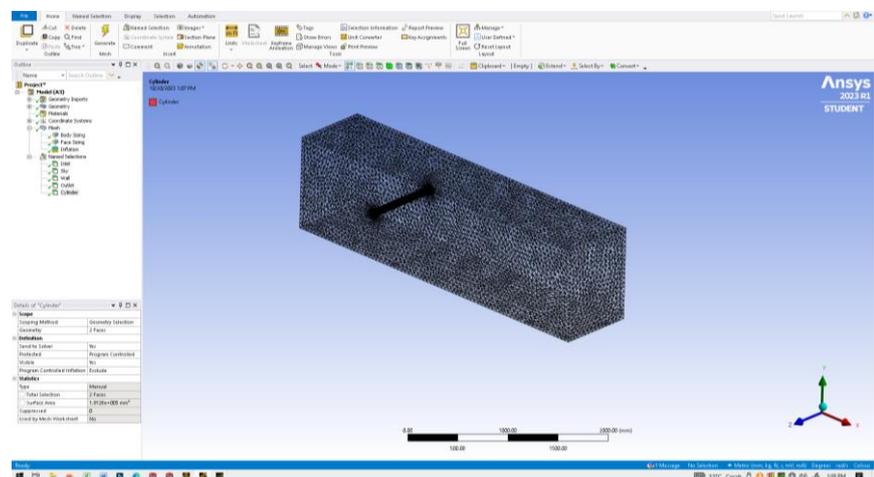
Gambar 3.5 Contoh Geometri yang dibuat di ANSYS

c. Meshing

Setelah membuat geometri maka dilanjutkan dengan ke tahap *meshing*. Pada tahap ini diawali pemberian label (*name selection ID*) pada setiap permukaan geometri sebagai area kondisi batas simulasi, yaitu : *inlet*, *outlet*, *wall*, *sky*, *upstream cylinder*, dan *downstream cylinder* seperti tampak pada Gambar 3.6 (ANSYS Inc., 2015). Selanjutnya dilakukan penagaturan ukuran elemen yang digunakan menyesuaikan dengan dimensi geometri yang digunakan. *Elemen size* yang digunakan adalah 50 mm dengan bentuk quadrilateral atau hexahedron (Gambar 3.7).



Gambar 3.6 Pemberian label kondisi batas simulasi



Gambar 3.7 Proses meshing geometri simulasi

3.3.2 Solution

Solution adalah bagian untuk mengatur jenis fluida, sifat ombak, jenis simulasi, hingga diakhiri oleh kalkulasi. Tahap ini terbagi menjadi dua yaitu *Setup* dan *Solution*.

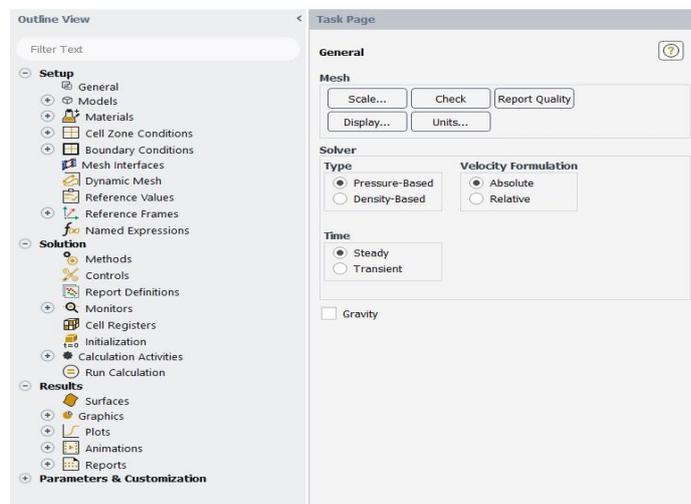
a. *Setup*

Pada tahap *Setup*, perlu diatur beberapa hal yang digunakan dalam simulasi, seperti kondisi batas, material fluida, dan lainnya. Gambar

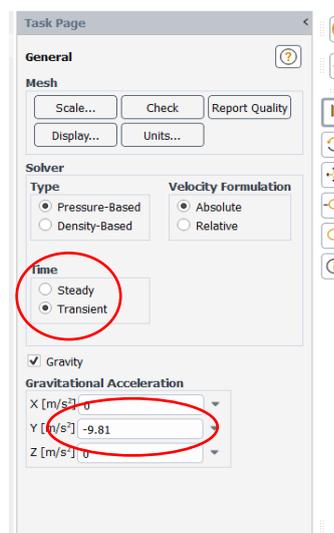
3.8 menunjukkan *User Interface* pada *setup ANSYS Fluent*. Beberapa pengaturan untuk tahap ini adalah sebagai berikut:

1) General

Mengubah jenis analisis dari *Steady* ke *Transient*, lalu memasukkan percepatan gravitasi dituliskan pada sumbu Y dengan nilai -9.81 m/s^2 . Tanda negatif artinya adalah percepatan menuju ke bawah (Gambar 3.9).



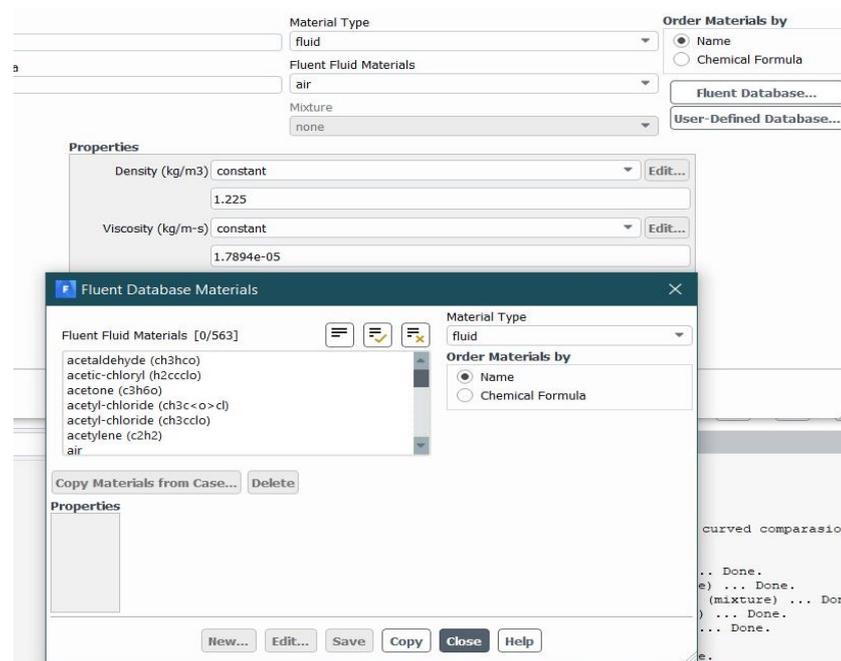
Gambar 3.8. Tampilan awal *Setup ANSYS Fluent*



Gambar 3.9 Kotak dialog *Setup : General*

2) Material

Pada simulasi ini digunakan dua jenis fluida yaitu udara dan air. Tambahkan fluida *water liquid* dari *fluent database material* (Gambar 3.10). Setelah terdapat 2 jenis fluida pada material simulasi, maka menu *Setup-model-multiphase (volume of fluid)* dapat digunakan. (ANSYS Inc., 2022)

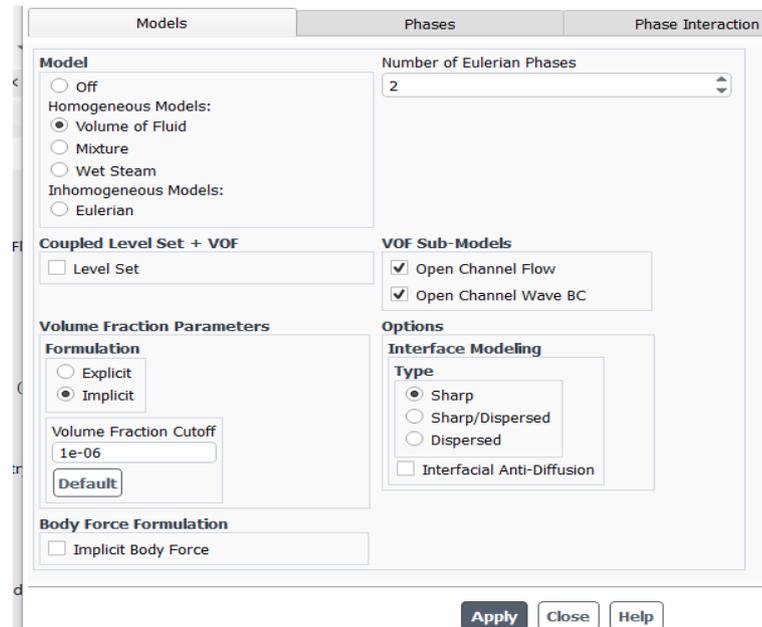


Gambar 3.10 Pemilihan material (fluida)

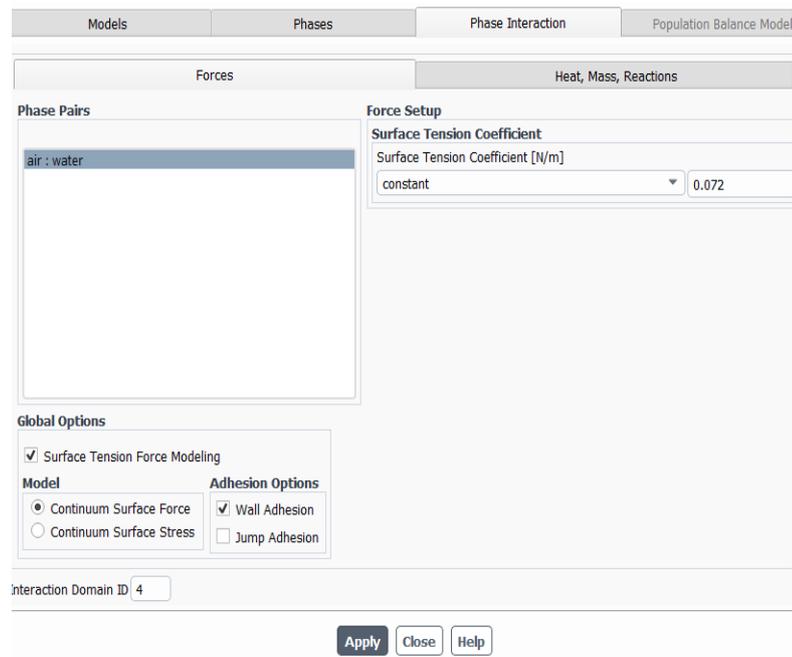
3) Models

Mengubah model fluida yang digunakan menjadi *Volume of Fluid (VoF)* pada bagian ***Multiphase : Models*** sehingga simulasi dapat menggunakan fluida air dan udara (Gambar 3.11). Kemudian atur fluida air berada pada fasa sekunder atau fasa 2 (*Phase-2*) dan udara berada pada fasa 1 (*Phase-1*) sebagai fasa primer. Lakukan juga pengaturan untuk bagian ***Phase Interaction*** seperti pada

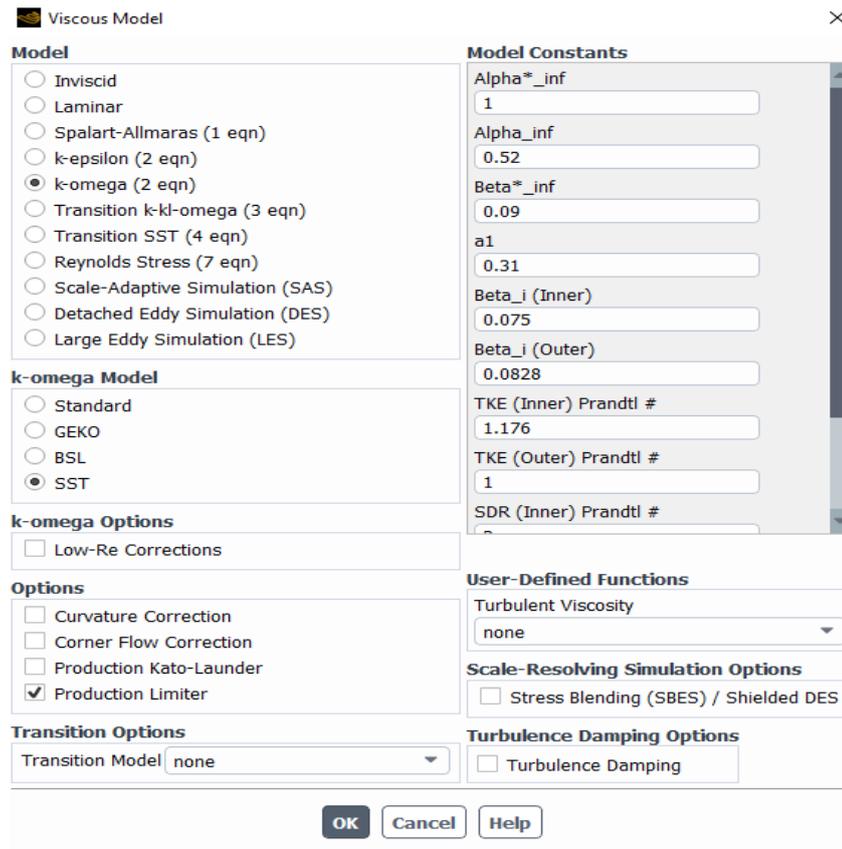
Gambar 3.12 dengan input nilai *surface tension coefficient* sebesar 0.072N/m (Adamson & Gast, 1990). Terakhir gunakan pengaturan pada bagian *Viscous* seperti pada Gambar 3.13.



Gambar 3.11 Pengaturan *Multiphase : Models*



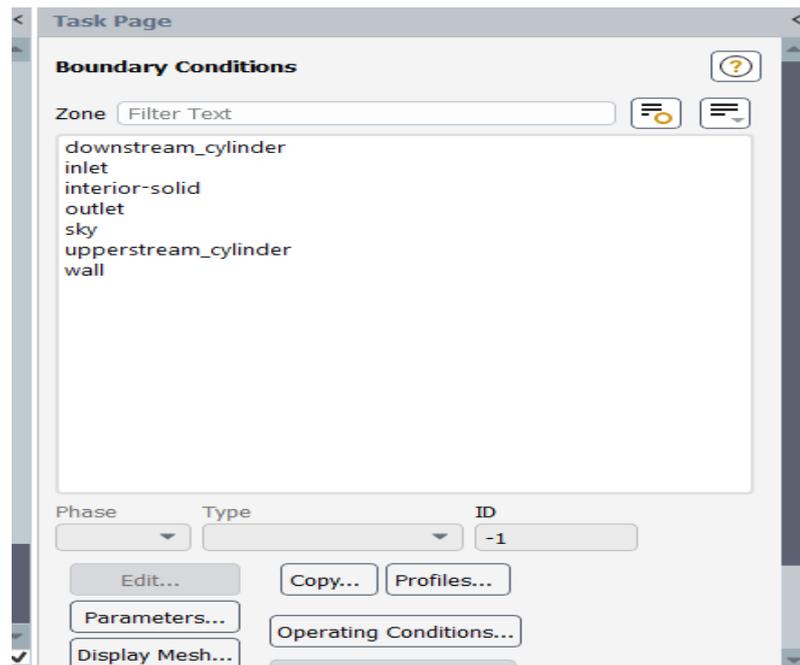
Gambar 3.12 Pengaturan *Multiphase : Phase Interaction*



Gambar 3.13 Pengaturan parameter *Viscous*

4) *Boundary Condition*

Pada bagian ini diatur parameter untuk kondisi batas yang sudah diberi label nama pada proses meshing sebelumnya yaitu *inlet*, *outlet*, *sky*, *wall*, *upstream cylinder* dan *downstream cylinder*. Setiap kondisi batas akan memiliki sifat tertentu sesuai dengan fungsinya.

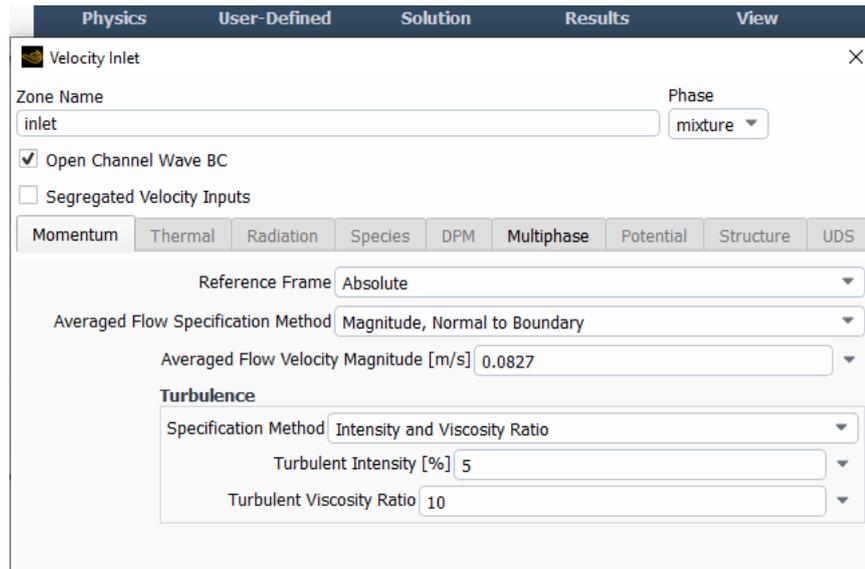


Gambar 3.14 *Boundary Condition dialog box* untuk silinder kembar.

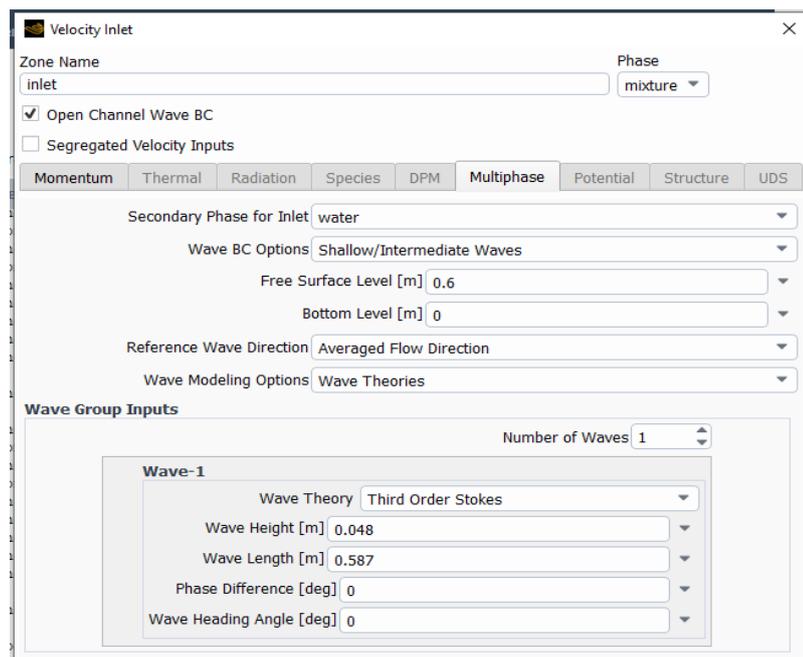
Kondisi batas *Inlet* ditentukan sebagai *Velocity Inlet* dengan ketentuan terkait tinggi ombak, kedalaman dasar, panjang gelombang mengikuti parameter yang dihasilkan alat pada kolam ombak (Tabel 3.1). Untuk besar kecepatan dihitung mengikuti teori Morison pada persamaan (2-25). Karena simulasi menggunakan 2 jenis variasi kedalaman silinder terbenam (z), maka diperoleh nilai kecepatan u sebagai berikut :

- a) Untuk $z = -0.1$ m, maka nilai kecepatan $u = 0.0827$ m/s
- b) Untuk $z = -0.2$ m, maka nilai kecepatan $u = 0.0284$ m/s

Selanjutnya pengaturan parameter pada *velocity inlet* dapat dilihat pada Gambar 3.15. dan 3.16.



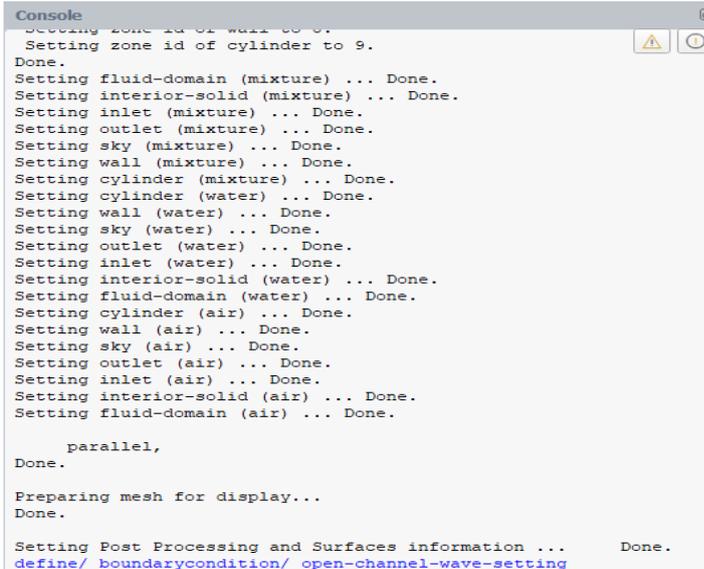
Gambar 3.15 Input nilai *velocity magnitude* pada parameter *Velocity Inlet*



Gambar 3.16 Pengaturan parameter *velocity inlet* bagian *multiphase*

Masukan pada bagian *wave theory* dapat dicek dengan menuliskan *define/ boundarycondition/ open-channel-wave-setting* pada kolom *Console*. Dimana perintah tersebut akan

menguji apakah teori ombak yang dimasukkan sudah benar. Apabila sudah tepat maka akan muncul keputusan *Passed*, namun jika ada yang tidak tepat maka akan muncul *Failed*. Selain cara tersebut dapat juga dilakukan pengecekan menggunakan menu *initialization*, yaitu dengan opsi *VOF Check*.



```

Console
Setting zone id of wall to 0.
Setting zone id of cylinder to 9.
Done.
Setting fluid-domain (mixture) ... Done.
Setting interior-solid (mixture) ... Done.
Setting inlet (mixture) ... Done.
Setting outlet (mixture) ... Done.
Setting sky (mixture) ... Done.
Setting wall (mixture) ... Done.
Setting cylinder (mixture) ... Done.
Setting cylinder (water) ... Done.
Setting wall (water) ... Done.
Setting sky (water) ... Done.
Setting outlet (water) ... Done.
Setting inlet (water) ... Done.
Setting interior-solid (water) ... Done.
Setting fluid-domain (water) ... Done.
Setting cylinder (air) ... Done.
Setting wall (air) ... Done.
Setting sky (air) ... Done.
Setting outlet (air) ... Done.
Setting inlet (air) ... Done.
Setting interior-solid (air) ... Done.
Setting fluid-domain (air) ... Done.

parallel,
Done.

Preparing mesh for display...
Done.

Setting Post Processing and Surfaces information ... Done.
define/ boundarycondition/ open-channel-wave-setting

```

Gambar 3.17 Input perintah pada Console untuk memeriksa teori ombak yang dipilih

```

Checks for selected wave theory within wave breaking and stability li
-----
Relative height check
H/h = 0.0583 , Min : 0.0000 , Max : 0.5000
Relative height check : successful

Wave Steepness check
H/L = 0.1167 , Min : 0.0000 , Max : 0.1420
Wave steepness check : successful

Urseil Number check
Ur = 0.0146 , Min : 0.0000 , Max : 25.0000
Urseil number check : successful

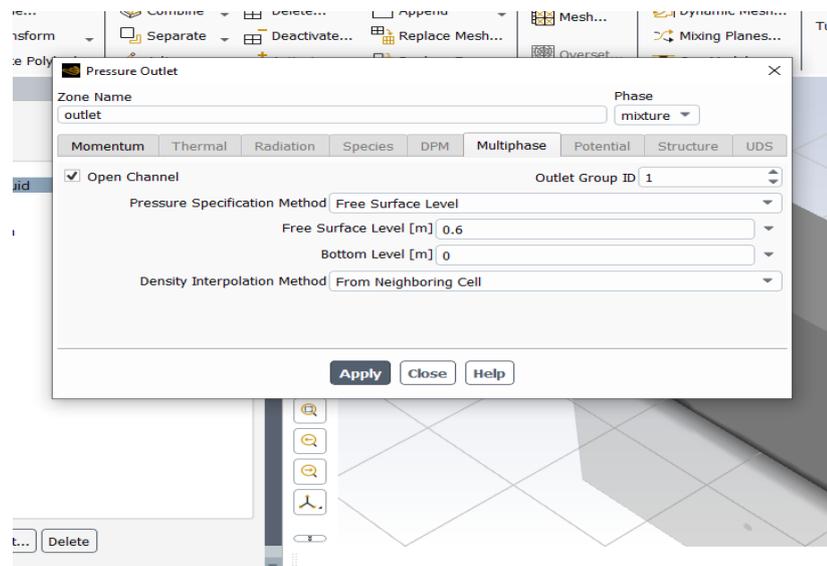
Wave regime check
h/L = 2.0000 , Min : 0.0600 , Max : 10000.0000
Wave regime check : successful

Summary
-----
Checks : passed
Selected wave theory is appropriate for application.

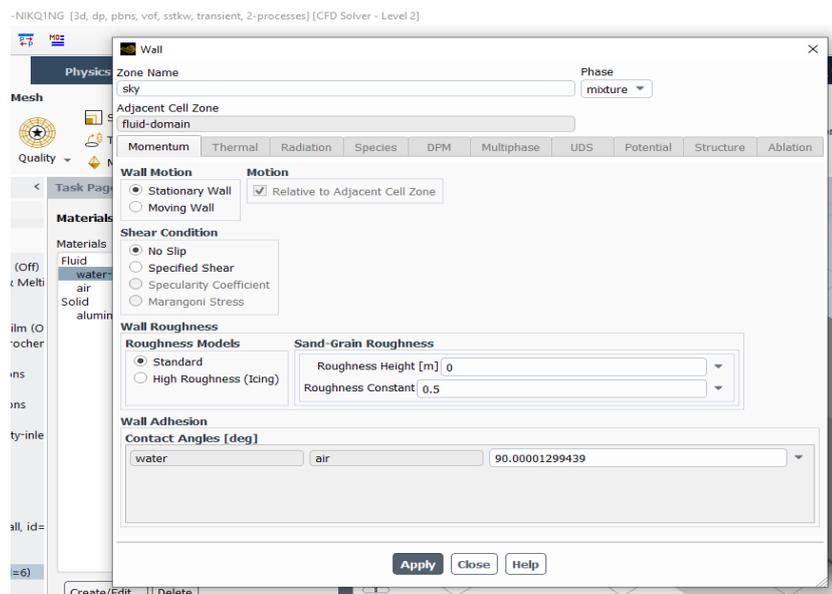
```

Gambar 3.18 Informasi pada console untuk memeriksa input parameter ombak

Selanjutnya untuk kondisi batas *Outlet* diatur ke dalam tipe *Pressure Outlet* dengan ketentuan *Free Surface Level* dan *Bottom Level* seperti pada Gambar 3.19. Sedangkan kondisi batas *Wall*, *Sky*, *Upstream* dan *Downstream Cylinder* diatur sebagai *Wall*, dengan ketentuan *Stationary Wall* seperti pada Gambar 3.20



Gambar 3.19 Pengaturan *Pressure Outlet*



Gambar 3.20 Pengaturan tipe *Wall* untuk kondisi batas *Sky*, *Wall*, *Upstream* dan *Downstream Cylinder*.

5) Cell Zone Condition

Setelah parameter semua kondisi batas ditetapkan, khususnya *inlet*, maka dapat diatur parameter *numerical beach* yang ada pada menu *Cell zone condition* seperti Gambar 3.21. Pada menu ini *zone name* diganti namanya menjadi *fluid-domain* lalu *Numerical beach* diaktifkan. Selanjutnya atur kolom *zone name* dengan pilihan yang ada (*fluid-domain*) dan kolom *Compute from inlet boundary* dengan *inlet*, maka data parameter pada kolom yang lain akan terisi otomatis.

The screenshot shows the 'Cell Zone Conditions' dialog box for a 'fluid-domain' zone. The 'Phase' is set to 'mixture'. The 'Numerical Beach Treatment' section is expanded, showing the following settings:

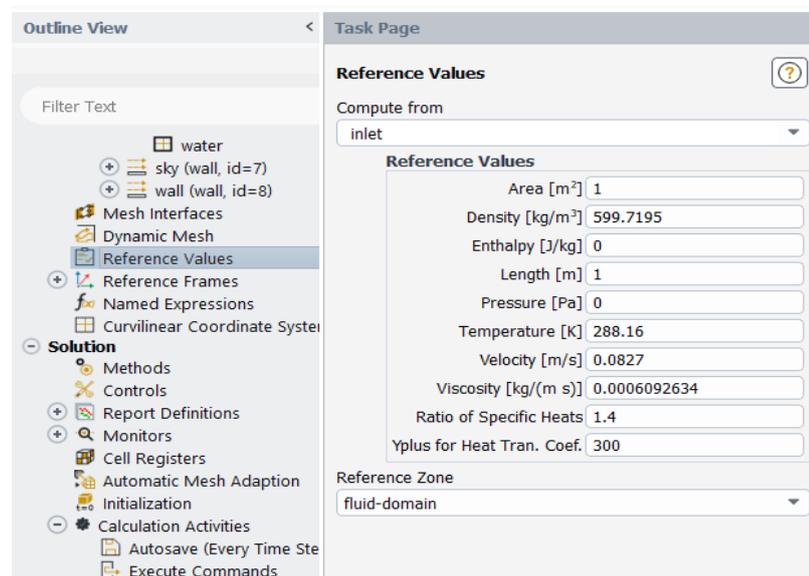
- Damping Type:** Two Dimensional
- Compute From Inlet Boundary:** inlet
- Level Inputs:** Free Surface Level [m] 0,6; Bottom Level [m] 0
- Uni-Directional Beach Inputs:** X-Direction 1; Y-Direction 0; Z-Direction 0
- Damping Length Specification:** End Point and Wave Lengths
- End Point [m]:** 3,7; **Wave Length [m]:** 0,587; **Number Of Wave Lengths:** 2
- Resistance Inputs:** Relative Velocity Resistance Formulation; Linear Damping Resistance [s⁻¹]: 8.002285111114

Buttons for 'Apply', 'Close', and 'Help' are visible at the bottom of the dialog.

Gambar 3.21 Pengaturan parameter *Numerical beach*

6) References Values

Di bagian ini ditentukan titik mulai perhitungan (*Compute From* diisi dengan *inlet*) dan zona yang menjadi referensi (*Reference Zone* diisi dengan *fluid-domain*). Nilai referensi akan muncul dengan sendirinya namun dapat pula diubah seperti yang terlihat pada Gambar 3.22.

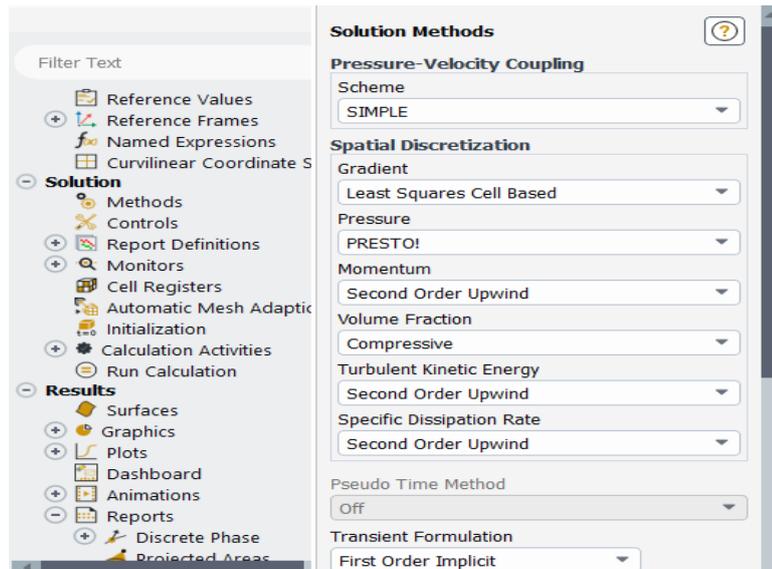


Gambar 3.22 Reference Values

b. Solution

1) Solution Method

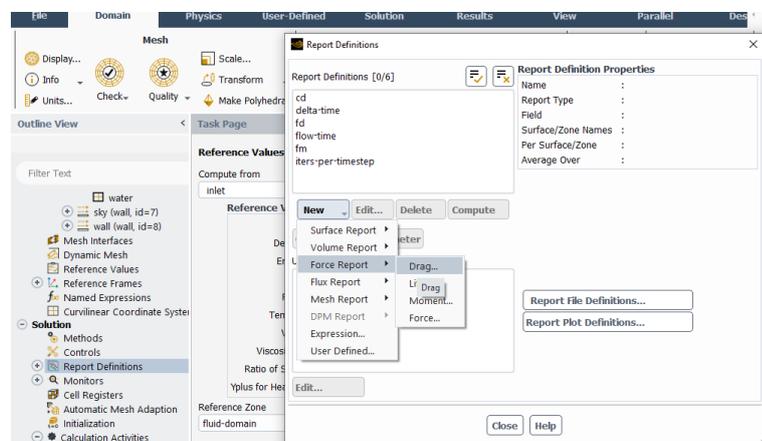
Untuk simulasi ini digunakan metode solusi type SIMPLE (*default*) yang merupakan penyelesaian untuk VOF (*volume of fluid*).



Gambar 3.23 Parameter *Solution method*

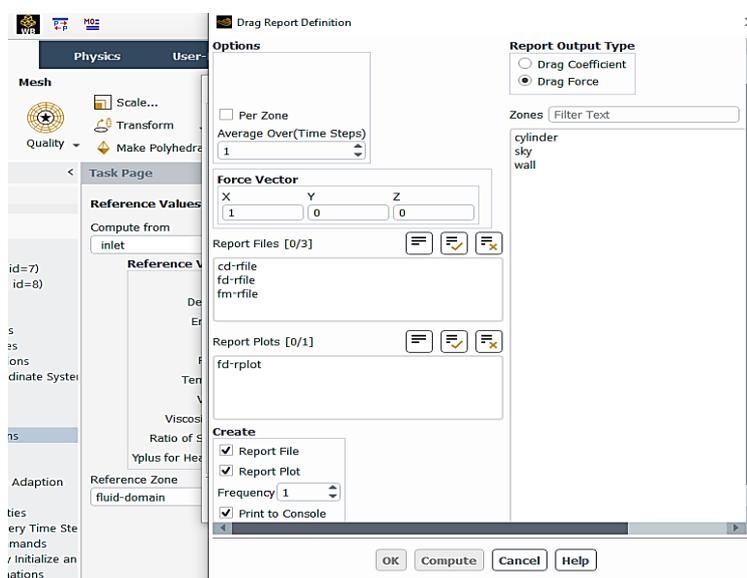
2) Report Definitions

Digunakan untuk menentukan keluaran yang diinginkan dari analisis yang telah dilakukan. Keluaran dapat berupa data yang disimpan dalam folder analisis yang telah dibuat, sehingga nantinya dapat diolah untuk jenis keluaran lain yang tidak dapat langsung dikeluarkan oleh *Fluent*. Untuk simulasi ini dibutuhkan data keluaran Gaya seret (*Drag force*) yang diterima kedua silinder (Gambar 3.24)



Gambar 3.24 Cara memilih *Drag force* pada *Report definition*

Setelah memilih *report definition drag force* dilakukan pengaturan seperti pada gambar 3.25 di bawah ini. Untuk simulasi pada silinder kembar, pengaturan pada bagian *zones* dilakukan 2 kali dengan memilih masing-masing silinder agar dihasilkan *report drag force* untuk *upstream cylinder* dan *downstream cylinder*.

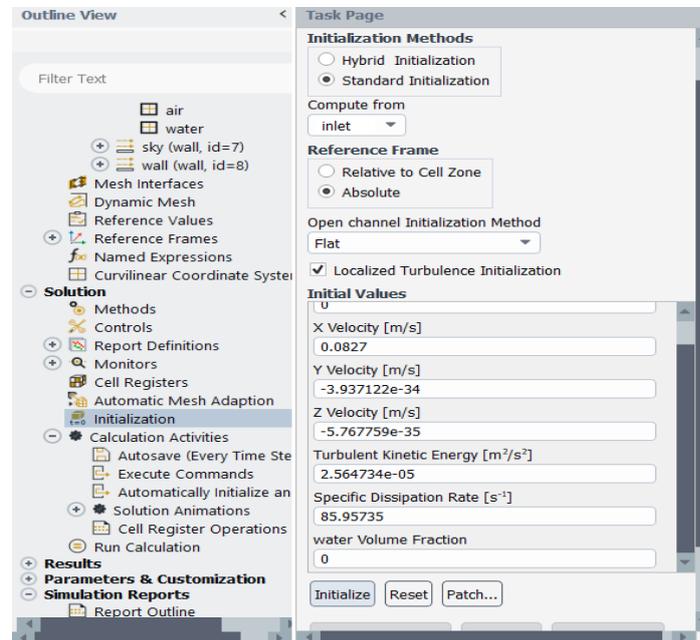


Gambar 3.25 Pengaturan *Report Definition Drag Force*

3) Initialization

Proses inisialisasi pada dasarnya menetapkan setiap sel komputasi dengan nilai yang berfungsi sebagai tebakan awal bagi komputer/solver untuk melanjutkan simulasi. Langkah ini penting dalam simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) karena semakin dekat tebakan awal dengan solusi akhir, maka semakin cepat konvergensinya. Untuk pengaturan parameter

proses inisialisasi simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 3.26 (ANSYS Inc., 2022).

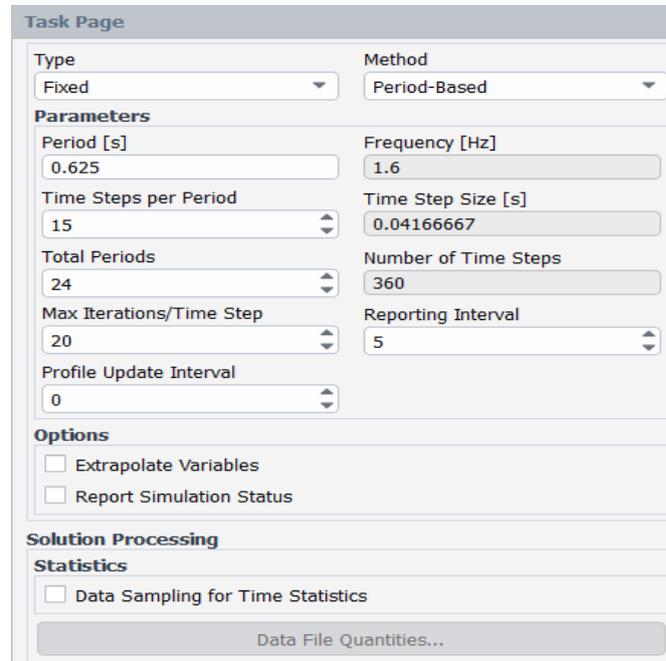


Gambar 3.26 Parameter *Initialization*

4) *Calculation*

Setelah dilakukan proses *initialization*, proses pengaturan solusi diakhiri dengan kalkulasi. Dalam proses ini terlebih dahulu diatur beberapa hal, yaitu *period*, *time-step size*, dan *number of time step*. Apabila telah diatur maka proses kalkulasi dapat dimulai dengan memilih *Calculate*. Dari parameter kolom ombak pada simulasi ini, digunakan periode 0.625 detik (frekuensi 1.6 Hertz) sehingga ini menjadi inputan untuk *period*. Besar *time step per period* diambil 15 sehingga diperoleh *time step size* adalah 0.041667. Karena penulis menginginkan simulasi dalam waktu 15 detik, maka total periode diatur agar

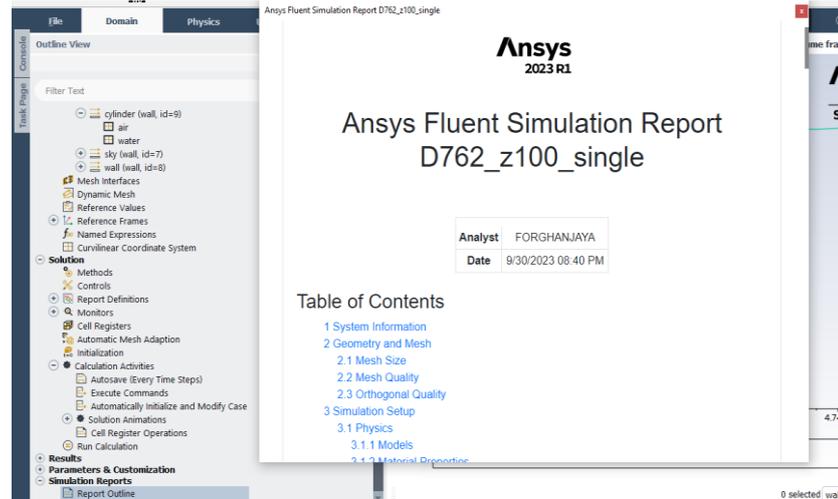
nilai minimal untuk *number of time step* = 15 detik / *time step size* = $15/0.041667=360$.



Gambar 3.27 Run Calculation

3.3.3 Postprocessing

PostProcessing adalah tahap yang berkaitan dengan hasil analisis yang telah dilakukan dengan keluaran berupa diagram kontur, grafik, maupun *file* hasil. Data parameter yang telah diinput pada tahap setup dan solution disertai hasil simulasi yang telah dilakukan dapat dilihat pada ANSYS Fluent Simulation Report (Gambar 3.28). Sedangkan Gambar 3.29 menunjukkan *file* keluaran yang berupa *notepad file*.



Gambar 3.28 Ansys Fluent Simulation Report

Solution Status

Flow Time: 16.25

Time Step: 260

	↑ Value ↓	Absolute Criteria ↓	Convergence Status ↓
continuity	0.0005751997	0.001	Converged
k	0.000124146	0.001	Converged
omega	0.0001215305	0.001	Converged
vf-water	9.318297e-06	0.001	Converged
x-velocity	6.198779e-05	0.001	Converged
y-velocity	5.766106e-05	0.001	Converged
z-velocity	2.650709e-05	0.001	Converged

Gambar 3.29 Solusi status hasil simulasi yang telah konvergen

```

fd1-rfile.out - Notepad
File Edit Format View Help
"fd1-rfile"
"Time Step" "fd1 etc.."
("Time Step" "fd1" "flow-time")
0 -0.0002433730866213298 0
1 3.071269977672877 0.0625
2 -0.1277814960086117 0.125
3 -0.4363412291214916 0.1875
4 -0.2938615965112335 0.25
5 -0.08154461675116857 0.3125
6 0.1210401048544465 0.375
7 0.2797925555550089 0.4375
8 0.3930254808624227 0.5
9 0.4645039306079992 0.5625
10 0.4862126807410411 0.625
11 0.4661338477764299 0.6875
12 0.4314056757056093 0.75
13 0.3807379151466989 0.8125
14 0.3205791905427061 0.875
15 0.261302424232943 0.9375
16 0.2102725264111936 1

```

Gambar 3.30 *File notepad* hasil simulasi

3.4 Target Hasil Simulasi

Untuk langkah awal dilakukan perhitungan gaya seret mengacu persamaan Morison untuk silinder tunggal menggunakan excel dan matlab. Selanjutnya penulis melakukan simulasi dengan ANSYS Fluent pada model silinder tunggal menggunakan parameter sesuai data dalam perhitungan tadi, sehingga diperoleh juga output berupa gaya seret. Ketika nilai hasil simulasi sudah mendekati nilai perhitungan matlab, maka pengaturan parameter ANSYS tersebut juga dapat digunakan untuk simulasi silinder kembar dengan variasi rasio jarak sumbu silinder (x) terhadap panjang gelombang (L). Selain itu divariasikan juga kedalaman silinder pada air (z) dan diameter silinder (D). Rekan lain melakukan pengujian (eksperimen) dengan data-data yang sama, namun hasilnya berupa gaya Morison, sehingga tidak dapat dibandingkan secara langsung. Data-data yang telah diperoleh dari hasil simulasi tersebut akan dianalisa lebih jauh guna menjawab tujuan penelitian ini.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang telah diperoleh dalam penelitian ini, maka dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Jarak antar silinder menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi gaya seret yang diterima silinder kembar dan pola aliran yang terjadi di sekitarnya. Adanya beda fasa pada gelombang tidak berpengaruh dalam penelitian ini.
2. Besar gaya *drag* berbanding lurus dengan diameter silinder, semakin besar diameter maka makin besar gaya *drag* yang diterima oleh silinder.
3. Untuk variasi kedalaman, besar gaya *drag* berbanding terbalik dengan kedalaman silinder terbenam, semakin dalam posisi silinder semakin kecil gaya *drag* yang terjadi.
4. Dalam penelitian ini gaya inersia sangat dominan, menempatkan gaya seret pada penelitian ini pada wilayah *Large Inertia* (1% *drag*)
5. Nilai koefisien *drag* C_D coba dibandingkan dengan rasio x/D ke dalam bentuk grafik. Diperoleh rentang nilai koefisien drag antara 1.24 sampai 4.39 untuk silinder *upstream* sedangkan untuk silinder *downstream* berkisar antara -1.26 sampai 4.41. Rentang nilai koefisien *drag* terlebar diperoleh pada parameter kedalaman $z = 0.2\text{m}$, baik untuk silinder *upstream* maupun *downstream*.

6. Nilai Re pada penelitian ini berkisar antara 1435.53 sampai dengan 6270.33 sehingga aliran yang terjadi masuk ke dalam kelompok tipe aliran no C dan D sesuai pada Gambar 2.13.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat penulis berikan untuk kelanjutan penelitian ini, yaitu:

1. Pemodelan dengan model VOF dapat diubah ke model 1 fase untuk mencari nilai gaya *drag* dan aliran arus (*streamline*) yang terjadi.
2. Modifikasi mesin pengombak dengan motor inverter agar mudah dalam penggantian parameter ombak sehingga dapat melakukan pengujian pada berbagai parameter ombak.
3. Melakukan simulasi menggunakan ANSYS Aqwa atau software lain untuk menghitung gaya Morison sehingga bisa dibandingkan secara langsung besar gaya Morison hasil simulasi dengan hasil eksperimen.
4. Melakukan simulasi terkait parameter-parameter gelombang lainnya dan dilakukan dalam bentuk 2D mengingat untuk simulasi 3D kebutuhan spesifikasi computer/laptop untuk ANSYS sangat tinggi serta membutuhkan waktu proses dalam simulasi yang sangat lama.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamson, A. W., & Gast, A. P. (1990). Physical Chemistry of Surfaces. Wiley. In *Physical Chemistry of Surfaces* (Vol. 524, Issue 11, p. A467).
- Alam, M., Elhimer, M., Wang, L., Lo, D., & Wong, J. C. W. (2018). Vortex shedding from tandem cylinders. *Experiments in Fluids*, 59(3), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00348-018-2501-8>
- ANSYS Inc. (2015). *ANSYS Fluent Meshing User's Guide*. 15317(April), 724–746.
- ANSYS Inc. (2021). *Ansys Fluent Theory Guide*. Release 20(July).
- ANSYS Inc. (2022). *ANSYS FLUENT User's Guide* (Vol. 15317, Issue October, pp. 724–746).
- Arthi, T., & Murugeswari, G. (2012). *Submerged Floating Tunnels*. www.ijert.org
- Bearman, P. W. (2011). Circular cylinder wakes and vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 27(5–6), 648–658. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.03.021>
- Boccotti, P., Arena, F., Fiamma, V., & Romolo, A. (2013). Two small-scale field experiments on the effectiveness of Morison's equation. *Ocean Engineering*, 57, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.08.011>
- Budiman, E., Pengetahuan, J. I., & Teknologi, D. (2017). *JURNAL TEKNOLOGI SIPIL CONSTRUCTION CHALLENGE OF SUBMERGED FLOATING TUNNEL IN INDONESIA*.
- Chu, C.-R., Lin, Y.-A., Wu, T.-R., & Wang, C.-Y. (2020). *Hydrodynamic Force of a Circular Cylinder close to the Water Surface*.
- Eriksson, J. (2017). *Simulation of the Flow around a Semi-Submersible using CFD*. 65.

<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/248703/248703.pdf>

- Igarashi. (1984). *Characteristics of the Flow around two circular cylinders arranged in tandem*. 20(10), 2278–2281.
- Jiang, B., Liang, B., & Wu, S. (2018). Feasibility study on the submerged floating tunnel in Qiongzhou Strait, China. *Polish Maritime Research*, 25, 4–11. <https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0066>
- Ljungkrona, L., & Sundén, B. (1993). Flow visualization and surface pressure measurement on two tubes in an inline arrangement. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 6(1), 15–27. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(93\)90037-J](https://doi.org/10.1016/0894-1777(93)90037-J)
- MacCamy, R. C., & Fuchs, R. A. (1954). Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory. *U.S. Army Coastal Engineering Research Center (Formerly Beach Erosion Board), Technical Memorandum No. 69*, 69, 17 pages.
- Mazzolani et al. (2008). *Structural Analyses of the Submerged Floating Tunnel Prototype in Qiandao Lake (PR of China)*.
- Mehaute, B. Le. (1976). *An Introduction Hydrodynamics and Water Waves*.
- Morison, J. R., Johnson, J. W., & Schaaf, S. A. (1950). The Force Exerted by Surface Waves on Piles. *Journal of Petroleum Technology*, 2(05), 149–154. <https://doi.org/10.2118/950149-g>
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (1994). *Fundamentals of fluid mechanics*. <https://doi.org/10.1201/b11709-7>
- Norwegian Public Road Administration (NPRA). (2012). *Feasibility study for crossing the Sognefjord - Submerged floating tunnel*.
- Nugraha, N. (2021). *Pemodelan dan Analisis Dinamik SFT sebagai Sarana Penyebrangan Antar Pulau* (Issue July).
- Olsen, O., Norconsult, & Reinertsen. (2016). *Bjørnafjord submerged floating tube*

bridge, k3/k4 technical report.

Rahmawati, S., Djatmiko, E. B., & Prastianto, R. W. (2012). *Numerical study on the interaction of Vortex-Induced Vibrations (VIV) among four standing flexible cylinders with the In-Line Square configuration in the uniform flow*. 1(1).

railssystem.net. (2023). *SFT Anchoring Types*. <https://railssystem.net/submerged-floating-tunnel/>

Reeve, D., Chadwick, A., & Fleming, C. (2018). *Coastal Engineering Processes, Theory & Design Practice* (3rd editio, Issue July).

Reichl, P., Hourigan, K., & Thompson, M. C. (2005). Flow past a cylinder close to a free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 533(June 2005), 269–296.
<https://doi.org/10.1017/S0022112005004209>

Sarpkaya, T. (2010). *Wave Forces On Offshore Structure*.

Shankar, N. J., Cheong, H.-F., & Subbiah, K. (1988). Wave Force Coefficients for Submarine Pipelines. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, 114, 472–486.

Sheridan, J., Lin, J., & Rockwell, D. (1997). *Flow past a cylinder close to a free surface*. 330, 1–30.

Skjelbreia, L. and Hendrickson, J. A. (1960). Fifth order gravity wave theory. *In Proceedings of the 7th Coastal Engineering Conference*, 184–196.

Sumer, B.M. and FredsØe, J. (2006). Hydrodynamics around cylindrical structures. *In Coastal Engineering* (Vol. 33, Issue 1).
[https://doi.org/10.1016/s0378-3839\(97\)00031-8](https://doi.org/10.1016/s0378-3839(97)00031-8)

Sumner, D. (2010). Two circular cylinders in cross-flow: A review. *Journal of Fluids and Structures*, 26(6), 849–899.
<https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2010.07.001>

Sundar, V. (2016). *Ocean Wave Mechanics Applications in Marine Structures*.

Triatmodjo, B. (1999). *Buku Teknik Pantai* (pp. 1–405). Beta Offset.

Triatmodjo, B. (2010). *Perencanaan Pelabuhan*. Beta Offset.

Zambon, S. (2019). *Dynamic Interaction Between a Submerged Floating Tunnel and a High Speed Train: an Uncoupled Approach*. POLITECNICO DI MILANO.

Zdravkovich, M. M. (1977). *Review of Flow Interference Between Two Circular Cylinders in Various Arrangements*. December 1977.