

**STUDI EKSPERIMENTAL GAYA HIDRODINAMIK
PADA TWIN SUBMERGED FLOATING TUBES**

(Tesis)

**Oleh:
PATRICIUS PRIYA DARMANTO
2125021009**



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

2023

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMENTAL GAYA HIDRODINAMIK PADA TWIN SUBMERGED FLOATING TUBES

Patricius Priya Darmanto, Jamiatul Akmal, Asnawi Lubis

Submerged Floating Tunnel (SFT) merupakan sebuah inovasi yang masih berupa konsep karena sampai saat ini belum ada proyek aktual yang diwujudkan. Meskipun demikian SFT ini menawarkan sebuah peluang baru dalam bidang transportasi yang melewati perairan yang dalam dan lebar, misalnya transportasi antar pulau yang tidak dimungkinkan untuk menggunakan jembatan. *Submerged Floating Tunnel (SFT)* ini juga dapat mengurangi kesibukan dan padatnya jalur pelayaran yang membutuhkan waktu lama dan biaya yang cukup mahal. Terowongan apung terendam adalah inovasi yang memanfaatkan hukum gaya apung untuk menopang struktur pada kedalaman yang moderat dan nyaman. Terowongan ini terbuat dari baja dan beton, dan dapat diikat pada dasar laut atau diapungkan di permukaan air dengan bantuan ponton. SFT harus dirancang untuk menahan semua gerakan, beban operasi, dan beban tidak disengaja, dengan kekuatan dan kekakuan yang cukup. Gelombang air laut atau ombak adalah gangguan yang sangat mempengaruhi keamanan struktur SFT. Salah satu struktur SFT yang ditawarkan adalah terowongan model kembar atau model tandem. Penelitian ini dimaksudkan untuk menambah referensi pengembangan penelitian lanjutan yang diperlukan untuk mewujudkan *Submerged Floating Tunnel (SFT)* yang aman. Penelitian ini menyajikan hasil dari studi eksperimen yang mencari pengaruh jarak antar sumbu tabung kembar atau *twin tubes* yang diperbandingkan dengan panjang gelombang ombak terhadap besarnya gaya hidrodinamik arah horizontal yang direpresentasikan sebagai gaya Morison (gaya *drag* dan inersia) yang diterima oleh kedua tabung kembar tersebut. Studi eksperimen ini mengasumsikan bahwa tidak ada gangguan lain yang mengenai kedua tabung selain semata-mata hanya gelombang air (ombak). Jarak antar tabung (x) yang ditinjau adalah sebesar 1λ atau satu panjang gelombang, $\frac{3}{4}\lambda$, $\frac{1}{2}\lambda$ dan $\frac{1}{4}\lambda$. Sedangkan variasi diameter tabung eksperimen adalah 3", 2.5" dan 2". Untuk melengkapi penelitian maka ditinjau pula gaya pada variasi kedalaman -10 cm, -20 cm, dan -30 cm dari *surface water level*. Penelitian ini menggunakan *load cell* yang dipasang pada tabung 1 (tabung depan yang berhadapan langsung dengan arah gelombang) dan pada tabung 2 (tabung yang berada di belakang tabung 1 ditinjau dari arah gelombang) yang dihubungkan dengan perangkat elektronik berbasis Arduino. Dari penelitian dapat disimpulkan bahwa gaya yang diterima oleh tabung 2 selalu lebih kecil daripada gaya yang diterima tabung 1, hal ini normal karena gaya gelombang tidak secara langsung diterima oleh tabung 2 namun sudah berkurang akibat terganggu tabung 1. Perubahan jarak antar tabung dari 1λ menjadi $\frac{1}{2}\lambda$ mempengaruhi besarnya gaya yang diterima oleh tabung menjadi lebih kecil, namun tidak ditemukan kecenderungan yang pasti bahwa semakin kecil jarak antar tabung selalu akan semakin kecil pula gaya yang diterima tabung. Ditinjau dari variasi kedalaman penempatan tabung, maka terdapat kecenderungan bahwa semakin dalam penempatan tabung akan memperkecil gaya yang diterima tabung akibat gelombang / ombak.

Kata kunci: *Submerged Floating Tunnel (SFT), Twin Tubes, drag force, inertia force*

ABSTRACT

Experimental Study of Hydrodynamic Force of Twin Submerged Floating Tubes (SFT)

Patricius Priya Darmanto, Jamiatul Akmal, Asnawi Lubis

Submerged Floating Tunnel (SFT) is an innovation that is still in the concept stage because there is no actual project that has been realized so far. However, SFT offers a new opportunity in the field of transportation that passes through deep and wide waters, for example, inter-island transportation that is not possible to use a bridge. SFT can also reduce the busyness and density of shipping lanes that require a long time and quite expensive. A submerged floating tunnel is an innovation that utilizes the law of buoyancy to support the structure at a moderate and comfortable depth. The tunnel is made of steel and concrete, and can be anchored to the seabed or floated on the water surface with the help of pontoons. SFT must be designed to withstand all movements, operational loads, and accidental loads, with sufficient strength and rigidity. One of the SFT structures offered is the twin-tube or tandem model tunnel. This research is intended to add references for further research development needed to realize a safe Submerged Floating Tunnel (SFT). The study presents the results of an experimental study that seeks the influence of the distance between twin tube axes or twin tubes compared to the wave length on the magnitude of the horizontal hydrodynamic force represented as the Morison force (drag and inertia force) received by the two twin tubes. The experimental study assumes that there is no other disturbance affecting the two tubes other than just water waves (swells). The distance between the tubes (x) reviewed is 1λ or one wavelength, $\frac{3}{4}\lambda$, $\frac{1}{2}\lambda$, and $\frac{1}{4}\lambda$. Meanwhile, the variation in the diameter of the experimental tube is 3", 2.5", and 2". To complete the study, the force is also reviewed at variations in depth of -10 cm, -20 cm, and -30 cm from the surface water level. This study uses a load cell mounted on tube 1 (the front tube facing the direction of the wave) and on tube 2 (the tube behind tube 1 viewed from the direction of the wave) connected to an Arduino-based electronic device. From the study, it can be concluded that the force received by tube 2 is always smaller than the force received by tube 1, which is normal because the wave force is not directly received by tube 2 but has been reduced due to the disturbance of tube 1. The change in the distance between the tubes from 1λ to $\frac{1}{2}\lambda$ affects the magnitude of the force received by the tube to be smaller, but there is no tendency that the smaller the distance between the tubes, the smaller the force received by the tube. Reviewed from the variation in the depth of tube placement, there is a tendency that the deeper the tube placement, the smaller the force received by the tube due to waves/swells.

Keywords: *Submerged Floating Tunnel (SFT), Twin Tubes, drag force, inertia force*

**STUDI EKSPERIMENTAL GAYA HIDRODINAMIK
PADA TWIN SUBMERGED FLOATING TUBES**

**Oleh:
PATRICIUS PRIYA DARMANTO
2125021009**

(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

: STUDI EKSPERIMENTAL GAYA
HIDRODINAMIK PADA TWIN
SUBMERGED FLOATING TUBES

Nama Mahasiswa

: Patricius Priya Darmanto

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2125021009.

Program Studi

: Teknik Mesin

Fakultas

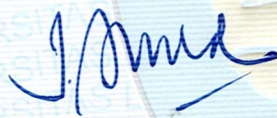
: Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II



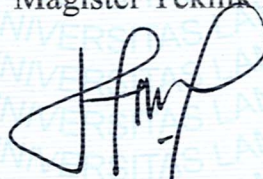
Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.
NIP. 196908011999031002



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


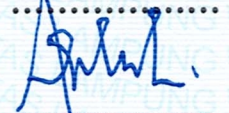
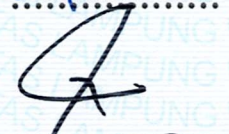
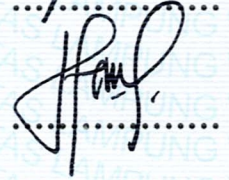
1. Tim Penguji

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.
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 Orisinalitas

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 plagiat, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang undangan yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 November 2023

Yang Membuat



Patricius Priya Darmanto
NPM: 2125021009

Riwayat Hidup

Penulis lahir di Yogyakarta pada tanggal 15 Maret 1969, sebagai anak keenam dari enam bersaudara, dari pasangan Bapak Paulus Sudarman dan Ibu Anastasia Alpiah. Jenjang pendidikan yang ditempuh oleh penulis adalah sebagai berikut:

1. SD Kanisius Demangan Baru Yogyakarta pada tahun 1976 lulus tahun 1982.
2. SMPN 2 Yogyakarta pada tahun 1982, lulus tahun 1985.
3. SMA Kolese de Britto, Yogyakarta pada tahun 1985 dan lulus pada tahun 1988
4. Tahun 1988 melanjutkan pendidikan Diploma III di Akademi Teknik Mesin Industri (ATMI) Surakarta, yang sekarang menjadi Politeknik ATMI Surakarta, lulus tahun 1991.
5. Sambil bekerja sebagai Instruktur sejak 1991 di ATMI Surakarta penulis melanjutkan pendidikan Strata I pada tahun 1998 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, lulus pada tahun 2002.
6. Pindah bekerja dari ATMI Surakarta ke Sekolah Sugar Group, Lampung Tengah pada bulan Januari 2014, dan pada September 2014 penulis melanjutkan pendidikan Pascasarjana di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Bandar Lampung dan lulus Magister Teknik pada tahun 2016.
7. Pada tahun 2021 penulis mendapatkan kesempatan menempuh pendidikan Pascasarjana, Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama belajar di UNILA, penulis melakukan penelitian Tesis di bawah bimbingan Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. dan Dr. Asnawi Lubis. Dan saat ini penulis bekerja sebagai pengajar di Sekolah Vokasi Sugar Group Companies, Lampung.

Bandar Lampung, 10 November 2023

Penulis,

Patricius Priya Darmanto

Ucapan Terima kasih

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat, karunia dan anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan judul “Studi Eksperimental Gaya Hidrodinamik Pada *Twin Submerged Floating Tubes*” guna memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung. Untuk menyelesaikan laporan ini, penulis banyak dibantu oleh berbagai pihak. Dengan penuh rasa syukur dan hormat, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia yang telah diberikan,
2. Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing I.
3. Dr. Asnawi Lubis, selaku dosen pembimbing II sekaligus dosen pembimbing akademik.
4. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., selaku dosen Penguji I.
5. Dr. Harmen, S.T., M.T., selaku dosen Penguji II sekaligus Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung.
6. Para dosen Pasca Sarjana Teknik Mesin yang sudah memberikan ilmu kepada penulis dengan sepenuh hati.
7. Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
8. Keluarga yang telah mendukung penuh selama masa studi Program Pascasarjana ini dan selama penulisan Tesis.
9. Rekan-rekan Tim Laboratorium Mekanika Struktur, Nur Fajar Sepyanto dan Bima khususnya yang banyak memberikan bantuan pada penelitian ini

10. Teman-teman S-2 Angkatan 2021 Program Studi Teknik Mesin Universitas

Lampung yang selalu membantu, mendukung dan memberikan semangat untuk menyelesaikan jenjang pendidikan Magister ini.

11. Pihak lain yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Masih banyak kekurangan pada Tesis ini, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Akhir kata sebagai harapan semoga Tesis ini bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan pembaca pada umumnya.

Bandar Lampung, 10 November 2023

Penulis,

Patricius Priya Darmanto

Kata Pengantar

Puji dan syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan kasih karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tulisan Tesis yang berjudul: “Studi Eksperimental Gaya Hidrodinamik Pada *Twin Submerged Floating Tubes*”.

Kendala dan hambatan dalam penyelesaian Tesis ini seperti halnya kehidupan, datang silih berganti, namun jauh lebih banyak kebaikan dan sukacita yang hadir lewat berbagai pihak. Banyak bantuan dan dukungan yang begitu besar yang telah penulis terima dari banyak pihak, dari keluarga, rekan kerja, teman seperjalanan, rekan sejawat di laboratorium Mekanika Struktur yang dengan senang hati dan tulus telah membantu, mencurahkan waktu, tenaga dan pikiran sehingga tulisan ini dapat tersaji. Sangat disadari bahwa terdapat banyak kekurangan dan ketidaksempurnaan dalam penelitian maupun penyajian tulisan Tesis ini sebagai wujud keterbatasan yang dimiliki penulis, oleh karena itu penulis mengharapkan saran yang membangun agar tulisan ini lebih bermanfaat lagi bagi yang membutuhkan. Terima kasih.

Bandar Lampung, 10 November 2023

Penulis,

Patricius Priya Darmanto

Daftar Isi

ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
Lembar Pengesahan	vi
Pernyataan Orisinalitas.....	vii
Riwayat Hidup	viii
Ucapan Terima kasih.....	ix
Kata Pengantar	xi
Daftar Isi.....	xii
Daftar Gambar.....	xiv
Daftar Tabel	xvii
Daftar Simbol.....	xviii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan	4
1.3. Hipotesis.....	5
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Sistematika Penulisan.....	6
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Sifat-sifat kelautan	7
2.2. Gelombang	10
2.2.1. Tinggi Gelombang	10
2.2.2. Periode gelombang.....	11
2.3. Teori Gelombang Amplitudo Hingga	12
2.3.1. Teori gelombang <i>Stokes</i>	12
2.3.2. Teori gelombang <i>Solitary</i>	16
2.3.3. Teori gelombang <i>Cnoidal</i>	16
2.4. Teori Ombak Linier.....	17
2.5. Beban Hidrodinamik	20
2.5.1. Gaya Seret	20

2.5.2. Gaya Inersia	22
2.5.3. Bilangan KC.....	23
2.5.4. Efek kekasaran permukaan silinder	25
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1. Waktu dan Tempat	27
3.2. Metode Penelitian.....	27
3.3. Parameter penelitian.....	29
3.4. Eksperimen.....	30
3.4.1. Bahan dan Alat.....	30
3.4.2. Tahapan Eksperimen.....	34
3.4.3. Desain Eksperimen	36
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1. Validasi alat uji	38
4.2. Hasil Eksperimen	38
4.3. Pembahasan Hasil Eksperimen Tabung Diameter 3 Inch	39
4.4. Pembahasan Hasil Eksperimen Tabung Diameter 2.5 Inch	48
4.5. Pembahasan Hasil Eksperimen Tabung Diameter 2 Inch	53
4.6. Analisa perhitungan dengan persamaan Morison	58
4.7. Pengaruh posisi kedalaman tabung (z) terhadap besarnya gaya	62
4.8. Pengaruh jarak antar sumbu tabung (x) terhadap besarnya gaya	66
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	68
5.1. Kesimpulan	68
5.2. Saran.....	68
Daftar Pustaka	70

Daftar Gambar

Gambar 1.1 Solusi Alternatif Penyeberangan Antar Daratan	1
Gambar 1.2 <i>Twin tubes Submerged Floating Tunnel</i>	3
Gambar 2.1 Profil Gelombang	8
Gambar 2.2 Perkembangan ombak di daerah energi angin.....	9
Gambar 2.3 <i>Downward Zero-crossing</i>	10
Gambar 2.4 Klasifikasi Gelombang	12
Gambar 2.5 Klasifikasi teori gelombang	13
Gambar 2.6 Bentuk profil gelombang gravitasi.....	14
Gambar 2.7 Sketsa definisi pergerakan gelombang.....	15
Gambar 2.8 Perbandingan orde kedua dengan teori linier.....	15
Gambar 2.9 Profil gelombang soliter	16
Gambar 2.10 Profil gelombang Cnoidal	17
Gambar 2.11 Parameter dan profil ombak	18
Gambar 2.12 Aliran air melewati silinder.....	20
Gambar 2.13 Nilai koefisien seret silinder halus terhadap bilangan Reynold	21
Gambar 2.14 Variasi gaya seret dan inersia.....	23
Gambar 2.15 Wilayah penerapan gaya inersia dan seret	24
Gambar 2.16 Koefisien seret dan inersia sebagai fungsi bilangan Re dan KC, (a) Koefisien seret, (b) Koefisien inersia.....	25
Gambar 2.17 Efek kekasaran permukaan pada koefisien gaya <i>in-line</i>	26
Gambar 3.1 Sketsa Depan Kolam Eksperimen	27
Gambar 3.2 Ilustrasi Kolam Eksperimen.....	28
Gambar 3.3 Ilustrasi Parameter Eksperimen.....	30
Gambar 3.4 Perangkat akuisisi data	30
Gambar 3.5 Kolam Pembangkit Ombak	31
Gambar 3.6 Perangkat Uji – Pemegang Tabung Silinder (<i>Twin Tubes Gate</i>)	31
Gambar 3.7 Perangkat Uji – Pemegang Tabung.....	32
Gambar 3.8 Posisi <i>load cell</i> dan peletakan tabung silinder	33
Gambar 3.9 Penempatan <i>load cell</i> pada silinder.....	33

Gambar 3.10 Pemegang silinder tampak depan dan samping.....	33
Gambar 3.11 Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 4.1 Grafik Eksperimen Tabung Ø3", x=1λ, z=100 mm.....	40
Gambar 4.2 Grafik Eksperimen Tabung Ø3" Variasi 1 dan 2 pada z=100 mm ...	41
Gambar 4.3 Grafik Eksperimen Tabung Ø3" Variasi x= ¾ λ, z=100 mm	41
Gambar 4.4 Grafik Eksperimen Tabung Ø3", x= ¼ λ, z=100 mm.....	42
Gambar 4.5 Grafik Eksperimen Tabung Ø3", x= ½ λ, z=100 mm.....	42
Gambar 4.6 Gaya pada tabung 1 variasi x= ¾ λ, ½ λ dan ¼ λ dibandingkan dengan gaya pada tabung 1 dan 2 pada variasi x= 1λ	43
Gambar 4.7 Gaya pada tabung 2 variasi x= ¾ λ, ½ λ dan ¼ λ dibandingkan dengan gaya pada tabung 1 dan 2 pada variasi x= 1λ	43
Gambar 4.8 Data hasil eksperimen tabung Ø3", z= 200 mm pada x=1λ	44
Gambar 4.9 Data hasil eksperimen tabung Ø3", z= 200 mm pada x= ¾ λ	44
Gambar 4.10 Data hasil eksperimen tabung Ø3", z= 200 mm pada x= ¼λ	45
Gambar 4.11 Data hasil eksperimen tabung Ø3", z= 200 mm pada x= ½λ	45
Gambar 4.12 Data hasil eksperimen tabung Ø3", z= 300 mm pada x= 1λ	46
Gambar 4.13 Data hasil eksperimen tabung Ø3", z= 300 mm pada x= ¾λ	46
Gambar 4.14 Data hasil eksperimen tabung Ø3", z= 300 mm pada x= ¼λ	47
Gambar 4.15 Data hasil eksperimen tabung Ø3", z= 300 mm pada x= ½λ	47
Gambar 4.16 Hasil eksperimen tabung Ø2.5", z= 100 mm pada x= 1λ	48
Gambar 4.17 Hasil eksperimen tabung Ø2.5", z= 100 mm pada x= ¼λ.....	49
Gambar 4.18 Hasil eksperimen tabung Ø2.5", z= 100 mm pada x= ½ λ	49
Gambar 4.19 Hasil eksperimen tabung Ø2.5", z= 100 mm pada x= ¾ λ	49
Gambar 4.20 Hasil eksperimen tabung Ø2.5", z=200 mm pada x=½λ dan x=¼λ	51
Gambar 4.21 Hasil eksperimen tabung Ø2.5", z=200 mm pada x=1λ dan x=¾λ	51
Gambar 4.22 Hasil eksperimen tabung Ø2.5", z=300 mm pada x=1λ dan x=¾λ	52
Gambar 4.23 Hasil eksperimen tabung Ø2.5", z=300 mm pada x=½λ dan x=¼λ	53
Gambar 4.24 Hasil eksperimen tabung Ø2", z=100 mm pada x=1λ dan x=¾λ ...	54
Gambar 4.25 Hasil eksperimen tabung Ø2", z=100 mm pada x=½λ dan x=¼λ..	54
Gambar 4.26 Hasil eksperimen tabung Ø2", z=200 mm pada x=1λ dan x=¾λ ...	55
Gambar 4.27 Hasil eksperimen tabung Ø2", z=200 mm pada x=½λ dan x=¼λ..	56

Gambar 4.28 Hasil eksperimen tabung $\varnothing 2''$, $z=300$ mm pada $x=1\lambda$ dan $x=3/4\lambda$...	57
Gambar 4.29 Hasil eksperimen tabung $\varnothing 2''$, $z=300$ mm pada $x=1/2\lambda$ dan $x=1/4\lambda$..	57
Gambar 4.30 Gaya Morison pada tabung $\varnothing 3''$ $z= 100$ mm	58
Gambar 4.31 Ilustrasi Gaya Morison tabung $\varnothing 3''$ di kedalaman $z=100$ mm	59
Gambar 4.32 Gaya Morison pada tabung $\varnothing 3''$ $z= 200$ mm	59
Gambar 4.33 Gaya Morison pada tabung $\varnothing 3''$ $z= 300$ mm	59
Gambar 4.34 Gaya Morison pada tabung $\varnothing 2.5''$ $z= 200$ mm	60
Gambar 4.35 Gaya Morison pada tabung $\varnothing 2.5''$ $z= 100$ mm	60
Gambar 4.36 Gaya Morison pada tabung $\varnothing 2.5''$ $z= 300$ mm	60
Gambar 4.37 Gaya Morison pada tabung $\varnothing 2''$ $z= 100$ mm	61
Gambar 4.38 Gaya Morison pada tabung $\varnothing 2''$ $z= 200$ mm	61
Gambar 4.39 Gaya Morison pada tabung $\varnothing 2''$ $z= 300$ mm	61
Gambar 4.40 Gaya pada tabung upstream $\varnothing 3''$ dengan variasi x dan z	62
Gambar 4.41 Gaya pada tabung downstream $\varnothing 3''$ dengan variasi z	63
Gambar 4.42 Gaya pada tabung upstream $\varnothing 2.5''$ dengan variasi z	63
Gambar 4.43 Gaya pada tabung downstream $\varnothing 2.5''$ dengan variasi z	64
Gambar 4.44 Gaya pada tabung downstream $\varnothing 2''$ dengan variasi z	65
Gambar 4.45 Gaya pada tabung upstream $\varnothing 2''$ dengan variasi z	65
Gambar 4.46 Gaya pada tabung $\varnothing 3''$ dengan variasi jarak x	66
Gambar 4.47 Gaya pada tabung $\varnothing 2.5''$ dengan variasi jarak x	66
Gambar 4.48 Gaya pada tabung $\varnothing 2''$ dengan variasi jarak x	67

Daftar Tabel

Tabel 3.1 Parameter dan nilainya	29
Tabel 4.1 Data Hasil Eksperimen $\text{Ø}3''$ Variasi $x=1\lambda$, $z=100$ mm	39
Tabel 4.2 Data Hasil Eksperimen $\text{Ø}3''$, $x=3/4\lambda$, $z=100$ mm.....	40
Tabel 4.3 Data Hasil Eksperimen $\text{Ø}3''$ Variasi 3 dan 4 pada $z=100$ mm.....	42
Tabel 4.4 Data Eksperimen Gaya Rata-Rata pada tabung $\text{Ø}2.5''$ $z=100$ mm	48
Tabel 4.5 Data gaya yang diterima tabung $\text{Ø} 2.5''$, pada $z = 200$ mm	50
Tabel 4.6 Data gaya yang diterima tabung $\text{Ø} 2.5''$, pada $z = 300$ mm	52
Tabel 4.7 Data gaya yang diterima tabung $\text{Ø} 2''$, pada $z = 100$ mm	53
Tabel 4.8 Data gaya yang diterima tabung $\text{Ø} 2''$, pada $z = 200$ mm	55
Tabel 4.9 Data gaya yang diterima tabung $\text{Ø} 2''$, pada $z = 300$ mm	56
Tabel 4.10 Rata-rata besarnya gaya pada tabung <i>upstream</i>	58

Daftar Simbol

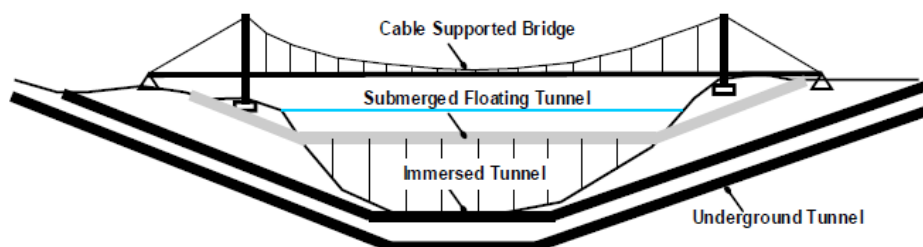
Simbol	Keterangan	Satuan
η	Amplitudo	m,mm
T	Periode	s
t	Waktu	s
f	Frekuensi	Hz
m	Massa	kg
F	Gaya gangguan	N
ρ	Densitas	kg/m ³
u, v	Kecepatan	m/s
D	Diameter Silinder	inch,mm
d	Kedalaman air	m,mm
H	Tinggi gelombang	m,mm
z	Kedalaman silinder	m,mm
λ, L	Panjang gelombang	m,mm
\ddot{u}	Percepatan	m/s ²
R	Kelengkungan	m, mm
C_d	Koefisien drag	-
C_m	Koefisien inersia	-
A	Luas penampang	m ² , mm ²
f_D	Gaya drag	N
f_i	Gaya inersia	N
g	Percepatan gravitasi	m/s ²
Re	Reynold number	-

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Menghubungkan tepi laut, danau, atau sungai yang berseberangan adalah salah satu tugas utama yang dihadapi oleh banyak negara. Ini menjadi kebutuhan penting untuk pengembangan wilayah di sekitar jalur air. Saat ini, isu ini tetap menjadi topik yang hangat dan penting, seperti yang dapat dilihat dari banyaknya infrastruktur besar yang telah dibangun atau sedang direncanakan dalam beberapa tahun terakhir di seluruh dunia. Contohnya adalah terowongan terendam yang dibangun di Selat Bosphorus di Turki, terowongan kanal yang menghubungkan pantai Perancis dengan pantai Inggris Raya, atau jembatan gantung yang dirancang untuk menghubungkan Sisilia dan Calabria di Selat Messina di Italia. Ada banyak kasus penting dan nyata lainnya yang dapat disebutkan.

Dengan keadaan Indonesia sebagai negara kepulauan, transportasi antara daratan atau pulau menjadi suatu kebutuhan yang sangat penting untuk keperluan perekonomian, sosial, dan berbagai hal lainnya. Sebagai contoh, salah satunya adalah jalur transportasi laut yang sangat sibuk di Selat Sunda, yang menghubungkan Laut Jawa dan Samudera Hindia, memisahkan pulau Sumatera dan pulau Jawa. Karena transportasi antar pulau Sumatera dan Jawa yang sangat sibuk tersebut diperlukan solusi jalur transportasi selain menggunakan kapal yang memungkinkan untuk dapat menghubungkan pulau yang satu dengan yang lain.



Gambar 1.1 Solusi Alternatif Penyeberangan Antar Daratan

Gambar 1.1 menunjukkan beberapa solusi alternatif untuk menyeberang antar daratan. Salah satu opsi alternatif yang mungkin, meskipun membutuhkan banyak penelitian, adalah menggunakan *Submerged Floating Tunnel* (SFT). Jembatan dan terowongan terendam sering digunakan untuk melintasi daerah perairan. SFT merupakan inovasi dalam pengembangan infrastruktur yang dapat menghubungkan pulau-pulau secara efisien. SFT juga dikenal sebagai jembatan/terowongan apung terendam, terowongan gantung, atau jembatan Archimedes.

Konsep Terowongan Apung Terendam pertama kali muncul pada awal abad ini, namun hingga saat ini belum ada proyek aktual yang dilakukan karena masih banyak keraguan dan penelitian yang perlu dilakukan. Dalam konteks kebutuhan masyarakat akan pertumbuhan regional dan perlindungan lingkungan, terowongan terapung terendam menawarkan peluang baru. Terowongan apung terendam adalah inovasi yang memanfaatkan hukum gaya apung untuk menopang struktur pada kedalaman yang moderat dan nyaman (Budiman dkk, 2019). Terowongan ini terbuat dari baja dan beton, dan dapat diikat pada dasar laut atau diapungkan di permukaan dengan bantuan ponton (Zou et al, 2022). Terowongan terapung ini memanfaatkan danau dan saluran air untuk membawa lalu lintas di bawah air dan ke sisi lainnya, di mana dapat terhubung dengan jalanan pedesaan, kota, atau infrastruktur bawah tanah. Terowongan terapung adalah konsep baru yang belum pernah digunakan sebelumnya, terutama untuk jarak yang panjang. Kedalaman dasar air bervariasi, dengan kedalaman maksimum mencapai 8 km. Dalam hal konstruksi, jembatan di atas permukaan air dan terowongan di atas permukaan tanah atau di bawah permukaan tanah tidak memungkinkan karena tekanan dan kedalaman yang tinggi. Oleh karena itu, terowongan apung dapat digunakan pada kedalaman sekitar 30 m dari permukaan laut, yang cukup untuk kapal besar melewatinya tanpa hambatan. (Priya dkk, 2018)

SFT harus dirancang untuk menahan semua gerakan, beban operasi, dan beban tidak disengaja, dengan kekuatan dan kekakuan yang cukup. SFT mengikuti semua tindakan lingkungan yang khas dari lingkungan air laut, seperti gelombang,

arus, getaran permukaan air, gempa bumi, korosi, es, dan pertumbuhan biota laut. Oleh karena itu, untuk menggunakan SFT, perlu dilakukan banyak penelitian karena fluktuasi kondisi laut yang sangat mempengaruhi keamanan struktur SFT. Gelombang air laut adalah gangguan yang sangat mempengaruhi SFT.

Salah satu struktur SFT yang ditawarkan adalah terowongan model kembar atau model tandem (*twin tubes*) seperti dapat dilihat pada Gambar 1.2. Sehubungan dengan hal tersebut, maka hipotesis yang dapat dibuat adalah bahwa terdapat hubungan antara jarak sumbu silinder kembar (*twin tubes*) dan panjang gelombang air terhadap gaya hidrodinamik arah horizontal yang diterima oleh kedua silinder kembar tersebut. Dan pada perbandingan jarak antar sumbu dua silinder terhadap panjang gelombang tertentu, gaya hidrodinamik arah horizontal yang diterima oleh *twin tubes* menjadi paling kecil / paling lemah. Dengan rasio tersebut memungkinkan untuk diterapkan pada infrastruktur yang menggunakan dua silinder kembar seperti halnya SFT. Oleh karena itu dalam penelitian ini dibuat eksperimen untuk melihat pengaruh rasio jarak antar sumbu *twin tubes* dengan panjang gelombang terhadap gaya hidrodinamik arah horizontal pada *twin tubes*.



Gambar 1.2 *Twin tubes Submerged Floating Tunnel*

Berikut ini ada beberapa tulisan hasil penelitian yang telah dilakukan terkait dengan *Twin Submerged Floating Tubes* atau SFT.

Ostlid, (2010), mencoba memberikan gambaran sederhana tentang SFT sebagai sebuah struktur. Keuntungan dan kerugian dibahas dalam tulisannya, tetapi

tidak secara rinci, tujuannya adalah untuk menyoroti beberapa karakteristik dari struktur yang menjanjikan ini untuk masa depan.

Nugraha, N., (2021) melakukan penelitian bahwa gaya hidrodinamis dipengaruhi oleh tingkat kedalaman penempatan, radius kelengkungan tabung, dan diameter tabung / terowongan.

Deng, S. (2020) telah melakukan penelitian dengan metode eksperimen tentang rasio perbandingan antara diameter silinder dengan jarak antar sumbu dua silinder terhadap respon *Vortex Induced Vibrations*.

Penelitian yang lain adalah studi numerik interaksi *Vortex Induced Vibrations* (VIV) antara empat silinder tegak fleksibel dengan konfigurasi *in line square* dalam aliran uniform (Rahmawati, S. dkk, 2012).

Dalam penelitian Zhang, S. dkk (2015) telah melakukan perhitungan beban ombak pada selang/pipa yang mengambang dengan model silinder setengah terbenam menggunakan persamaan Morison yang telah dimodifikasi.

Faktanya adalah bahwa bukan hanya untuk keperluan transportasi manusia yang diperlukan untuk keperluan kehidupan manusia saat ini, namun juga untuk keperluan yang lain misalnya jalur pipa air bersih, jalur pipa minyak, listrik dan sebagainya seringkali harus menggunakan teknologi yang mengharuskan melewati dalam perairan tawar maupun laut baik dengan *single tube* (pipa tunggal) maupun *twin tubes* (pipa kembar).

Untuk dapat membuktikan hipotesis tersebut di atas, penelitian ini bermaksud menggunakan sarana peralatan pembuat gelombang yang ada di Laboratorium Mekanika Struktur, Teknik Mesin, Universitas Lampung. Parameter geometri yang akan digunakan adalah panjang gelombang, jarak antar sumbu silinder, diameter silinder, kedalaman benam silinder.

1.2. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh rasio jarak antar sumbu silinder kembar (*twin tubes*) dengan panjang gelombang terhadap gaya hidrodinamik arah horizontal pada *Twin Submerged Floating Tubes*.
2. Mengetahui pengaruh kedalaman pada gaya hidrodinamik arah horizontal yang diterima oleh dua silinder kembar yang diakibatkan gelombang dengan variasi jarak antar sumbu silinder.

1.3. Hipotesis

Hipotesis yang dibuat adalah rasio tertentu jarak antar sumbu silinder kembar / *twin tubes* dengan panjang gelombang dapat menyebabkan gaya hidrodinamik arah horizontal pada *twin tubes* menjadi paling kecil atau paling lemah.

1.4. Batasan Masalah

- a. Penelitian dilakukan dengan eksperimen menggunakan peralatan kolam ombak yang dimiliki oleh Laboratorium Mekanika Struktur, Teknik Mesin, Universitas Lampung dan membandingkannya dengan hasil analisa perhitungan gaya hidrodinamik dengan menggunakan *software* MATLAB.
- b. Hasil analisa MATLAB hanya digunakan sebagai pembanding, bukan validasi kebenaran atau validasi hasil.
- c. Karakteristik ombak yang digunakan menyesuaikan alat yang menjadi rujukan yaitu peralatan kolam ombak yang dimiliki oleh Laboratorium Mekanika Struktur, Teknik Mesin, Universitas Lampung.
- d. Gelombang air yang dimunculkan oleh peralatan kolam ombak yang dimiliki oleh Laboratorium Mekanika Struktur, Teknik Mesin, Universitas Lampung adalah seragam.
- e. Tidak ada gangguan lain yang mengenai kedua silinder selain semata-mata hanya gelombang air (ombak) tanpa adanya arus.
- f. Silinder yang digunakan untuk eksperimen adalah pipa PVC diameter 3 inch, diameter 2.5 inch dan diameter 2 inch dengan panjang 600 mm.
- g. Gaya yang diukur adalah gaya ke arah silinder secara horizontal saja.

1.5. Sistematika Penulisan

Penulisan dilakukan dengan sistematika penulisan seperti berikut ini:

Pada bagian pendahuluan dijelaskan secara singkat latar belakang dilakukannya penelitian. Setelah latar belakang disampaikan tujuan dan batasan masalah dari penulisan, dan terakhir adalah metode penulisan yang akan dilakukan.

Selanjutnya pada bab kedua yaitu tinjauan pustaka yang berisikan tentang tentang teori dasar yang digunakan untuk dapat melakukan penelitian dan hanya berisi teori yang paling berkaitan dengan penelitian.

Bab ketiga adalah bagian metodologi menjabarkan tahapan-tahapan yang dilakukan untuk mendapatkan hasil dari penelitian. Termasuk juga di dalam bagian ini adalah agenda dan rancangan waktu penelitian.

Bab keempat adalah hasil dan pembahasan menjabarkan hasil penelitian yaitu eksperimen yang dilakukan, dan selanjutnya menjabarkan pembahasan dari hasil yang telah diperoleh.

Kesimpulan dituliskan pada bagian terakhir secara ringkas sesuai dengan tujuannya, dan dibandingkan dengan hipotesisnya apakah sesuai atau tidak. Selanjutnya disampaikan saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Ada beberapa teori yang paling berkaitan yang digunakan untuk melakukan penelitian ini.

2.1. Sifat-sifat kelautan

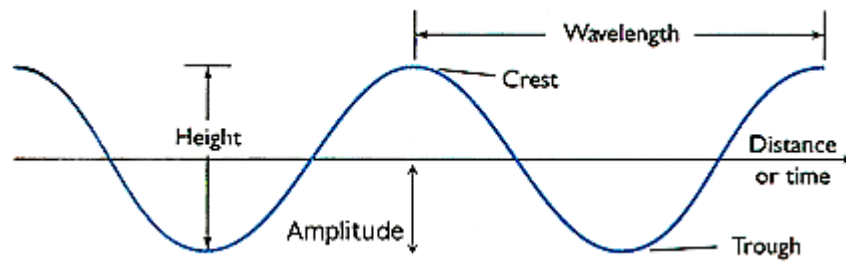
Banyak infrastruktur laut dan lepas pantai yang terletak jauh dari pantai dan berada di dasar laut, yang dipengaruhi oleh karakteristik laut. Laut dapat dibagi menjadi banyak wilayah, yang lokasinya membentang dari pantai hingga laut dalam. Kedalaman laut rata-rata berkisar antara 4.000 meter hingga 10.000 meter, dan aktivitas laut dapat diamati dari kedalaman 1.500 meter hingga kedalaman 6.000 meter, tempat dilakukan uji pengeboran dan ekstraksi minyak.

Struktur laut juga dipengaruhi secara langsung oleh tekanan eksternal yang dihasilkan oleh laut, dan pengoperasian tekanan ini selalu mengikuti hukum hidrolis yang menyatakan bahwa tekanan sebanding dengan kedalaman (Çengel et al, 2006).

$$P = V_w \cdot h \quad (2-1)$$

Dengan h = kedalaman (m)
 V_w = berat jenis dari air laut (N/m^3)
 P = satuan tekanan (Pa)

Tekanan hidrostatis yang diterapkan pada struktur akan bekerja secara merata ke segala arah, baik ke bawah, ke samping, maupun ke atas. Tekanan ini dipengaruhi oleh aktivitas gelombang, terutama di bawah puncak atau *crest*. Nilai tekanan hidrostatis ditentukan oleh ketinggian puncak atau *crest*, sehingga nilainya lebih tinggi dibandingkan dengan di bawah lembah (*trough*). Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh tekanan hidrostatis akan semakin kecil seiring dengan kedalaman yang semakin dalam. Gambar 2.1 menjelaskan beberapa geometri ombak.



Gambar 2.1 Profil Gelombang

Konsep gaya apung juga terkait erat dengan tekanan hidrostatis. Prinsip Archimedes menyatakan bahwa benda yang mengapung akan mendorong air sebanyak beratnya sendiri, sehingga benda akan tenggelam dalam fluida sampai beratnya seimbang dengan tekanan hidrostatis yang bekerja ke atas. Ketika sebuah benda tenggelam, berat total benda di dalam air dapat dianggap lebih kecil daripada berat air yang terdorong atau lebih kecil daripada perbedaan tekanan hidrostatis yang bekerja pada benda tersebut.

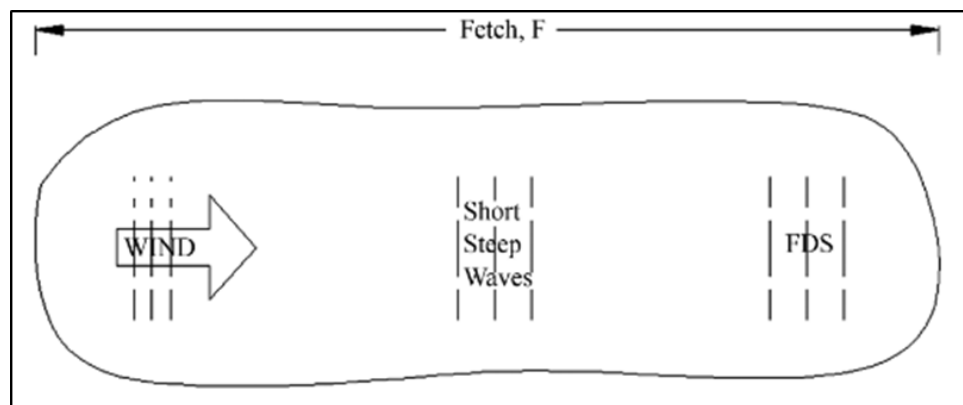
Laut juga memiliki variasi temperatur yang luas, mulai dari 2°C hingga 32°C . Suhu laut cenderung turun dengan cepat seiring dengan kedalaman, dan mencapai temperatur stabil sekitar 2°C pada kedalaman 1000 meter. Laut juga memiliki zona-zona yang berbeda secara kimia, suhu, dan kepadatan. Zonasi ini mempengaruhi beberapa aspek, seperti transmisi cahaya dan suara.

Keberadaan arus juga merupakan karakteristik khas laut, meskipun nilainya tidak begitu besar, namun memiliki efek yang signifikan pada struktur. Arus dapat mengubah karakteristik gelombang dan memberikan tekanan horizontal pada permukaan struktur. Selain itu, efek Bernoulli juga memberikan gaya angkat dan penurunan pada permukaan horizontal. Arus juga memiliki berbagai jenis, seperti sirkulasi oseanik, geostropik, pasang surut, terkendali oleh angin, dan arus massa jenis, termasuk arus yang disebabkan oleh aliran sungai.

Salah satu ciri yang paling khas dari laut adalah adanya ombak. Ombak terjadi karena energi angin yang ditransfer ke permukaan air atau laut. Karakteristik

ombak dipengaruhi oleh tinggi ombak, yaitu jarak antara puncak dan lembah, yang ditentukan oleh energi angin yang berinteraksi dengan permukaan air. Ombak yang masih berada di bawah pengaruh angin disebut "*waves*" dan memiliki puncak yang tinggi dan lembah yang lebar. Namun, ketika ombak ini bergerak keluar dari zona yang terpengaruh angin, mereka disebut "*swells*" dan memiliki panjang gelombang yang besar dengan tinggi ombak yang lebih kecil. Pengaruh angin yang cukup kuat dan berlangsung dalam jangka waktu tertentu akan mencapai kondisi *Fully Developed Sea* (FDS), di mana tambahan energi yang diberikan tidak akan mempengaruhi pertumbuhan ombak karena ombak telah mencapai keseimbangan.

Fase ombak ini bisa dilihat pada Gambar 2.2.



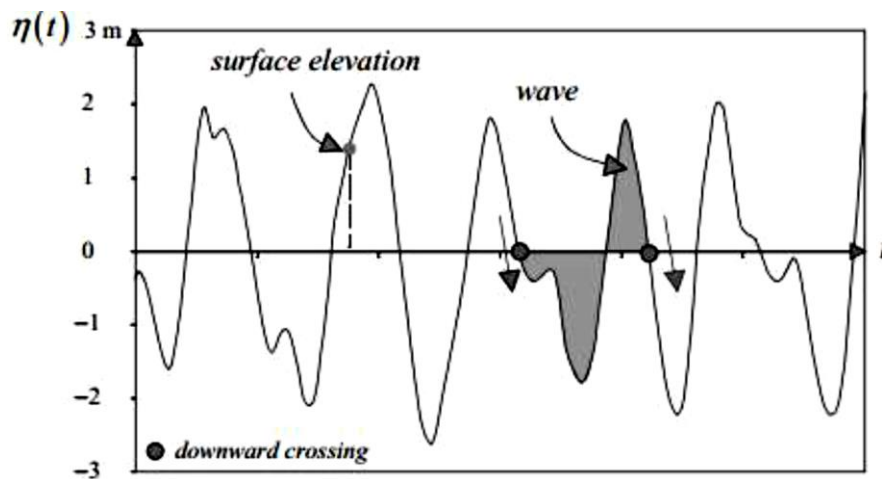
Gambar 2.2 Perkembangan ombak di daerah energi angin

Ombak dalam satu area memiliki variasi yang beragam, meskipun terjadi pada waktu yang sama. Oleh karena itu, ombak seringkali digambarkan dengan tinggi signifikan dan periode signifikannya. Tinggi ombak, H , adalah jarak vertikal antara titik terendah (*trough*) dan titik tertinggi (*crest*) ombak. Sementara itu, periode ombak, T , adalah waktu yang dibutuhkan untuk dua *crest* ombak melewati satu titik. Panjang gelombang, L , adalah jarak horizontal antara dua *crest* ombak. Kecepatan ombak, v (kadang juga disebut c), adalah kecepatan penyebaran ombak.

Mengetahui karakteristik dari ombak memiliki kepentingan dan keuntungan tersendiri, terutama bagi mereka yang ingin merancang struktur yang berkaitan dengan ombak atau ingin mengetahui potensi energi dari ombak. Dengan mengetahui karakteristik ombak, para insinyur dapat merancang struktur yang dapat bertahan dan berfungsi dengan baik dalam kondisi ombak yang berbeda-beda.

2.2. Gelombang

Persepsi umum tentang pengertian ombak atau gelombang adalah ketinggian permukaan laut, namun sebenarnya hal itu tidak tepat. Ada perbedaan antara ketinggian permukaan dan gelombang. Kenaikan permukaan laut dapat terjadi secara seketika dan relatif terhadap beberapa tingkatan referensi, sedangkan gelombang merupakan profile pada kenaikan permukaan antara dua perlintasan nol yang berurutan ke bawah dari ketinggian. Ketinggian permukaan dapat negatif, sedangkan gelombang tidak. Alternatif untuk mendefinisikan gelombang adalah mungkin dapat dimisalkan sebagai profil antara dua perlintasan nol yang berurutan ke atas (*two successive upward zero-crossing*).



Gambar 2.3 *Downward Zero-crossing*

2.2.1. Tinggi Gelombang

Secara umum, tinggi gelombang (H) adalah jarak vertikal antara titik tertinggi dan titik terendah permukaan gelombang. Gelombang hanya mempunyai satu tinggi gelombang.

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (2-2)$$

di mana,

i = angka urutan gelombang (contoh, $i = 1$ adalah gelombang pertama, $i = 2$ adalah gelombang kedua, dan seterusnya)

N = jumlah gelombang

\bar{H} = rata-rata tinggi gelombang

2.2.2. Periode gelombang

Periode gelombang (T) adalah interval waktu antara titik mula dan akhir gelombang (interval antara satu *zero-down crossing* dan berikutnya). Karena itu periode ini disebut dengan *zero-crossing period*, T_0 (Holthuijsen, 2007).

$$\text{mean zero - crossing wave period} = \bar{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{0,i} \quad (2-3)$$

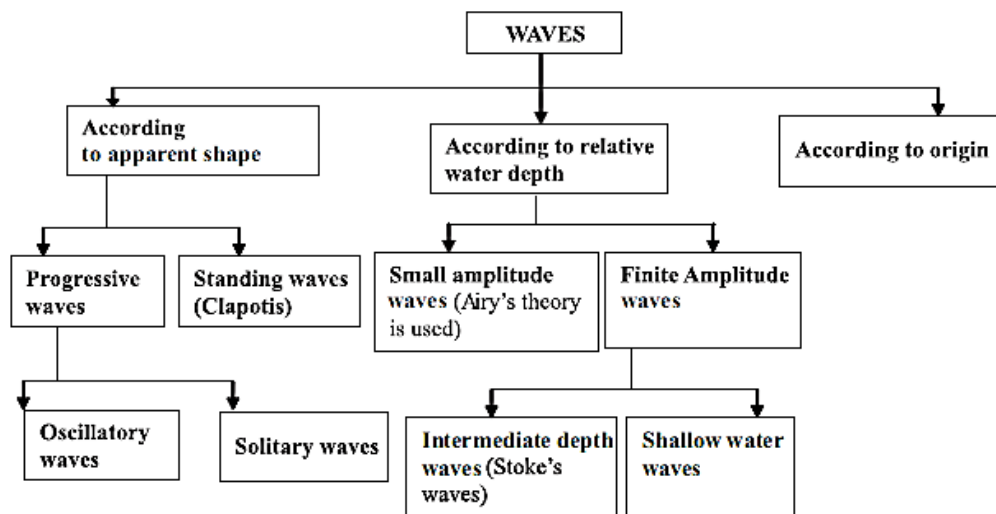
di mana,

T_0 = periode perlintasan nol (s)

\bar{T}_0 = *mean zero - crossing wave period* (s)

N = jumlah gelombang

Berdasarkan pembangkitan dan perambatannya, gelombang laut secara luas dapat dikategorikan: jika tidak ada atau ada penghalang alami atau buatan manusia. Klasifikasi yang lain adalah menurut bentuk nyata, kedalaman air relatif, dan asalnya (Gambar 2.4). Gelombang dapat diklasifikasikan menurut bentuknya sebagai gelombang progresif dan gelombang berdiri. Gelombang progresif bisa beresilasi ataupun soliter. Menurut kedalaman air relatif, terdapat dua jenis gelombang yaitu gelombang amplitudo kecil dan gelombang amplitudo hingga. Sedangkan gelombang amplitudo hingga masih dapat diklasifikasikan lebih lanjut yaitu sebagai gelombang kedalaman menengah (gelombang *Stokes*) dan gelombang air dangkal (gelombang *Cnoidal*) (Sundar, 2016).



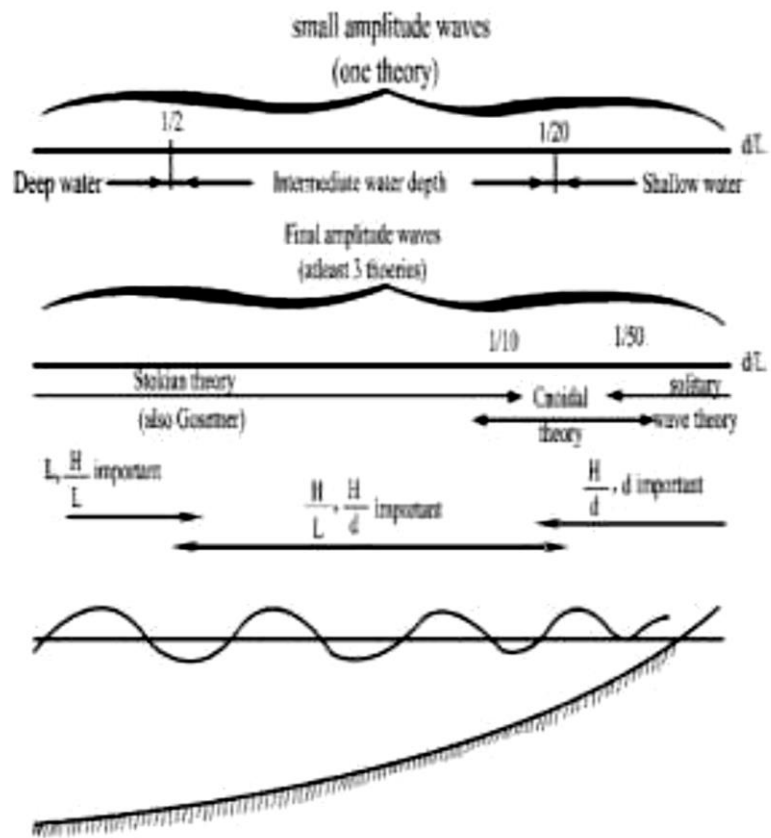
Gambar 2.4 Klasifikasi Gelombang

2.3. Teori Gelombang Amplitudo Hingga

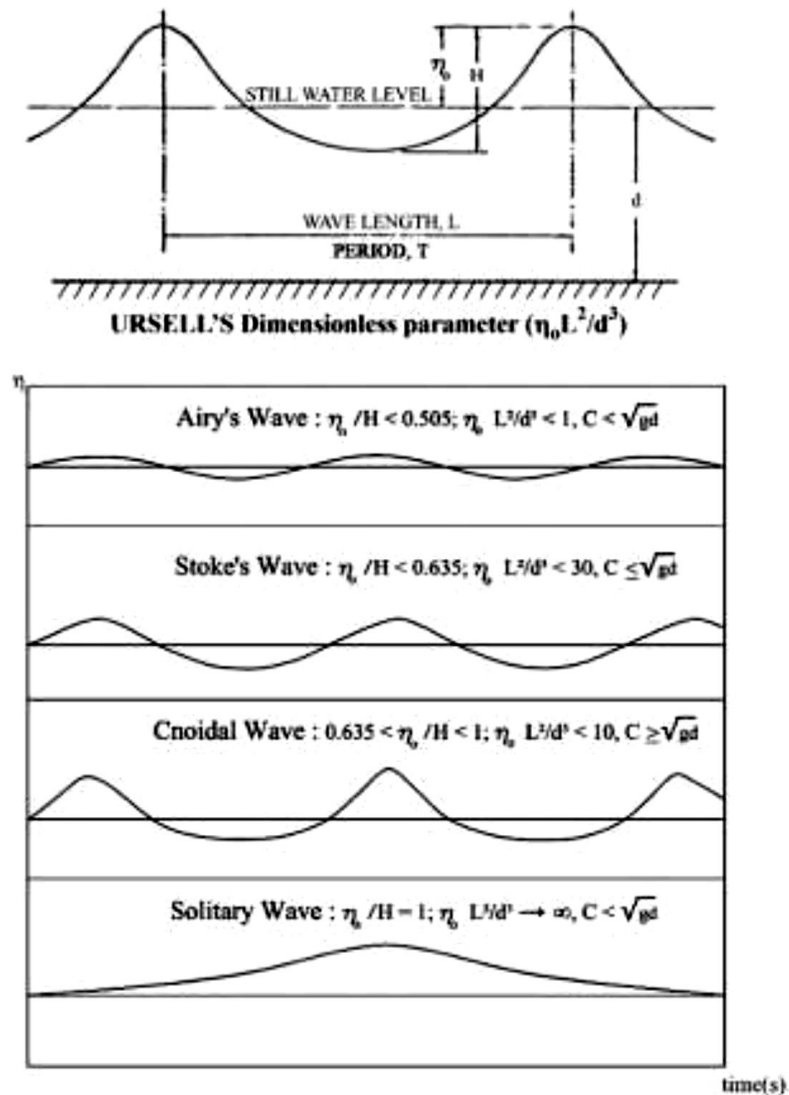
Airy mengembangkan teori gelombang amplitudo kecil atau dikenal juga sebagai teori *Stokes* orde pertama. Teori ini dapat diterapkan secara umum untuk semua nilai d/L , yang merupakan rasio kedalaman air terhadap panjang gelombang. Teori gelombang amplitudo kecil didasarkan pada asumsi bahwa gerakan gelombang cukup kecil sehingga kondisi batas permukaan bebas dapat dilinierisasi. Dalam teori ini, istilah yang melibatkan amplitudo gelombang orde kedua dan lebih tinggi diabaikan. Namun, jika amplitudo gelombang besar, penting untuk mempertahankan suku orde tinggi agar dapat mendapatkan representasi yang akurat dari gerakan gelombang. Teori gelombang amplitudo hingga atau teori orde tinggi *Stokes* serupa dengan konsep ini, di mana istilah orde tinggi tambahan diabaikan dalam teori *Airy*.

2.3.1. Teori gelombang *Stokes*

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

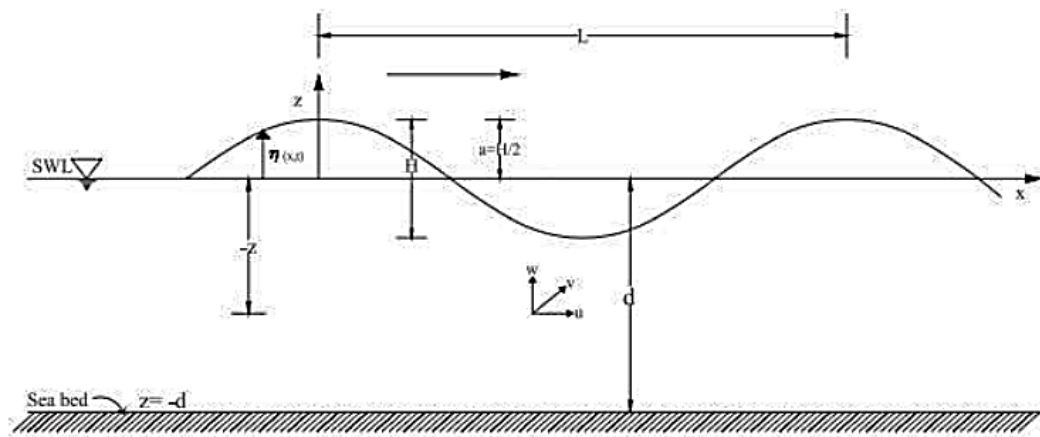


Gambar 2.5 Klasifikasi teori gelombang



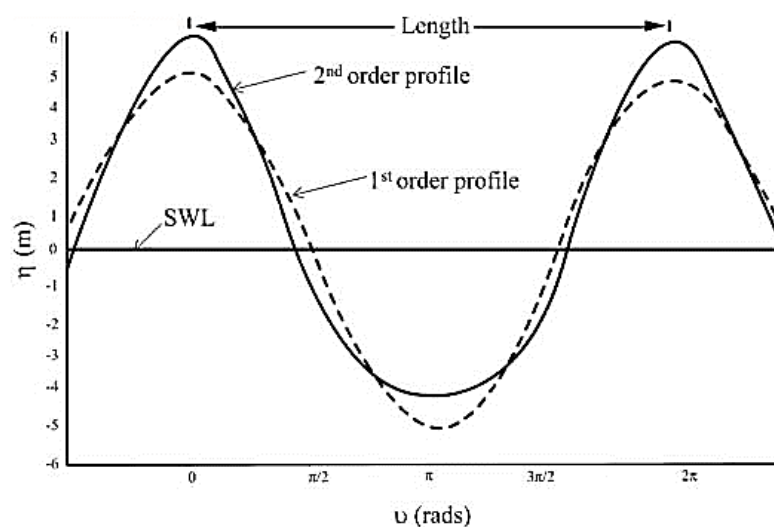
Gambar 2.6 Bentuk profil gelombang gravitasi

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 2.7 Sketsa definisi pergerakan gelombang

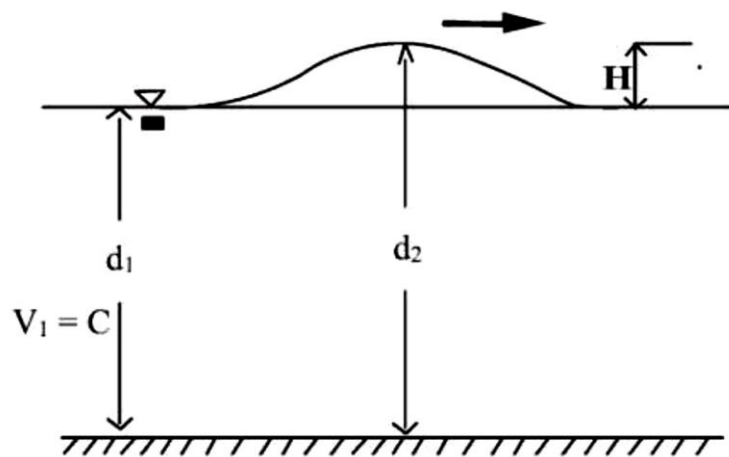
Hubungan antara kecepatan partikel dan bentuk gelombang menjadi kompleks ketika jumlah suku yang dipertahankan meningkat. Penggunaan komputer digital telah memungkinkan solusi yang cepat untuk formulasi tingkat tinggi. Solusi orde dua dikembangkan oleh Biesel pada tahun 1952, sedangkan teori orde ketiga dikembangkan oleh Skjelbreia pada tahun 1959. Selanjutnya, teori orde kelima dikemukakan oleh Skjelbreia dan Hendrickson pada tahun 1960. Dalam praktiknya, gelombang Stokes orde kelima sering digunakan untuk memperkirakan gaya gelombang pada struktur, karena banyak konstanta eksperimental yang didasarkan pada pengukuran lapangan berkorelasi dengan teori ini. Perbandingan antara profil *Stokes* orde dua dan profil gelombang linier dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Perbandingan orde kedua dengan teori linier

2.3.2. Teori gelombang *Solitary*

Pada perairan dangkal, gelombang soliter memiliki puncak yang semakin runcing dan lembah yang semakin melandai. Profil permukaannya berada di atas SWL (Gambar 2.9), sehingga gelombang tersebut tidak periodik dan tidak memiliki panjang gelombang yang pasti. Boussinesq pada tahun 1872 memperoleh karakteristik gelombang soliter pada kedalaman perairan dangkal, berdasarkan persamaan umum aliran *steady*. Gelombang soliter berguna dalam masalah teknik seperti studi tentang gelombang yang sangat panjang seperti tsunami dan dalam 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 panjang gelombang dan periode, melainkan hanya bergantung pada tinggi gelombang dan kedalaman perairan. Dengan demikian, gelombang soliter memiliki karakteristik yang berbeda dari gelombang periodik, terutama pada perairan dangkal. Gelombang soliter berguna dalam berbagai aplikasi teknik dan memungkinkan kita untuk mempelajari sifat gelombang yang hampir pecah di perairan dangkal dan dalam.

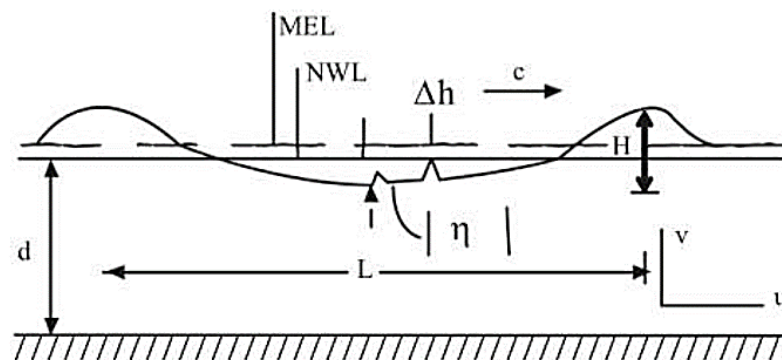


Gambar 2.9 Profil gelombang soliter

2.3.3. Teori gelombang *Cnoidal*

Teori gelombang *Cnoidal* dapat diterapkan pada rentang $1/50 < d/L < 1/10$, yang sama dengan rentang yang valid untuk teori gelombang Stokes dan Solitary. Teori gelombang *Cnoidal* mempertimbangkan syarat orde dua dan memberikan hasil yang lebih akurat dalam keadaan khusus. Teori ini berguna dalam

memperkirakan gaya gelombang pada struktur dan mempelajari kecuraman gelombang maksimum di perairan dalam. Selain itu, teori gelombang *Cnoidal* berlaku untuk parameter Ursell, $(L^3H)/d^3 > 26$. Tipikal gelombang *Cnoidal* dapat dilihat pada Gambar 2.10. Berbagai teori gelombang, termasuk teori gelombang *Airy*, telah dikembangkan untuk mempelajari karakteristik gelombang seperti fluktuasi muka air, kecepatan dan percepatan partikel, tekanan, dan kecepatan rambat gelombang.



Gambar 2.10 Profil gelombang Cnoidal

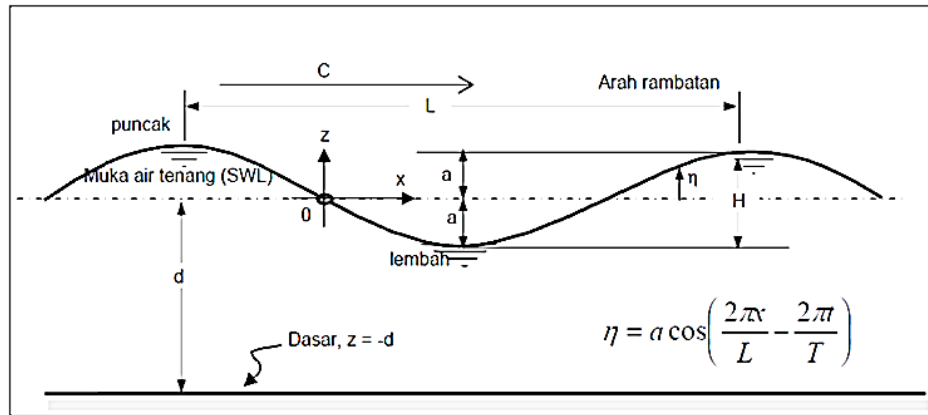
Ketika panjang gelombang meningkat menuju tak terhingga, teori gelombang *Cnoidal* mendekati teori gelombang *soliter*. Karakteristik gelombang dijelaskan dalam bentuk parametrik dalam hal modul k dari integral eliptik. Sementara k tidak memiliki signifikansi fisik, k digunakan untuk menggambarkan hubungan antara berbagai parameter gelombang.

2.4. Teori Ombak Linier

Teori ombak linier atau sering disebut teori ombak *Airy* sering digunakan untuk memprediksi pergerakan ombak laut. Ciri khas dari teori ombak *Airy* adalah tinggi ombak relatif kecil dibandingkan dengan panjangnya. Ada beberapa asumsi yang digunakan, yaitu :

- Fluida tak mampat.
- Gradien temperatur diabaikan.
- Tegangan permukaan diabaikan.
- Gaya geser diabaikan.
- Dasar laut bersifat rigid dan horizontal.

Profil ombak laut didefinisikan melalui beberapa parameter yang ditunjukkan pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 Parameter dan profil ombak

Berdasarkan Gambar 2.11. terdapat parameter yaitu panjang L , tinggi ombak H , periode ombak T , kecepatan ombak c dan kedalaman laut d . Kecepatan ombak dapat dihitung menggunakan persamaan (2-4).

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (2-4)$$

Frekuensi ombak ω dan bilangan ombak k dapat dicari menggunakan persamaan 2-5 dan 2-6.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2-5)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2-6)$$

Untuk menentukan gerakan partikel air pada bidang aliran dibutuhkan kecepatan potensial ϕ yang memenuhi persamaan Laplace. Pada persamaan (2-7) sumbu vertikal dinyatakan oleh z dan sumbu horizontal dinyatakan oleh x .

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2-7)$$

Dengan kondisi batas di dasar laut $\partial\phi / \partial z = 0$ pada $z = -d$. Solusi dari persamaan (2-9) didapatkan dengan mengasumsikan ketinggian ombak H relatif kecil dibandingkan dengan panjang ombak L dan kedalaman laut d (Sarpkaya, 2010). Solusi dari persamaan (2-7) adalah persamaan kecepatan potensial ϕ yang didapat dengan menyelesaikannya menggunakan metode pemisahan variabel. Persamaan kecepatan potensial adalah sebagai berikut.

$$\phi + \frac{\pi H \cosh[k(z + d)]}{kT \sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2-8)$$

Selanjutnya diperoleh hubungan penyebaran sebagai berikut.

$$c^2 = \frac{\omega^2}{k^2} = \frac{g}{k} \tanh(kd) \quad (2-9)$$

di mana

c^2 = kecepatan ombak, m/s

ω = Frekuensi, rad/s

k = bilangan ombak

g = gravitasi, m/s

Berdasarkan hubungan penyebaran, diketahui kecepatan perambatan gelombang merupakan hubungan antara frekuensi dan bilangan ombak. Dari persamaan (2-9) dapat diperoleh persamaan untuk mencari kecepatan perambatan dan panjang ombak. Kecepatan perambatan gelombang dapat dicari menggunakan persamaan (2-10). Panjang gelombang dapat dicari menggunakan persamaan (2-11).

$$c = \frac{g}{\omega} \tanh(kd) \quad (2-10)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2-11)$$

2.5. Beban Hidrodinamik

Pada struktur lepas pantai, penting untuk mengetahui besarnya beban yang diakibatkan oleh pergerakan fluida atau beban 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 adalah jumlah dari gaya seret dan inersia (Braestrup et al., 2009). 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. Persamaan Morison dinyatakan dengan persamaan 2-12.

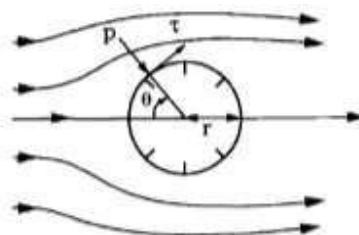
$$f = \frac{1}{2} \rho D C_D v |v| + \rho A \dot{v} + \rho A C_M \dot{v} \quad (2-12)$$

Gaya seret	Gaya Froude- Krylov	Gaya masa hidrodinamik
------------	------------------------	---------------------------

Gaya hidrodinamik pada silinder besar ($D/L > 0,2$), 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.

2.5.1. Gaya Seret

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 (Sumer & Fredsøe, 2006), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Aliran air melewati silinder
(Sumer & Fredsøe, 2006)

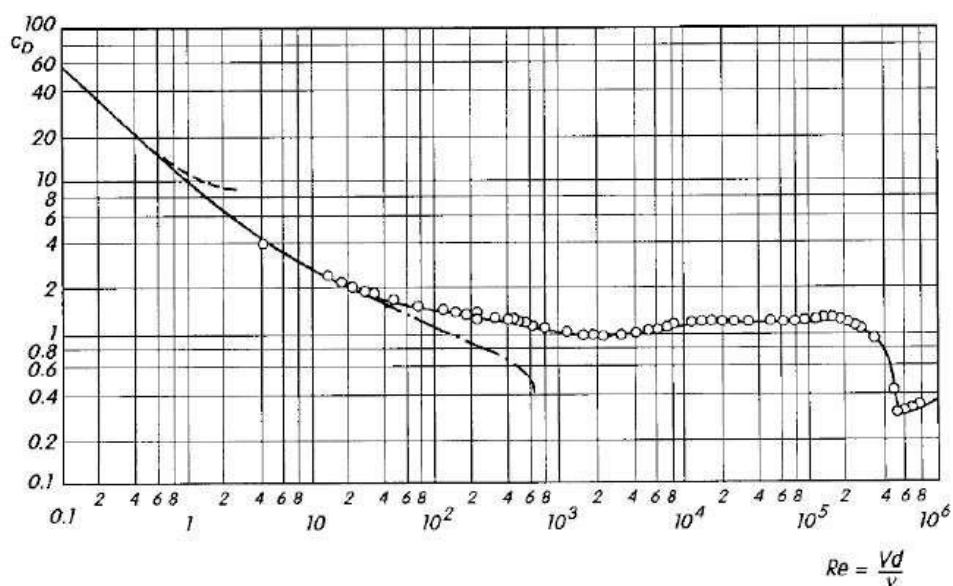
Gaya seret f_d merupakan jumlah dari komponen horizontal yang ditimbulkan oleh gaya akibat tekanan P dan tegangan geser τ . Besarnya gaya seret dinyatakan dengan persamaan (2-13). Di mana ρ , D , C_D dan v masing-masing adalah massa jenis fluida, diameter silinder, koefisien seret dan kecepatan aliran:

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

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

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

Diketahui bahwa bilangan Reynold adalah parameter untuk menentukan jenis aliran di sekitar silinder, sehingga nilai C_D di setiap aliran laminar maupun turbulen berbeda-beda. Banyak eksperimen yang telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh bilangan Reynold terhadap koefisien seret. Gambar 2.13 menunjukkan grafik pengaruh bilangan Reynold terhadap koefisien seret



Gambar 2.13 Nilai koefisien seret silinder halus terhadap bilangan Reynold (Schlichting & Gersten, 2016).

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 $v|v|$. Gaya seret pada aliran terosilasi dinyatakan dengan persamaan (2-15):

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

Pada SFT dengan penyangga tali tambat, ketika aliran air melewati struktur, maka struktur ikut bergerak dengan kecepatan mengikuti arah aliran fluida. Pada kondisi ini terjadi kecepatan relatif antara struktur dan aliran fluida, sehingga gaya seret pada SFT dinyatakan dengan persamaan (2-16)

$$f_d = \frac{1}{2} \rho D C_D (v - \dot{w}) |v - \dot{w}| \quad (2-16)$$

2.5.2. 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 (2-17).

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

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 (2-18).

$$f_{mh} = \rho A C_M \dot{v} \quad (2-18)$$

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.

Persamaan (2-18) 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 (2-4) dapat dimodifikasi menjadi persamaan (2-19).

$$f_{mh} = \rho AC_M(\dot{v} - \ddot{w}) \quad (2-19)$$

Sebelumnya 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 (2-20)

$$C_I = C_M + 1 \quad (2-20)$$

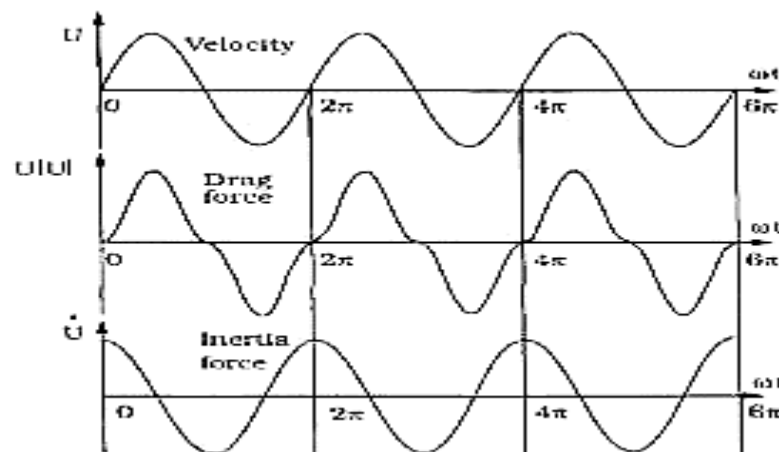
gaya inersia total dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$f_i = \rho AC_I \dot{v} \quad (2-21)$$

Persamaan Morison telah dijustifikasi agar dapat digunakan untuk silinder sirkular terbenam dengan posisi horizontal. (Kawengian, 2018)

2.5.3. 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 2.14.



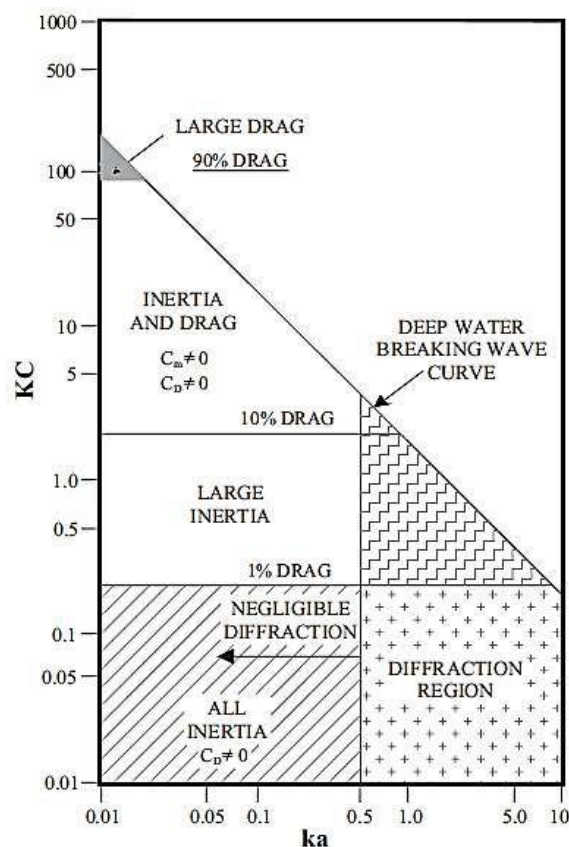
Gambar 2.14 Variasi gaya seret dan inersia
(Sumer & Fredsøe, 2006)

Untuk menyatakan perbandingan gaya inersia dan gaya seret, digunakan bilangan KC (Keulegan-Carpenter). Bilangan KC dinyatakan dengan persamaan (2-

22). Di mana v_{max} dan T masing-masing adalah kecepatan maksimum ombak dan periode ombak.

$$KC = \frac{v_{max}T}{D} \quad (2-22)$$

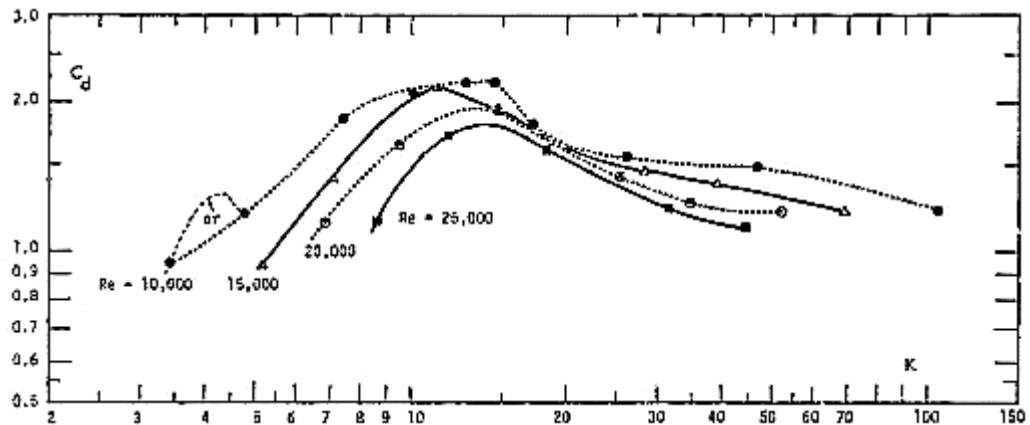
Bilangan KC adalah perbandingan gerakan ombak ($v_{max}T$) terhadap diameter silinder (D). Pada bilangan KC yang kecil, dapat dikatakan bahwa gerakan partikel air di sekitar silinder relatif kecil dibandingkan dengan diameter silinder. Dapat diartikan bahwa pada bilangan KC yang kecil tidak terjadi pemisahan aliran fluida, sehingga gaya inersia dominan terhadap gaya seret. Pada bilangan KC yang besar, gerakan partikel air relatif besar dibandingkan diameter silinder, sehingga terjadi pemisahan aliran bahkan pelepasan pusaran air (*vortex*). Pada kondisi ini gaya seret lebih dominan. Wilayah penerapan gaya yang dominan berdasarkan bilangan KC dan parameter penyebaran $ka = \pi D/L$ ditunjukkan pada Gambar 2.15.



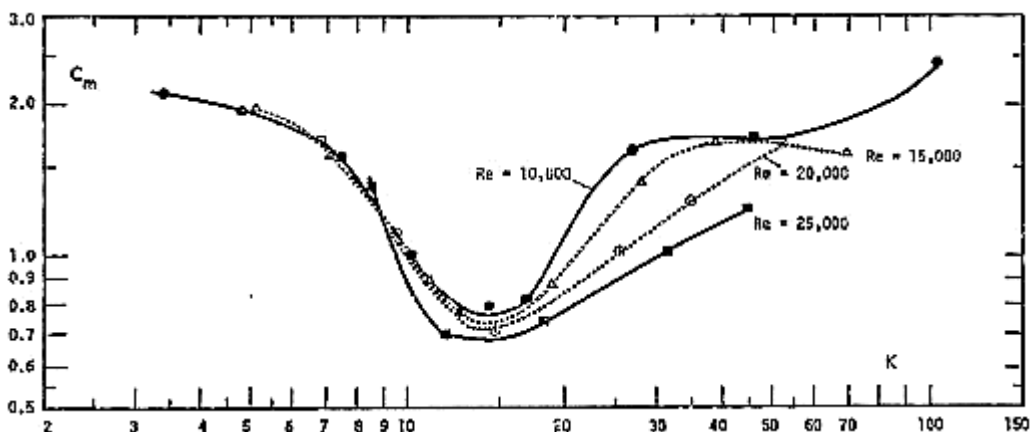
Gambar 2.15 Wilayah penerapan gaya inersia dan seret

(Sundar, 2016)

Beberapa eksperimen menyimpulkan bahwa, pada aliran terosilasi koefisien seret C_D dan inersia C_I bergantung pada bilangan Reynold dan KC. Gambar 2.16 menunjukkan variasi koefisien seret dan inersia terhadap bilangan Reynold dan KC.



(a)



(b)

Gambar 2.16 Koefisien seret dan inersia sebagai fungsi bilangan Re dan KC, (a)

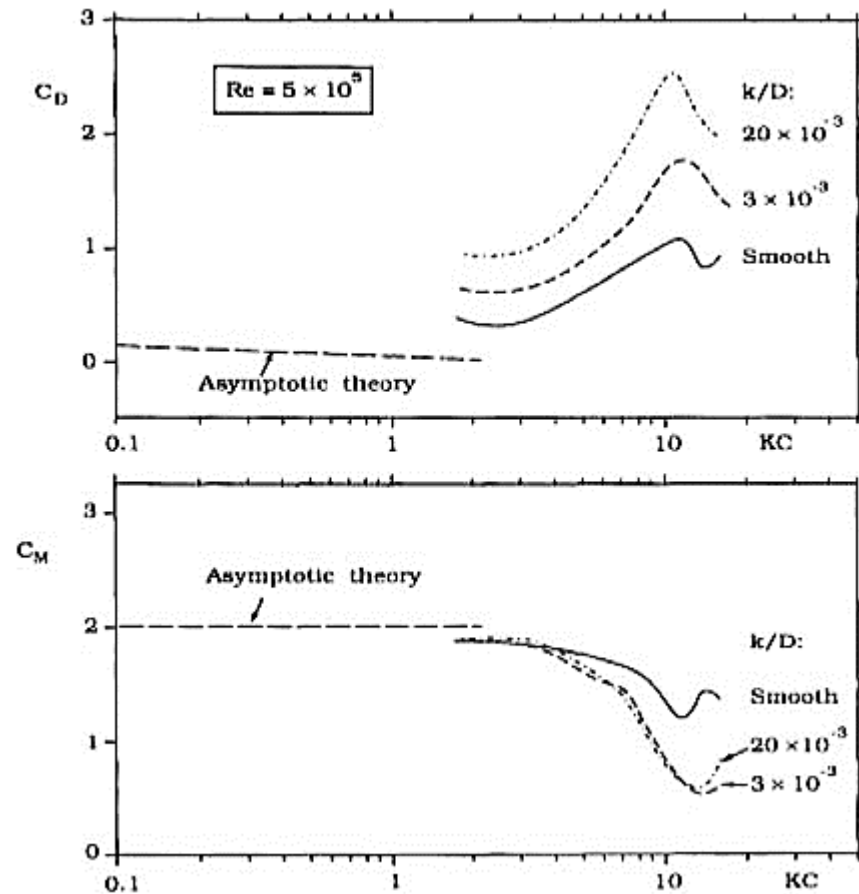
Koefisien seret, (b) Koefisien inersia

(Sarpkaya, 1986)

2.5.4. Efek kekasaran permukaan silinder

Pada permukaan silinder yang kasar, kekasaran tersebut dapat mengubah aspek aliran seperti ketidakstabilan hidrodinamik (*vortex shedding* dan interaksi *vortex*), sudut shedding, tingkat turbulensi, panjang korelasi, dan kekuatan *vortex*. Hal ini dipengaruhi oleh bertambahnya diameter dan proyeksi luas silinder. Oleh

karena itu, diharapkan bahwa efek kekasaran dapat mempengaruhi faktor gaya. Gambar 2.17 memperlihatkan pengaruh kekasaran pada koefisien gaya in-line.



Gambar 2.17 Efek kekasaran permukaan pada koefisien gaya *in-line*

Dari Gambar 2.17 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, 2006).

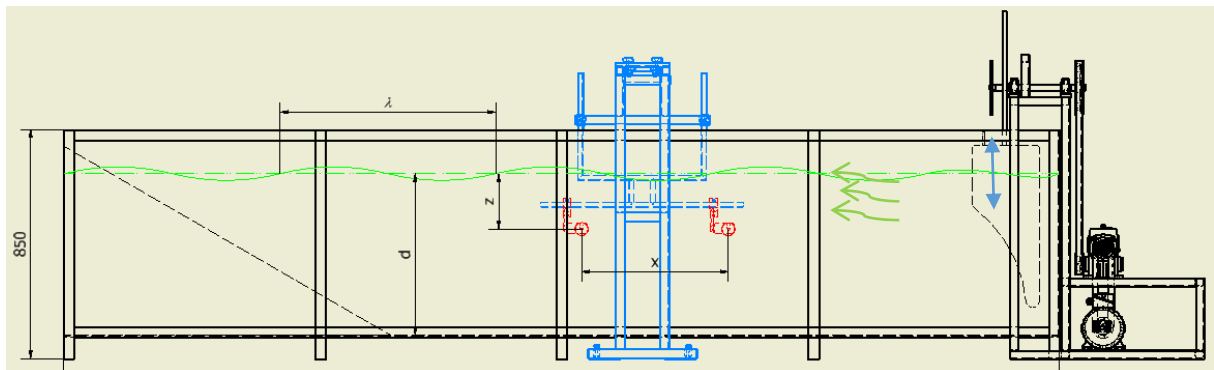
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

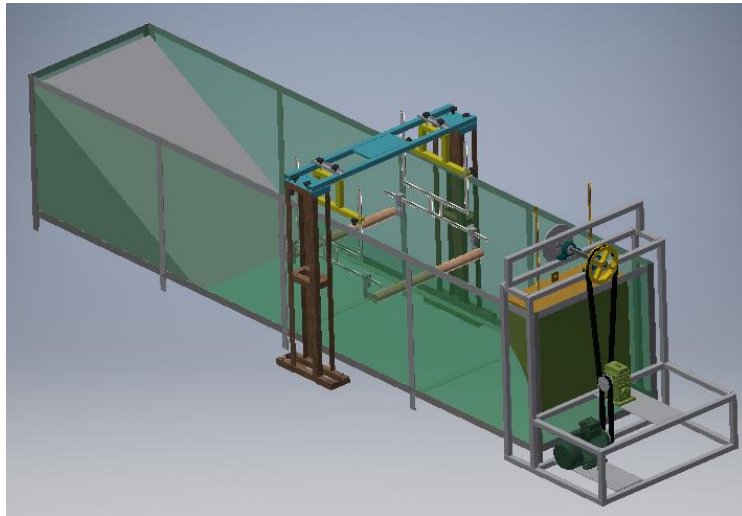
Penelitian dilaksanakan mulai dari Oktober 2022 hingga November 2023. Lokasi penelitian di Laboratorium Mekanika Struktur Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Selain dilakukan penelitian dengan eksperimen yang menggunakan alat uji pemicu ombak yang sudah ada di Lab Mekanika Struktur dilakukan juga analisa numerik dengan menggunakan program MATLAB yang hasilnya dapat digunakan sebagai verifikasi.

3.2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Struktur di mana terdapat kolam ombak yang berukuran panjang 3700 mm lebar 800 mm dan tinggi 850 mm yang diisi air setinggi 600 mm. Generator ombak adalah berupa peralatan mekanik yang digerakkan oleh motor listrik yang dapat diatur bergerak naik turun dengan kecepatan tertentu dan panjang langkah tertentu pula sehingga menghasilkan gelombang atau ombak dengan frekuensi yang tertentu pula sesuai dengan penempatan tuas eksentriknya. Gambar 3.1 adalah Sketsa Tampak Depan Kolam Eksperimen yang ada di Laboratorium Mekanik Struktur. Di bagian kanan terdapat perangkat mekanik sebagai generator ombak, sehingga ombak datang dari sebelah kanan mengenai perangkat uji.



Gambar 3.1 Sketsa Depan Kolam Eksperimen



Gambar 3.2 Ilustrasi Kolam Eksperimen

Validasi alat uji dilakukan dengan cara menggunakan silinder tunggal diameter 3” yang dipasangkan pada *bracket* pemegang silinder depan dan disetel pada kedalaman $z=-10$ cm. Saat mekanisme generator ombak dihidupkan maka akan terjadi ombak pada kolam tersebut. Beberapa detik setelah generator hidup ombak akan menjadi lebih stabil, maka dimulailah pengukuran gaya oleh sensor *load cell*. Gaya diterima sebagai sinyal elektrik oleh perangkat berbasis Arduino dan diubah menjadi data gaya. Dengan menggunakan *stopwatch* sebagai *timer*, pengambilan data dilakukan selama 10 detik, dimulai dari detik ketiga setelah generator ombak hidup. Hal ini disebabkan karena pada tiga detik pertama ombak belum stabil dan setelah detik kelima belas dan seterusnya ombak menjadi tidak stabil karena adanya pengaruh ombak balik serta .goncangan kolam. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali untuk meminimalisir deviasi. Setelah data gaya pada silinder tunggal diperoleh, maka dilakukan perbandingan dengan perhitungan numerik hasil dari MATLAB yang mana parameter yang dimasukkan dalam perhitungan numerik misalnya panjang gelombang diambil dari data eksperimen. Hasil dari perhitungan numerik dan data eksperimen tersebut dijadikan dasar validasi alat uji. Selanjutnya dilakukan pengambilan data dengan dua tabung kembar menggunakan parameter yang sudah ditetapkan.

3.3. Parameter penelitian

Sebagai parameter penelitian, maka diambil beberapa parameter variabel yaitu jarak antar tabung atau silinder, diameter tabung, dan posisi kedalaman tabung dari permukaan air. Sedangkan parameter tetapnya adalah panjang gelombang, periode / frekuensi gelombang, tinggi gelombang, kedalaman dari permukaan air ke dasar kolam, kecepatan fluida, dan massa jenis fluida. Parameter tetap ini diperoleh dari data pengamatan kolam ombak di Laboratorium Mekanika Struktur

d = kedalaman total dasar air = 600 mm

λ = panjang gelombang = 582.5 mm

ρ = massa jenis fluida = 997 kg/m³

ω = frekuensi gelombang = 10.044 rad/s

x = jarak antar *tube* (*center to center*)

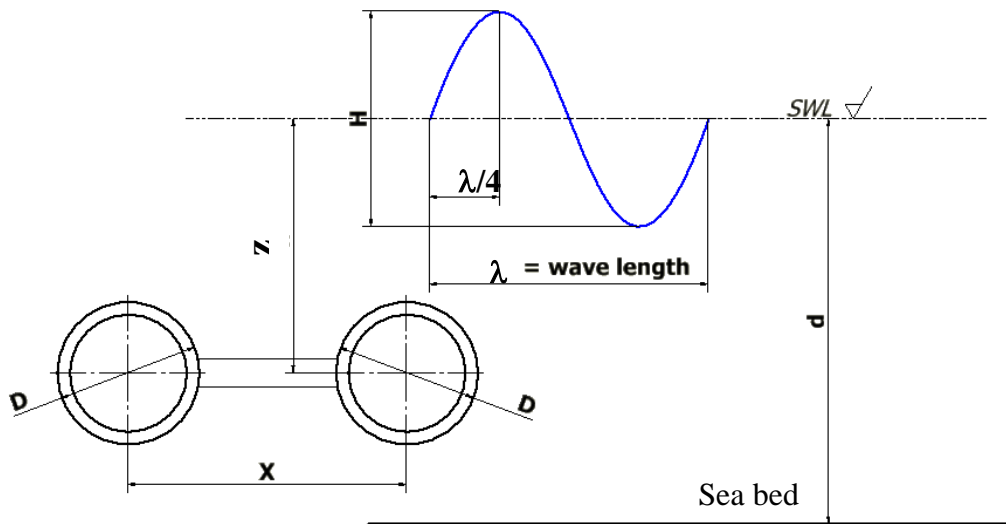
$\varnothing D$ = diameter luar tabung / *tube*

z = kedalaman *twin tubes*

Ilustrasi parameter eksperimen yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.3 sedangkan Tabel 3.1 adalah nilai dari parameter variabelnya.

Tabel 3.1 Parameter dan nilainya

1	x	$\frac{1}{4} \lambda$
		$\frac{1}{2} \lambda$
		$\frac{3}{4} \lambda$
		1λ
2	$\varnothing D$	3"
		2.5"
		2"
3	z	100 mm
		200 mm
		300 mm



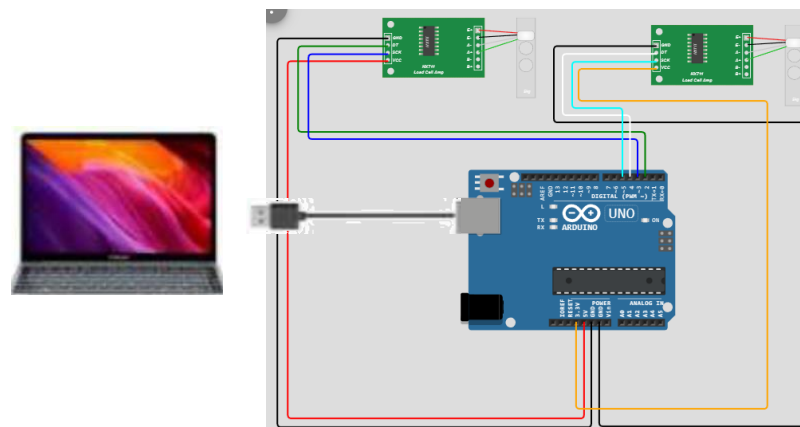
Gambar 3.3 Ilustrasi Parameter Eksperimen

3.4. Eksperimen

3.4.1. Bahan dan Alat

Alat Ukur dan Perangkat Akuisisi Data:

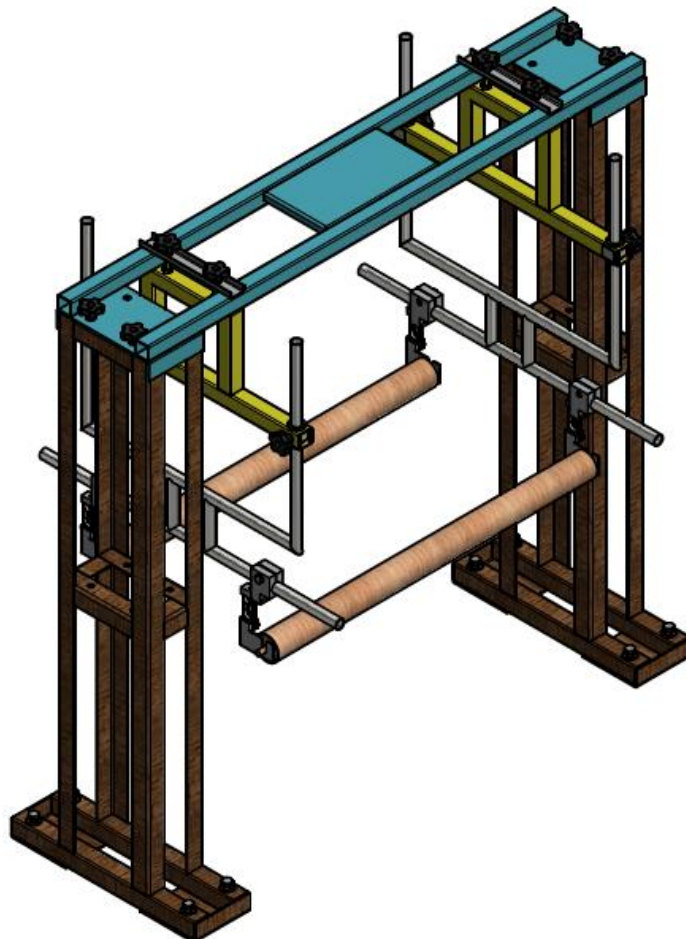
Peralatan akuisisi data berfungsi untuk mengubah data keluaran dari alat ukur gaya yang berupa beda potensial menjadi data digital sehingga dapat dianalisis. Peralatan ini terdiri dari *load cell*, *amplifier*, *microcontroller* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan dihubungkan dengan komputer. *Load cell* berfungsi sebagai pengukur gaya ombak yang mengenai tabung. *Amplifier* berfungsi sebagai penguat sinyal dari *load cell* agar terbaca oleh *microcontroller*. Selanjutnya data beda potensial diubah menjadi data digital oleh *microcontroller*. Komputer digunakan sebagai pengolahan dan visualisasi data digital.



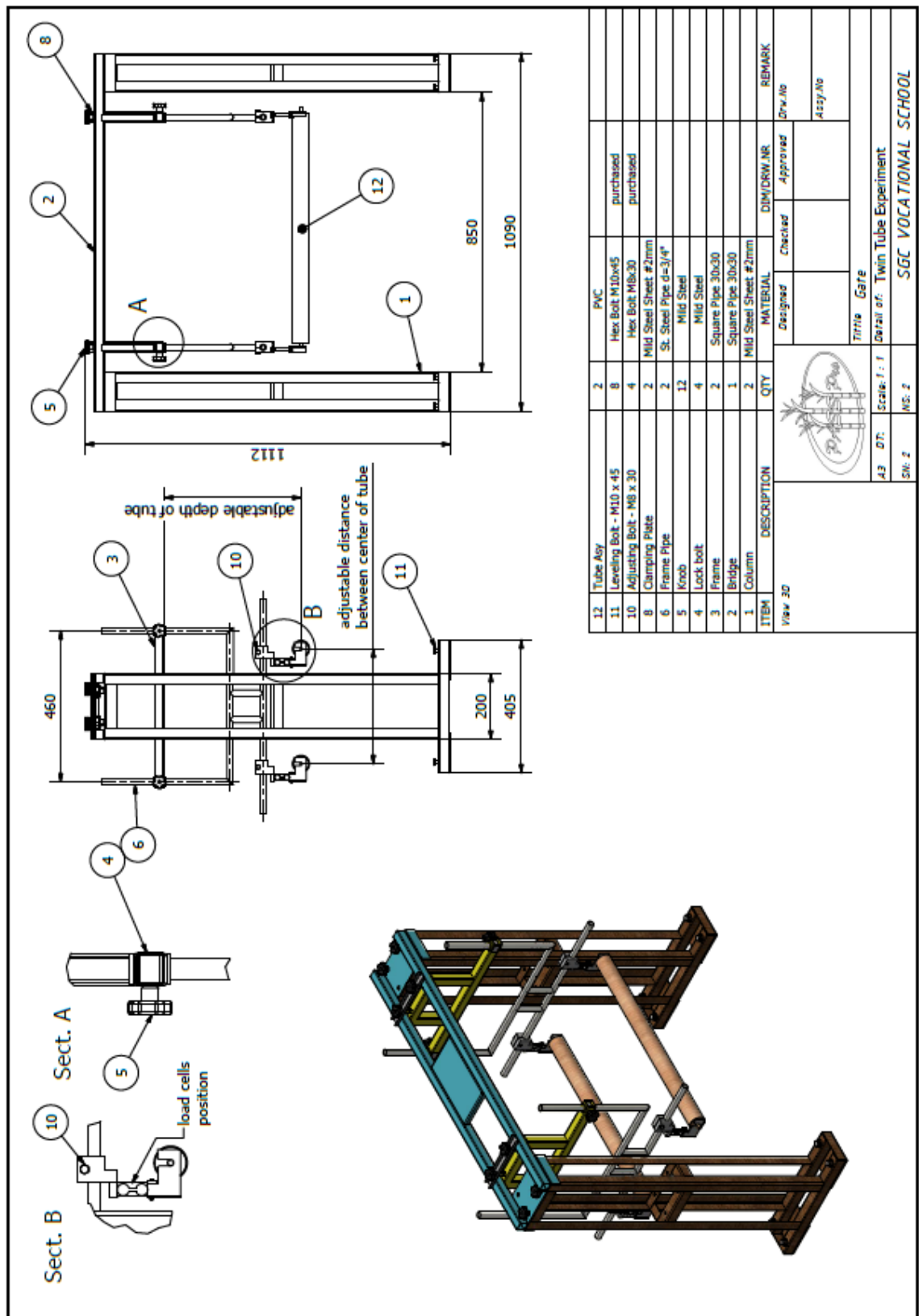
Gambar 3.4 Perangkat akuisisi data



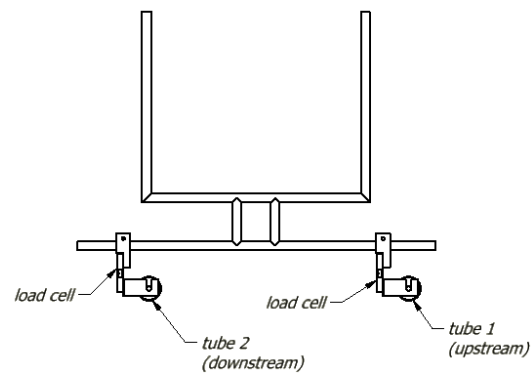
Gambar 3.5 Kolam Pembangkit Ombak



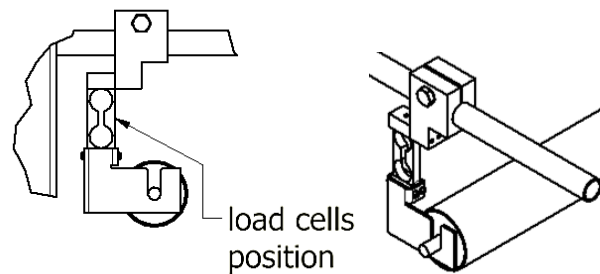
Gambar 3.6 Perangkat Uji – Pemegang Tabung Silinder (*Twin Tubes Gate*)



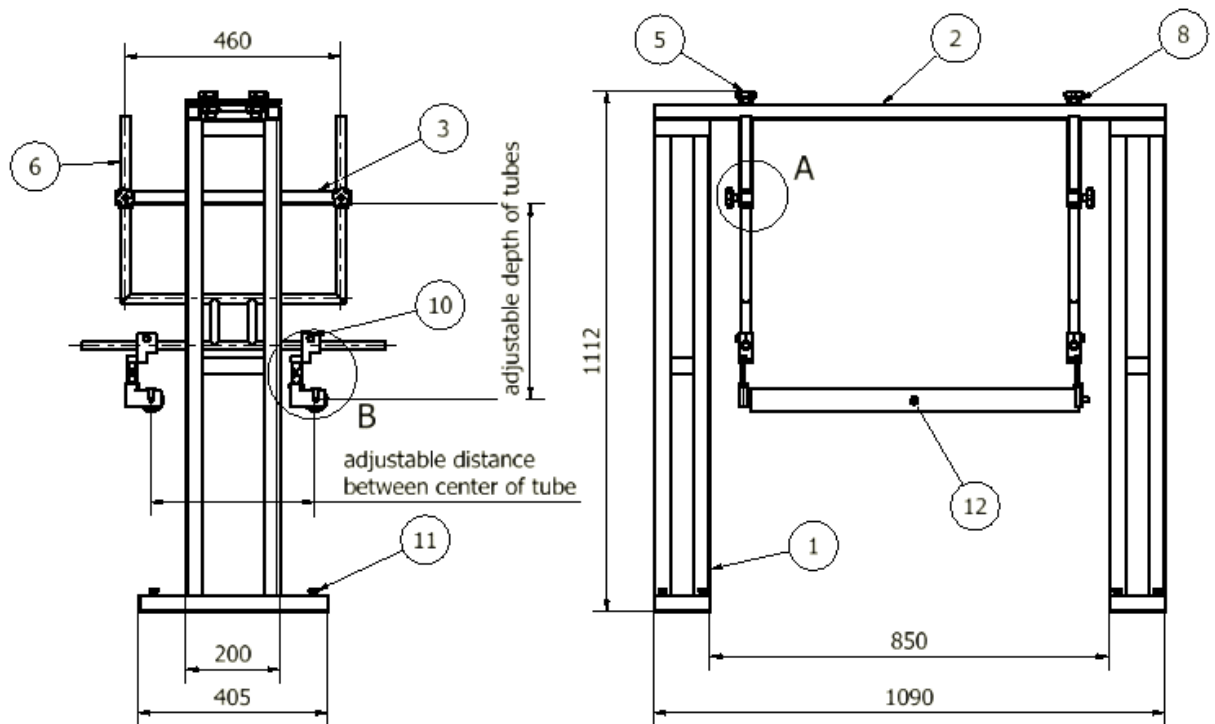
Gambar 3.7 Perangkat Uji – Pemegang Tabung



Gambar 3.8 Posisi *load cell* dan peletakan tabung silinder



Gambar 3.9 Penempatan *load cell* pada silinder



Gambar 3.10 Pemegang silinder tampak depan dan samping

3.4.2. Tahapan Eksperimen

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

a. Studi Literatur

Studi literatur dilaksanakan dengan mengumpulkan referensi-referensi, teori, dan data yang terkait dengan penelitian, baik itu jurnal-jurnal penelitian yang telah dilakukan ataupun dari buku yang mendukung. Proses ini juga meliputi pengumpulan data terkait dari parameter dan koefisien yang dibutuhkan.

b. Persiapan Alat

Persiapan alat meliputi pembuatan berbagai perlengkapan dan pengadaan alat ukur dan alat uji termasuk kalibrasi peralatan tersebut. Dalam hal ini penulis menggunakan alat ukur berupa *load cell*.

c. Pengujian

Pengujian dilakukan apabila data dan referensi telah matang serta persiapan dari simulasi dan alat telah selesai. Pada tahap ini alat uji dimaksimalkan penggunaannya.

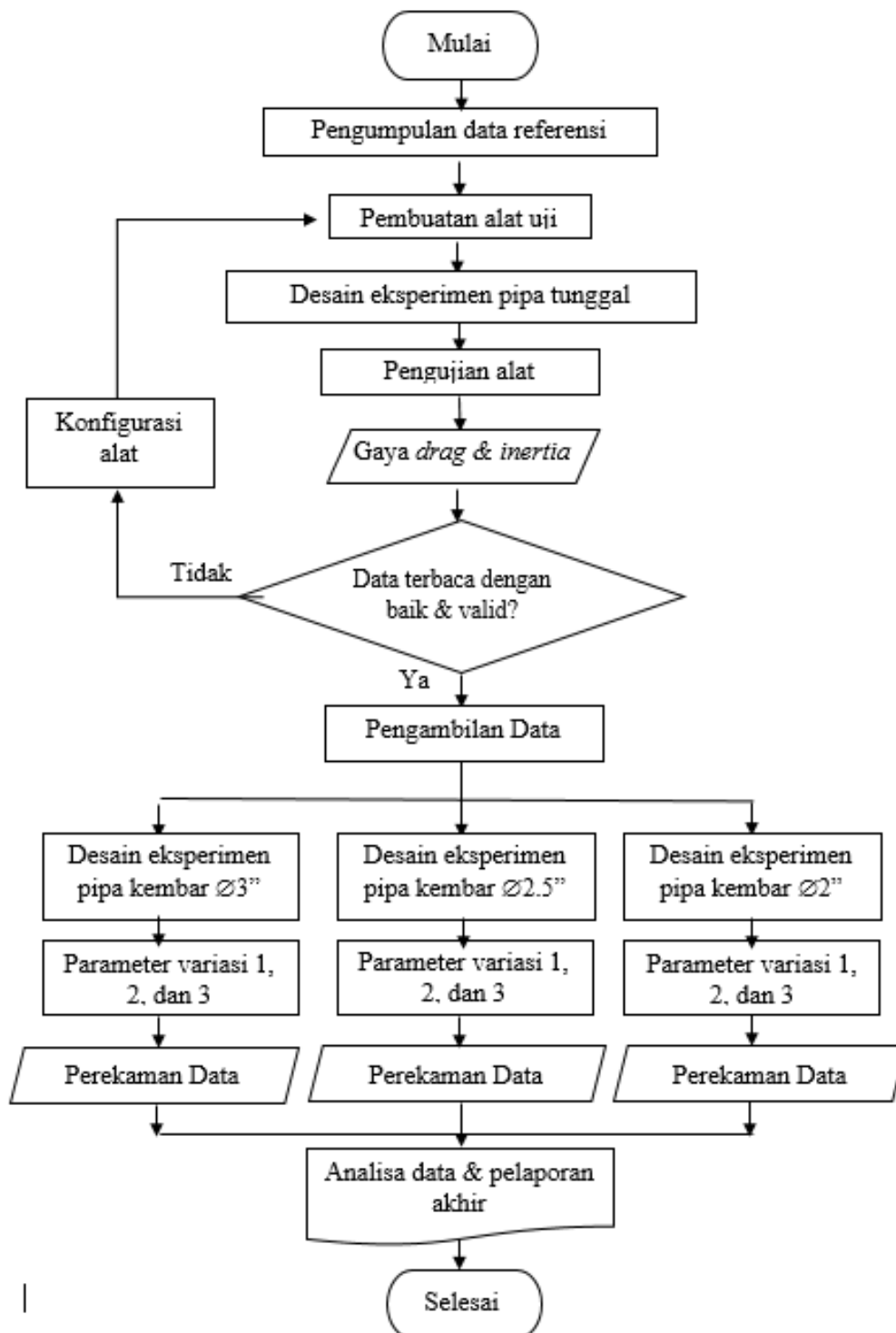
d. Analisa dan Pengolahan Data

Proses ini dilakukan setelah pengujian selesai dan data hasil eksperimen telah didapatkan. Data yang diambil adalah gaya yang terjadi pada silinder sirkular.

e. Pembuatan Laporan Akhir

Setelah analisa selesai, kesimpulan dirangkum dan dibuat pada laporan akhir hasil penelitian

Diagram alir penelitian sebagai berikut:



Gambar 3.11 Diagram Alir Penelitian

3.4.3. Desain Eksperimen

Desain eksperimen yang direncanakan adalah sebagai berikut:

Pada eksperimen awal dicoba dahulu untuk mengetahui apakah alat uji bisa digunakan dan dilakukan kalibrasi pada alat ukurnya di luar kolam air, dengan cara:

- a. Sensor *load cell* disetel pada 0
- b. Beban tertentu diukur dengan timbangan digital
- c. Letakkan beban pada *load cell*, running program.
- d. Baca hasilnya, bila hasilnya berbeda dengan besarnya beban yang seharusnya, maka dalam program Arduino ditambahkan faktor pengurang atau penambah.
- e. Ulang lagi running program, dan sesuaikan lagi program bila belum sesuai, sampai dengan hasil terbaca sama dengan beban terukur.

Selanjutnya dilakukan kalibrasi dengan prosedur yang sama, namun dilakukan di dalam air. Perlu dipastikan bahwa air harus berada dalam kondisi tenang tanpa ada ombak agar tidak ada tambahan pengaruh gaya ombak pada tabung. Setelah dilakukan kalibrasi di luar kolam air dan di dalam kolam air, maka bisa dilakukan eksperimen dengan menggunakan silinder / tabung.

Sebelum dilakukan pengambilan data eksperimen dengan menggunakan tabung, harus dicari dahulu parameter ombak yang akan menjadi dasar perhitungan, yaitu dengan menghidupkan generator ombak atau pembangkit gelombang, dan diukur panjang gelombang, tinggi gelombang, frekuensi dan sebagainya. Generator ombak (pembangkit gelombang) yang telah diatur sedemikian rupa sehingga menghasilkan panjang gelombang tertentu.

Setelah diperoleh parameter ombak, maka dilakukan pengujian awal terlebih dahulu yaitu melakukan pengujian dengan tabung / silinder tunggal. Dengan menggunakan data hasil eksperimen tabung tunggal, hasilnya dibandingkan dengan hasil perhitungan numerik dari Matlab, sebagai validasi. Dengan menggunakan persamaan Morison (persamaan 2-12) dan memasukkan nilai parameter yang ada pada eksperimen tersebut maka dengan menggunakan

analisis numerik pada program Matlab, dapat diperoleh perbandingan antara hasil eksperimen dan hasil analisa numerik Matlab.

Kemudian bila sudah dilakukan pengujian dengan silinder tunggal maka dilakukan juga pengujian dengan silinder ganda masing-masing eksperimen dilakukan sebanyak tiga kali dengan variasi kedalaman tabung pada air dan besarnya diameter serta variasi rasio perbandingan jarak sumbu silinder kembar terhadap panjang gelombang.

Data yang diperoleh adalah gaya hidrodinamik arah horizontal yang merupakan jumlah dari gaya seret dan gaya inersia.

BAB 5.

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari eksperimen yang telah dilakukan maka ada beberapa hal yang bisa diambil sebagai kesimpulan yaitu:

Gaya yang diterima oleh tabung 2 (*downstream*) selalu lebih kecil daripada gaya yang diterima tabung 1 (*upstream*), hal ini normal karena gaya gelombang tidak secara langsung diterima oleh tabung 2 namun sudah berkurang akibat terganggu tabung 1 yang langsung berhadapan dengan sumber gelombang.

Perubahan jarak antar tabung dari 1λ menjadi $\frac{1}{2}\lambda$ mempengaruhi besarnya gaya yang diterima oleh tabung menjadi lebih kecil, namun tidak ditemukan kecenderungan yang pasti bahwa semakin kecil jarak antar tabung selalu akan semakin kecil pula gaya yang diterima tabung, hal ini terbukti pada jarak antar tabung dari $\frac{1}{2}\lambda$ menjadi $\frac{1}{4}\lambda$ gaya yang terukur menjadi sedikit meningkat. Sehingga dalam hal ini, bila didasarkan pada eksperimen yang telah dilakukan, hipotesis yang semula dimunculkan yaitu gaya hidrodinamik yang paling lemah muncul pada jarak antar tabung setengah dari panjang gelombang.

Ombak atau gelombang akan memberikan pengaruh yang lebih besar pada area yang lebih dekat dengan permukaan air, dengan kata lain bahwa tabung yang diletakkan lebih dekat pada permukaan akan mendapatkan gaya ombak yang lebih besar. Besarnya gaya berbanding terbalik dengan kedalaman.

5.2. Saran

Saran-saran terkait penelitian ini maupun untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- a. Kolam dengan ukuran 3.7 meter dan lebar 0.8 meter masih kurang besar untuk penelitian ini, perlu kolam yang lebih panjang dan lebar. Hal ini dapat dilihat bahwa ombak yang terjadi akan cepat berubah tidak stabil karena munculnya ombak balik, yaitu gelombang yang membalik karena menabrak dinding kolam. Hal ini sebenarnya saat penelitian ini sudah dikurangi dengan menambah perangkat pemecah ombak namun kurang efisien, sehingga pengambilan data harus dalam waktu yang sempit sebelum terjadi ombak balik. Bila kolam tidak diperpanjang dan diperlebar, perlu ada perubahan generator ombak agar hasil ombak yang dibuat proporsional dengan ukuran kolam.
- b. Generator ombak diubah menggunakan motor yang dapat diatur putarannya, sehingga dapat diperoleh panjang gelombang yang mudah diatur pula.
- c. Ketidakakuratan data dapat terjadi dengan penempatan load cell hanya pada salah satu ujung tabung, sehingga sangat disarankan penggunaan *load cell* pada kedua sisi ujung tabung. Dan disarankan menggunakan *load cell* yang tahan terhadap air (*water resistance*) sehingga tidak mudah rusak atau terbakar.
- d. Perlu dilakukan penelitian lanjutan yang melihat pengaruh perbandingan jarak terhadap diameter tabung, dengan pertimbangan bahwa besarnya ombak atau panjang gelombang pada permukaan laut sangat bervariasi dan mudah berubah-ubah.

Daftar Pustaka

- Batchelor, G.K. 1967. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press. ISBN 0-521-66396-2.
- Biesel, F., 1952, Study of wave propagation in water of gradually varying depth, in Gravity Waves, Circular No.521. National Bureau of Standards, Washington, D.C.
- Boussinesq, J. (1872). "*Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond*". Journal de Mathématiques Pures et Appliquées. Deuxième Série. 17: 55–108
- Braestrup, M., Andersen, J. B., Andersen, L. W., Bryndum, M. B., & Nielsen, N. J. R. (2009). Design And Installation Of Marine Pipelines. John Wiley & Sons
- Budiman, E., Annisa, F. A. M. C., & Abdi, F. N. (2019). Studi Variasi Penampang Pada Struktur Submerged Floating Tunnel. In Prosiding Seminar Nasional Teknologi, Inovasi dan Aplikasi di Lingkungan Tropis (Vol. 2, No. 1, pp. 238-248)
- Çengel, Y.A., John M.Cimbala. 2006. *Fluid Mechanics Fundamentals And Application*
- Deng, S., 2020. *Experimental study on the drag forces on a twin-tube submerged floating tunnel segment model in current*, Applied Ocean Research 104 102326
- Holthuijsen, L.H., 2007, *Wave in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kawengian, S., Balamba, S., & Sarajar, A. N. (2018). Analisis Daya Dukung Lateral pada Tabung Pancang Kelompok di Dermaga Belang. Jurnal Sipil Statik, 6(9)
- Keulegan, G H. Carpenter, L H. 1958. "*Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid*", Journal of Research of the National Bureau of Standards, **60** (5): 423–440
- Koterayama W, Hu C. 1995. *Wave forces on horizontal cylinders at low Keulegan–Carpenter and Reynolds numbers*. Proceedings of the Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, The Hague, The Netherlands: 189-195.

- MacCamy, R. C., & Fuchs, R. A. (1954). *Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory*. U.S. Beach Erosion Board.
<https://books.google.co.id/books?id=M0K5GQAACAAJ>
- Nugraha, N., 2021 “*Pemodelan dan Analisis Dinamik Submerged Floating Tunnel sebagai Sarana Penyeberangan antar Pulau*”, Thesis, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Lampung
- Østlid, H. (2010). When is SFT competitive? *Procedia Engineering*, 4, 3–11
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.08.003>
- Priya, Km., Sah, M., Srivastava, P., 2018. *Submerged Floating Tunnel*. International Journal of Advance Research in Science Engineering, Volume No.07, Special Issue No.1, February
- Rahmawati, S., Djatmiko, EB., Prastianto, RW., 2012. *Studi Numerik Interaksi Vortex-Induced Vibrations (VIV) Antara Empat Silinder Tegak Fleksibel dengan Konfigurasi In-Line Square dalam Aliran Uniform*. Jurnal Teknik ITS Vol. 1, No. 1. ISSN: 2301-9271
- Sarpkaya, T. 1986. *Force on a circular cylinder in viscous oscillatory flow at low Keulegan—Carpenter numbers*. Journal of Fluid Mechanics, 165(-1), 61
- Sarpkaya, T. (2010). *Wave forces on offshore structures*. Cambridge university press
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2016). *Boundary-layer theory*. Springer.
- Skjelbreia, L., 1959, *Gravity Waves Stokes Third Order Approximation, Table of Functions*. American Society of Civil Engineers.
- Skjelbreia, L., and Hendrickson, J., 1960, *Fifth order gravity wave theory*. *Proc.Coastal Engineering Conf.*, pp. 184–196.
- Sumer, B. M., & Fredsøe, J. (2010). *Hydrodynamics around cylindrical structures*. Hackensack, NJ: World Scientific.
- Sundar, V. 2016. *Ocean wave mechanics: Applications in marine structures*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Triatmodjo, B. 1999. *Teknik pantai*. Beta Offset, Yogyakarta, 397.
- Zhang, S., Chen, C., Zhang, Q., Zhang, D., & Zhang, F. 2015. *Wave Loads Computation for Offshore Floating Hose Based on Partially Immersed Cylinder Model of Improved Morison Formula*. The Open Petroleum Engineering Journal, 8(1), 130-137.

Zou, P. X., Bricker, J. D., Chen, L. Z., Uijtewaal, W. S., & Ferreira, C. S. (2022). Response of a submerged floating tunnel subject to flow-induced vibration. *Engineering structures*, 253