



TUGAS AKHIR (MO 184804)

PEMODELAN NUMERIK GERUSAN PADA *BREAKWATER* TIANG
PANCANG AKIBAT GELOMBANG REGULER

M. YANDI WIRYAWICAKSANA

NRP. 0431154000074

DOSEN PEMBIMBING :

Suntoyo, S.T., M. Eng., Ph. D.

Prof. Ir. W. Agoes Pratikto, M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA

2019



FINAL PROJECT (MO 184804)

**NUMERICAL MODELLING OF REGULAR WAVE SCOUR
AROUND PILE BREAKWATER**

M. YANDI WIRYAWICAKSANA

NRP. 0431154000074

SUPERVISORS :

Suntoyo, S.T., M. Eng., Ph. D.

Prof. Ir. W. Agoes Pratikto, M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

MARINE TECHNOLOGY FACULTY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2019

**PEMODELAN NUMERIK GERUSAN PADA *BREAKWATER* TIANG
PANCANG AKIBAT GELOMBANG REGULER**

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

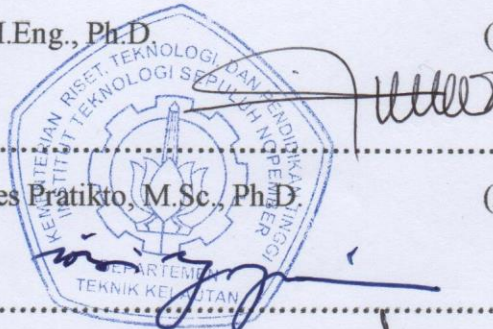
Oleh :

M. YANDI WIRYAWICAKSANA

NRP. 0431154000074

Disetujui oleh :

1. Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D. (Pembimbing 1)



.....
2. Prof. Ir. W. Agoes Pratikto, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)

.....
3. Prof. Ir. Mukhtasor, M.Eng., Ph.D. (Penguji 1)

.....
4. Dr. Ir. Wahyudi, M.Sc. (Penguji 2)

.....
5. Dr. Eng. Kriyo Sambodho, S.T., M.Eng. (Penguji 3)

Surabaya, Juli 2019

PEMODELAN NUMERIK GERUSAN PADA *BREAKWATER* TIANG PANCANG AKIBAT GELOMBANG REGULER

Nama Penulis : M. Yandi Wiryawicaksana
NRP : 0431154000074
Departemen : Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing : Suntoyo, ST., M.Eng., Ph.D
Prof. Ir. W. Agoes Pratikto, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Gerusan atau *scouring* merupakan salah satu penyebab gagalnya struktur *breakwater*. Salah satu tipe *breakwater* adalah tiang pancang. Eksperimen redaman gelombang akibat *breakwater* tiang pancang telah dilakukan di laboratorium Balai Pantai, Bali. Oleh karena itu Tugas Akhir ini memodelkan secara numerik gerusan pada *breakwater* tiang pancang sesuai dengan eksperimen Balai Pantai Bali. Pemodelan numerik dilakukan dengan perangkat lunak komputasi dinamika fluida (CFD). Sebanyak 4 modul dimodelkan dengan variasi jarak baris relatif ($b/D=0,5;1$) dan jarak kolom relatif ($B/D=0,5;1$) antar struktur tiang pancang. Sedangkan jarak antar kelompok tiang sebesar 33 cm. Validasi model numerik karakteristik gelombang menunjukkan persentase *error* H_{avg} sebesar 8% untuk *wave probe* di depan pembangkit gelombang dan 6% untuk *wave probe* di belakang struktur. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kedalaman *scouring* gap terbesar terjadi pada Modul 1 ($b/D=0,5;b/D=0,5$) dengan kedalaman 10 cm. *Scouring* lokal terdalam terjadi pada Modul 1 ($b/D=0,5;B/D=0,5$) dan Modul 2 ($b/D=0,5;B/D=1,0$) sebesar 5 cm. Lebar *scouring* terbesar terjadi pada Modul 1 ($b/D=0,5;B/D=0,5$) sebesar 11 cm dari tiang paling tengah ke arah hilir. Untuk laju propagasi pada 3 menit pertama *scouring* sudah menunjukkan hasil yang besar dan pada kisaran waktu 6-15 menit laju propagasi *scouring* tidak mengalami penambahan yang signifikan.

Kata kunci : *scouring, breakwater, tiang pancang, pemodelan numerik, gelombang reguler, jarak antar tiang, perangkat lunak CFD*

NUMERICAL MODELLING OF REGULAR WAVE SCOUR AROUND PILE BREAKWATER

Name of Student : M. Yandi Wiryawicaksana
Reg. Number : 0431154000074
Department : Teknik Kelautan
Supervisors : Suntoyo, ST., M.Eng., Ph.D
Prof. Ir. W. Agoes Pratikto, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Scouring is one of the causes of the breakwater structure failure. One type of breakwater is a pile. Wave attenuation experiments due to pile breakwater have been carried out in the 'Balai Pantai' laboratory, Bali. Therefore this Final Project models numerically scour on the pile breakwater according to the experiment of the Bali Beach Hall. Numerical modeling is done by computational fluid dynamics (CFD) software. A total of 4 modules are modeled with variations in relative row distance ($b / D = 0.5; 1$) and relative column distance ($B / D = 0.5; 1$) between the pile structures. While the distance between the pole groups is 33 cm. The validation of the numerical model wave characteristics shows the percentage of H_{avg} error of 8% for wave probe in front of the wave generator and 6% for the wave probe behind the structure. The simulation results show that the biggest depth of the scouring gap occurs in Module 1 ($b / D = 0.5; b / D = 0.5$) with a depth of 10 cm. The deepest local scouring occurs in Module 1 ($b / D = 0.5; B / D = 0.5$) and Module 2 ($b / D = 0.5; B / D = 1.0$) of 5 cm. The largest scouring width occurs in Module 1 ($b / D = 0.5; B / D = 0.5$) of 11 cm from the center pole downstream. For the propagation rate in the first 3 minutes scouring has shown great results and in the range of 6-15 minutes the propagation rate of scouring did not experience significant increase.

Keyword : *scouring, breakwater, pile, numerical modelling, regular wave, distance between piles, CFD*

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr.Wb

Alhamdulillah penulis panjatkan kepada ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, karunia serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan lancar. Sholawat serta salam tidak lupa penulis haturkan kepada Nabi besar Muhammad SAW.

Tugas Akhir ini berjudul “Pemodelan Numerik Gerusan pada *Breakwater* Tiang Pancang Akibat Gelombang Reguler”. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Studi tingkat sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Tugas Akhir ini membahas tentang gerusan yang terjadi pada *breakwater* tipe tiang pancang sehingga dapat diketahui kedalaman, lebar dan laju propagasi *scouring*.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penulisan pada penelitian ini masih jauh dari kata sempurna sehingga diperlukan kritik serta saran dari pihak lain. Akhir kata semoga penelitian ini bermanfaat bagi perkembangan teknologi di bidang rekayasa kelautan serta bagi pembaca pada umumnya dan penulis pada khususnya.

Surabaya, Juli 2019

M. YANDI WIRYAWICAKSANA

NRP. 04311540000074

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam kehidupan ini sesungguhnya manusia tidak mungkin dapat berjuang sendiri, oleh karena itu dukungan dari teman maupun keluarga sangat dibutuhkan, demikian pula dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Keluarga tercinta, khususnya kepada Bapak dan Ibu yang tidak pernah lelah mendoakan yang terbaik bagi penulis menempuh pendidikan tinggi ini. Juga kepada adik-adik Riyan dan Yanda semoga tercapai cita-citanya.
2. Bapak Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen wali sekaligus pembimbing pertama, Bapak Prof. Ir. Widi Agoes Pratikto, M.Sc., Ph.D. selaku pembimbing kedua yang selalu memberikan saran dan dukungan kepada penulis.
3. Seluruh dosen Departemen Teknik Kelautan yang telah memberikan ilmu dan fasilitas kepada penulis selama masa perkuliahan. Juga kepada segenap karyawan yang telah membantu dalam kegiatan akademik.
4. Kepada Balai Pantai Bali, Bapak Juventus Welly Ginting, Mbak Ida Ayu Irawati, Pak Eduardo Meyrianso Simanjuntak, serta peneliti lainnya atas data eksperimen “Model Fisik Redaman Energi Gelombang Dengan Breakwater Tiang” yang digunakan penulis pada Tugas Akhir ini.
5. Kepada Marco (Egy, Chibby, Hafidz Jamil, Alip, Alfi, Ibbi, Rizal Nyomang, Arif Kribo, Riko, Giffari Kambing, Tito, Yudha, Haekal, Tio, Danen) serta Aripang, Haqiqi, dan teman-teman Teknik Kelautan Angkatan 2015 (Tritonous P55-L33) yang telah membantu dan memberikan dukungan kepada penulis selama masa perkuliahan ini.
6. Kepada Alfa Lailatul Maghfiroh atas perhatian, doá dan dukungannya selama ini, juga kepada Fajar Maulana Firdaus, Ilham “Temon” Meizar, Gembot ($\alpha+N$), Mbah Basuni, serta teman Kopi Lokal lainnya, Arek Cinta Rebana ITS dan Arek 7E yang lain, yang menemani penulis selama ini.

Kepada berbagai pihak yang belum sempat penulis ucapkan satu-persatu, terima kasih atas berbagai bantuan dan dukungan yang diberikan. Semoga Allah SWT melimpahkan berkat dan rahmat kepada kita semua.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR SIMBOL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Manfaat Penelitian.....	2
1.5. Batasan Masalah.....	3
1.6. Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1. Tinjauan Pustaka	5
2.2. Dasar Teori.....	6
2.2.1. Teori Gelombang.....	6
2.2.2. <i>Wave Boundary Layer</i>	8
2.2.3. Pemecah Gelombang.....	9
2.2.4. Gerusan / <i>Scouring</i>	10
2.2.5. Gerusan di Sekitar Tiang Pancang	12
2.2.6. Kedalaman <i>Scouring</i>	14
2.2.7. Lebar <i>Scouring</i>	14
2.2.8. Laju Propagasi <i>Scouring</i>	14
2.2.9. Efek Kelompok Tiang	15
2.2.10. <i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i>	15
2.2.11. <i>Froude Similarity Law</i>	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	17
3.1. Diagram Alir Penelitian	17
3.2. Metodologi Penelitian	18

3.3.	Analisa Dimensi	24
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		25
4.1.	Input Parameter Software CFD	25
4.1.1.	Karakteristik Gelombang	25
4.1.2.	Parameter Sedimen.....	27
4.2.	Pemodelan dengan CFD-FLOW3D	27
4.2.1.	Pembuatan <i>Workspace</i>	27
4.2.2.	Membuat simulasi	27
4.2.3.	Pengaturan Menu <i>Model Setup</i>	28
4.2.4.	Pengaturan Waktu dan Satuan.....	28
4.2.5.	Pengaturan <i>Physics</i>	28
4.2.6.	Fluid Properties	29
4.2.7.	Meshing and Geometry	29
4.2.8.	Boundaries Condition.....	30
4.2.9.	Wave Probes.....	31
4.2.10.	<i>Render Model</i>	31
4.2.11.	<i>Output Model</i>	32
4.2.12.	Hasil <i>Running Model</i>	32
4.3.	Validasi Model	34
4.4.	Hasil Pemodelan <i>Scouring</i>	35
4.5.	Analisis Hubungan <i>Scouring</i> dengan Paramaeter Tak Berdimensi ...	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		47
5.1.	Kesimpulan.....	47
5.2.	Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA		49
LAMPIRAN A PROGRAM FILTTRIMWAVESTAT		
LAMPIRAN B GAMBAR <i>SCOURING</i> PEMODELAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Daerah validitas teori gelombang.....	8
Gambar 2.2 Perpindahan partikel air pada perairan dangkal dan perairan dalam ...	9
Gambar 2.3 Aliran di sekitar tiang pancang	12
Gambar 2.4 Formasi <i>horseshoe vortex</i> diilustrasikan dengan vektor	13
Gambar 2.5 Foto <i>vortex shedding</i>	13
Gambar 2.6 Laju propagasi <i>scouring</i>	14
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	17
Gambar 3.2 Jarak antar tiang pancang	19
Gambar 3.3 Konfigurasi tiang pancang	19
Gambar 3.4 Sketsa pengujian	20
Gambar 3.5 Flow chart algoritma program FiltTrimWavestat	21
Gambar 4.1 Tampilan awal Flow 3D	27
Gambar 4.2 Pembuatan simulasi baru	27
Gambar 4.3 Menu <i>Model Setup</i>	28
Gambar 4.4 Tampilan <i>Model Setup General</i>	28
Gambar 4.5 Tampilan menu <i>Physics</i>	28
Gambar 4.6 <i>Meshing and Geometry</i>	30
Gambar 4.7 <i>Boundary Condition</i>	31
Gambar 4.8 Letak <i>wave probe</i> simulasi	31
Gambar 4.9 <i>Rendering Model</i>	32
Gambar 4.10 Pengaturan <i>output</i> model	32
Gambar 4.11 Hasil <i>running</i> model pada Flowsight	33
Gambar 4.12 Hasil <i>scouring</i> pemodelan	33
Gambar 4.13 Tampak samping <i>Mesh</i> pemodelan pada Flow 3D	34
Gambar 4.14 Hasil validasi gelombang periode 0-120 detik	34
Gambar 4.15 Hasil validasi gelombang periode 17-32 detik	35
Gambar 4.16 Tampak atas area sedimen hasil pemodelan	36

Gambar 4.17 Pola <i>scouring</i> tampak atas modul 2	37
Gambar 4.18 Grafik profil <i>scouring</i> 2D	38
Gambar 4.19 Grafik laju propagasi <i>scouring</i>	39
Gambar 4.20 Foto <i>scouring</i> tampak atas $KC=20$ Sumer et. al.	40
Gambar 4.21 <i>Horseshoe vortex</i> dan <i>vortex shedding</i>	40
Gambar 4.22 Perubahan morfologi pada slope 1:40	41
Gambar 4.23 Hasil pemodelan modul 2	41
Gambar 4.24 Grafik perbandingan <i>scouring</i> ($B/D=0,5$)	43
Gambar 4.25 Grafik perbandingan <i>scouring</i> ($B/D=1,0$)	43
Gambar 4.26 Grafik hubungan b/D dengan kedalaman <i>scouring</i>	43
Gambar 4.27 Grafik hubungan B/D dengan kedalaman <i>scouring</i>	43
Gambar 4.28 Grafik hubungan b/D dengan lebar <i>scouring</i>	44
Gambar 4.29 Grafik hubungan B/D dengan lebar <i>scouring</i>	44

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Variasi pemodelan	19
Tabel 3.2 Dimensi Riil Variasi Pemodelan	24
Tabel 4.1 Karakteristik gelombang eksperimen	26
Tabel 4.2 Input Parameter Gelombang	26
Tabel 4.3 <i>Geometry</i> dan peletakannya	30
Tabel 4.4 Parameter tiap blok <i>mesh</i>	30
Tabel 4.5 Validasi karakteristik gelombang pemodelan numerik	35
Tabel 4.6 Kedalaman <i>scouring</i> Gap	36
Tabel 4.7 Hasil Pemodelan <i>scouring</i> saat T=15 menit	37
Tabel 4.8 Prediksi dimensi <i>scouring</i> kondisi riil.....	41

DAFTAR SIMBOL

H	=	Tinggi Gelombang
T	=	Periode Gelombang
H _{avg}	=	Tinggi Gelombang Rata-rata
T _{avg}	=	Periode Gelombang Rata-rata
B	=	Jarak Kolom Antar Tiang Pancang
b	=	Jarak Baris Antar Tiang Pancang
G	=	Jarak Antar Kelompok Tiang Pancang
S	=	Kedalaman <i>scouring</i>
W	=	Lebar <i>scouring</i>
D	=	Diameter Tiang
d	=	Kedalaman Air
t	=	Waktu
KC	=	<i>Keulegan-Carpenter number</i>
S/D	=	<i>Non Dimensional Scour Depth</i>
W/D	=	<i>Non Dimensional Scour Width</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gerusan / *scouring* adalah erosi sedimen yang ada di dasar laut di sekitar struktur karena aliran arus, gelombang, atau kombinasi keduanya yang dapat mengganggu stabilitas struktur (Sumer dan Fredsoe, 2002). Gerusan merupakan salah satu penyebab kegagalan struktur pemecah gelombang (Hamid dan Danial, 2016). Gerusan yang semakin besar mengurangi panjang struktur yang terpendam, frekuensi natural struktur berkurang, kemungkinan kegagalan struktur semakin besar (Ping, 2014).

Salah satu tipe pemecah gelombang adalah tiang pancang. Pemecah gelombang tipe tiang pancang memiliki potensi yang besar untuk diterapkan di Indonesia. Tipe ini memiliki keunggulan dalam segi biaya dan kemudahan untuk dipasang dan dilepas. Pilihan material yang bisa digunakan juga ramah lingkungan seperti pipa ataupun bambu (Koftis et al. 2011).

Laboratorium Balai Pantai Bali pada tahun 2018 melakukan uji fisik dan numerik tiang pancang yang dikenai gelombang reguler. Eksperimen numerik dilakukan menggunakan *software* X-Beach dari Deltares, Belanda. Eksperimen tersebut memodelkan tiang pancang silinder pejal berbahan pipa isi beton cor yang divariasikan berdasarkan dimensi dan parameter desain tertentu. Nilai redaman gaya gelombang atau koefisien transmisi (Kt) yang didapat dari seluruh skenario selanjutnya diolah sehingga dapat dijadikan pedoman perancangan *breakwater* tiang pancang khususnya di Indonesia.

Pemecah gelombang tiang pancang memiliki penampang yang bercelah. Jika terjadi aliran massa air, maka arah aliran partikel air di daerah tiang pancang akan mengalami pembelokan ke celah-celah tiang. Akibatnya kontur dasar laut akan berubah mengikuti susunan tiang pancang. Sayangnya pada eksperimen oleh Balai Pantai tersebut belum bisa memodelkan pola aliran dan perubahan dasar laut karena keterbatasan fasilitas uji.

Oleh karena itu, pada penelitian Tugas Akhir ini akan memodelkan *scouring* tiang pancang menggunakan *software* Flow 3D variasi jarak relatif antar tiang. Karakteristik gelombang dari hasil pemodelan pada *software* Flow 3D kemudian divalidasi dengan hasil eksperimen, selanjutnya dilakukan pemodelan untuk meninjau proses *scouring* yang terjadi akibat tiang pancang. Diharapkan hasil dari penelitian ini yaitu untuk memprediksi kedalaman, lebar, dan laju propagasi *scouring* dengan variasi diameter dan celah antar tiang pancang.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil identifikasi karakteristik gelombang (periode dan tinggi) pada variasi jarak relatif antar tiang pancang akibat gelombang reguler dari hasil eksperimen dan pemodelan numerik?
2. Bagaimana hasil pemodelan *scouring* (kedalaman, lebar, dan laju propagasinya) pada *breakwater* tiang pancang akibat gelombang reguler dengan mempertimbangkan variasi jarak relatif antar tiang pancang?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui karakteristik gelombang (periode dan tinggi) pada variasi jarak relatif antar tiang pancang akibat gelombang reguler dari hasil eksperimen dan pemodelan numerik.
2. Untuk memprediksi kedalaman, lebar, dan laju propagasi *scouring* pada *breakwater* tiang pancang akibat gelombang reguler dengan mempertimbangkan variasi jarak relatif antar tiang pancang.

1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari tugas akhir ini adalah untuk membuktikan bahwa dalam perancangan *breakwater* tiang pancang harus mempertimbangkan terjadinya gerusan agar tujuan pelindung pantai dapat dicapai. Penelitian ini juga dapat dijadikan bahan validasi untuk melakukan penelitian lebih lanjut dengan

variabel yang lebih bervariasi lagi. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat dikembangkan lebih jauh untuk pemodelan dengan kondisi yang sesungguhnya di lapangan. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi studi yang berkelanjutan dalam perencanaan pembangunan pemecah gelombang tipe tiang pancang.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberikan dalam tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Pemodelan menggunakan *software* CFD-Flow 3D.
2. Menggunakan data eksperimen yang sudah ada.
3. Karakteristik gelombang yang ditinjau yaitu tinggi dan periode gelombang.
4. Validasi yang digunakan untuk pemodelan hanya menggunakan karakteristik gelombang.
5. Dimensi butiran material dasar ditentukan

1.6. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini adalah:

BAB I Pendahuluan

Berisi tentang gambaran mengenai penelitian pemodelan yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan yang menjawab rumusan masalah, manfaat penelitian, dan batasan masalah yang akan ditinjau dalam penelitian.

BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Berisi tentang teori-teori maupun rumus yang menunjang pengerjaan penelitian. Referensi berasal dari buku, jurnal, tugas akhir terdahulu, dan lain sebagainya.

BAB III Metodologi Penelitian

Berisi mengenai langkah-langkah yang akan dilakukan dari awal sampai akhir selama proses penelitian. Pengerjaan setiap langkah dijelaskan dengan jelas dan detail.

BAB IV Analisa Hasil

Berisi tentang analisis dari seluruh hasil penelitian dari pemodelan yang telah dilakukan menggunakan rumus empiris yang terdapat dalam dasar teori maupun referensi lainnya.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Hasil penelitian yang diperoleh akan dapat disimpulkan dan diberi saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Breakwater atau pemecah gelombang adalah struktur penahan energi gelombang yang didesain untuk melindungi pantai dari serangan gelombang secara langsung. *Breakwater* umumnya dibangun di pelabuhan sebab biaya pembangunannya lebih mahal daripada struktur pelindung pantai lainnya (CERC, 1984). Salah satu alternatif pelindung pantai untuk kondisi gelombang ringan adalah *Breakwater* tiang pancang, yang termasuk dalam jenis pemecah gelombang berlubang atau bercelah (*perforated breakwater*). Biaya konstruksi *breakwater* tiang pancang lebih murah dibandingkan pemecah gelombang *rubble-mound* konvensional. Selain mudah dipasang dan dilepas, pelindung pantai jenis ini tidak mengganggu estetika pantai dan kualitas air (Koftis et al. 2012).

Studi tentang pemecah gelombang tiang pancang telah banyak dilakukan. Zhu (2011) menghitung karakteristik hidrodinamik *breakwater* tiang pancang yang tersusun dari satu baris tiang balok. Tahun berikutnya, Koftis et. al. (2012) melakukan eksperimen *breakwater* tiang pancang baris banyak.

Salah satu kegagalan struktur pelindung pantai adalah gerusan (Hamid dan Danial, 2016). Gerusan yang semakin besar mengurangi panjang tiang yang terpendam, frekuensi natural struktur berkurang, kemungkinan kegagalan struktur semakin besar (Ping, 2014).

Gerusan yang disebabkan oleh gelombang dipengaruhi oleh kecepatan orbital gelombang (Sumer et al, 1992). Kecepatan orbital gelombang dapat membawa sedimen sejauh beberapa diameter dari struktur. Studi tentang gerusan karena gelombang juga dilakukan oleh Agami dan Mustafa (2011) yang mempelajari gerusan di sekitar tiang tunggal dan kelompok tiang akibat gelombang saja dan kombinasi gelombang dan arus. Dari studi tersebut, disimpulkan bahwa kedalaman gerusan akibat aliran *steady* lebih besar daripada gerusan akibat gelombang saja. Dalam beberapa kasus kelompok tiang, kedalaman gerusan lebih besar sekitar dua kali dari kasus tiang tunggal.

Studi tentang pengaruh kelompok tiang terhadap gerusan dilakukan oleh Imran (2013). Kesimpulan dari penelitian tersebut adalah terjadinya gerusan lokal dan penurunan elevasi dasar di sekitar pilar merupakan akibat langsung dari interaksi antar tiang, aliran, dan material sedimen dasar. Jarak antar tiang juga sangat berpengaruh terhadap besaran gelombang.

Di Indonesia, Balai Pantai (2018) melakukan eksperimen redaman gelombang akibat *breakwater* tiang pancang dengan gelombang reguler di perairan dangkal. Data eksperimen tersebut akan digunakan untuk menganalisis lebar, kedalaman, dan laju propagasi *scouring*.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Teori Gelombang

Beberapa ahli telah mendefinisikan parameter-parameter gelombang melalui pendekatan-pendekatan tertentu. Teori gelombang Airy (ditemukan pada tahun 1845) atau gelombang linear, *elementary wave*, atau gelombang amplitudo kecil cocok digunakan pada kasus perairan dalam. Teori gelombang Stokes (ditemukan pada tahun 1880) orde tinggi atau gelombang non linear, gelombang soliter, dan cnoidal cocok digunakan pada kasus perairan dangkal.

a. Teori Gelombang Linear (Airy, 1845)

Pada dasarnya teori gelombang non linear belum mampu memperhitungkan beberapa properti gelombang, namun properti-properti itu dapat diadaptasi dari teori gelombang linear. Suatu perairan dapat dikategorikan menjadi perairan dangkal, transisi atau menengah, dan perairan dalam sesuai dengan nilai perbandingan kedalaman perairan dengan panjang gelombang (d/L). Jika d/L kurang dari $1/25$ termasuk perairan dangkal, jika lebih dari $1/2$ termasuk perairan dalam, dan jika di antara $1/25$ hingga $1/2$ maka termasuk perairan menengah.

Untuk menentukan kategori perairan berdasarkan kedalamannya maka harus dicari dulu nilai L atau panjang gelombang (meter) dalam satu periode. Mengacu pada teori gelombang linear, panjang gelombang adalah

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \dots\dots\dots (2.1)$$

Karena L berada di kedua ruas, maka pendekatan Eckart (1952) dapat digunakan dengan error maksimum 5%.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \sqrt{\tanh \frac{4\pi^2 d}{T^2 g}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan g adalah percepatan gravitasi (m/s²), T adalah periode gelombang (s) dan d adalah kedalaman perairan (m).

Pada kasus perairan dalam, nilai tanh (2πd/L) mendekati 1, sehingga persamaan 2-1 disederhanakan menjadi

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2 \dots\dots\dots (2.3)$$

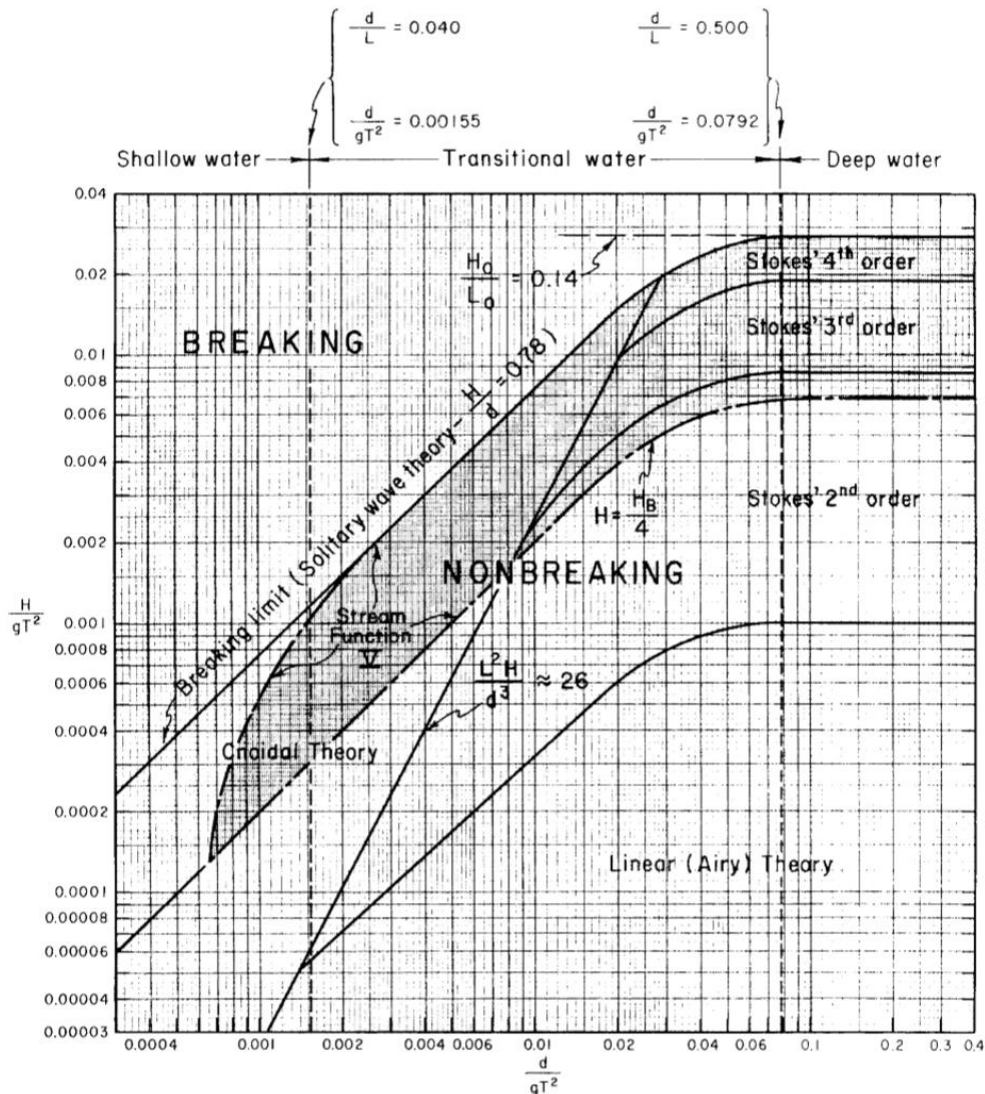
Dengan L₀ adalah panjang gelombang pada perairan dalam. Nilai g/2π adalah 1,56 dalam meter sehingga L₀ = 1,56 T² m. Lalu d/L₀ dicocokkan dengan tabel fungsi d/L dari d/L₀ (Wiegel, 1948) untuk mendapatkan panjang gelombang, L.

b. Teori Gelombang Orde Tinggi

Le Mehaute (1969) membuat grafik daerah validitas teori gelombang (lihat gambar 2.1). Pada grafik tersebut bilangan ursell, tinggi gelombang H, periode gelombang T, dan kedalaman perairan d diperlukan dalam bentuk $\frac{H}{gT^2}$ untuk ordinatnya, $\frac{d}{gT^2}$ untuk axisnya, serta U_R berikut ini.

$$U_R = \frac{L^2 H}{d^3} \dots\dots\dots (2.4)$$

Setelah diplot ke dalam grafik, dapat disimpulkan suatu kondisi perairan dikategorikan dalam perairan dangkal, menengah, dan dalam dengan teori gelombang yang berlaku yaitu teori gelombang Airy, Stokes orde satu, dua, atau tiga, dan seterusnya.



Gambar 2.1 Daerah validitas teori gelombang
 Sumber: *Shore Protection Manual (CERC, 1984)*

2.2.2. Wave Boundary Layer

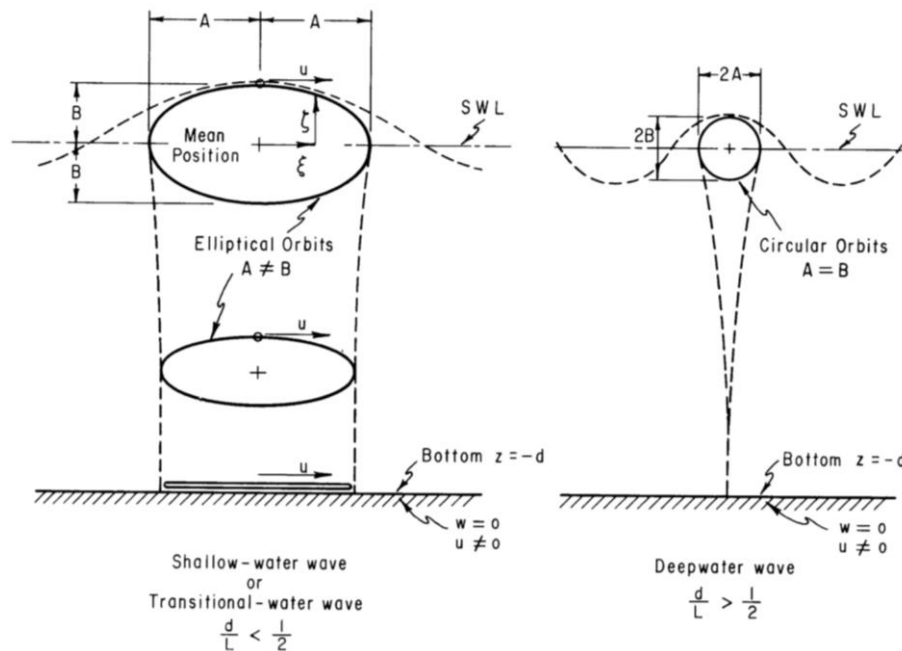
Gelombang dapat menimbulkan energi untuk membentuk pantai, menimbulkan arus dan transpor sedimen dalam arah tegak lurus dan sepanjang pantai, serta menyebabkan gaya-gaya yang bekerja pada bangunan pantai (Triatmojo, 1999). Gelombang dapat memindahkan partikel air secara orbital seperti pada gambar 2.2. Gerakan orbital partikel air yang mencapai dasar dengan kecepatan tertentu dapat membawa material dasar laut termasuk pada kasus gerusan di sekitar tiang pancang. Mengacu pada Zhou (2001), kecepatan horizontal partikel air fungsi waktu, u_b , adalah,

$$u_b = u_m \sin(\omega t) \dots\dots\dots (2.5)$$

u_m adalah kecepatan maksimum partikel air, ω adalah frekuensi gelombang ($=2\pi/T$) dan t adalah waktu yang ditinjau. U_m merupakan perkalian amplitudo perpindahan orbital partikel air di dekat dasar, A , dengan frekuensi gelombang.

$$A = \frac{H}{2 \sinh(kh)} \dots\dots\dots (2.6)$$

Di mana k adalah angka gelombang yaitu $2\pi/L$ dengan L adalah panjang gelombang. Sehingga u_m adalah



Gambar 2.2 Perpindahan partikel air pada perairan dangkal dan perairan dalam
 Sumber: *Shore Protection Manual* (CERC, 1984)

Dari perkalian persamaan 2.6 dengan frekuensi gelombang, maka diperoleh u_m sebagai berikut.

$$u_m = A\omega = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.2.3. Pemecah Gelombang

Pemecah gelombang (*breakwater*) dibangun untuk melindungi daerah di belakangnya dari dampak gelombang laut secara langsung. Berdasarkan letaknya, terdapat dua jenis pemecah gelombang yaitu,

a) *Detached Breakwater*

Pemecah gelombang terpisah adalah bangunan yang dibuat sejajar garis pantai dan berada pada jarak tertentu dari garis pantai. *Detached breakwater*

umumnya menjadi sebutan dari struktur yang dibangun di perairan dangkal relatif dekat dengan bibir pantai. Sedangkan di perairan menengah hingga dalam, sebutan *offshore/reef breakwater* lebih umum digunakan.

b) *Attached Breakwater*

Pemecah gelombang sambung pantai adalah bangunan yang dibuat tersambung secara tegak lurus garis pantai. Tipe ini banyak dibangun di pelabuhan agar perairannya tidak mendapat pengaruh dari gelombang besar sehingga aktivitas pelabuhan tidak terganggu.

2.2.4. Gerusan / *Scouring*

Gerusan / *scouring* adalah erosi sedimen yang ada di dasar laut di sekitar struktur karena aliran arus, gelombang, atau kombinasi keduanya yang dapat mengganggu stabilitas struktur (Sumer dan Fredsoe, 2002). Gerusan terjadi ketika kapasitas transpor sedimen di sekitar struktur lebih besar daripada di daerah yang lebih jauh (Sumer et al, 1992). Hal ini terjadi karena tegangan geser hidrodinamik dasar melebihi tegangan geser kritis sedimen.

Scouring yang terjadi dapat dikelompokkan sebagai berikut :

1. Gerusan Global (*Global Scour*), yaitu tipe gerusan yang terjadi pada keseluruhan lokasi struktur.
2. Gerusan Lokal (*Local Scour*), yaitu tipe gerusan yang pada umumnya terjadi di sekitar satu elemen struktur. Pada gerusan lokal terdapat dua macam tipe yang dipengaruhi oleh *shield parameter*. Ada dua macam tipe gerusan lokal yang umum diketahui, yaitu :

- *Clear Water Scouring*

Jenis *scouring* ini terjadi pada kondisi di mana tidak ada material yang ikut terangkut oleh aliran air. Pada kondisi ini, nilai dari *Shield Parameter* lebih kecil daripada nilai *critical*-nya ($\theta < \theta_{cr}$).

- *Live Bed Scouring*

Jenis *scouring* ini terjadi pada kondisi di mana material atau sedimen yang berada di dasar laut ikut terangkut oleh aliran air. Pada kondisi ini berlaku nilai $\theta > \theta_{cr}$.

Shield parameter atau yang juga disebut *Shield Number* merupakan nilai tak berdimensi yang digunakan untuk menghitung gerakan awal proses transpor sedimen pada aliran fluida. Formula untuk menghitung *Shield Parameter* gelombang reguler diberikan oleh Sumer dan Fredsoe (2002) sebagai berikut :

$$\theta = \frac{\tau_{\infty}}{\rho g(s-1)d_{50}} \dots\dots\dots (2.8)$$

Di mana d_{50} adalah diameter (m) butiran sedimen yang lolos ayakan 50 %. *Specific gravity* sedimen dasar, s , adalah perbandingan masa jenis sedimen dasar dengan masa jenis air $s = \rho_s/\rho$. Tegangan geser dasar maksimum di bawah gelombang jauh dari struktur adalah

$$\tau_{\infty} = 1/2 f_w U_m^2 \dots\dots\dots (2.9)$$

U_m adalah kecepatan maksimum partikel air karena gelombang yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya (lihat persamaan 2.2). Sedangkan f_w adalah koefisien gesek, diberikan oleh Myrhaug et al. yaitu

$$f_w = c \left(\frac{A}{z_0}\right)^{-d} \dots\dots\dots (2.10)$$

di mana z_0 adalah kekasaran dasar yakni $d_{50}/12$ dan A adalah amplitudo perpindahan orbital partikel air di dekat dasar yang telah dijelaskan sebelumnya (lihat persamaan 2.7). Koefisien c dan d mengacu pada data berikut

$$(c,d) = (18,1) \quad \text{for } 20 \leq \frac{A}{z_0} \leq 200 \dots\dots\dots (2.11)$$

$$(c,d) = (1.39,0.52) \quad \text{for } 200 \leq \frac{A}{z_0} \leq 11000 \dots\dots\dots (2.12)$$

$$(c,d) = (0.112,0.25) \quad \text{for } 11000 \leq \frac{A}{z_0} \dots\dots\dots (2.13)$$

Nilai $\theta_{cr,n}$ didapatkan dari persamaan Soulsby dan Whitehouse [10],

$$\theta_{cr,n} = \frac{0,03}{1+1,2D_*} + 0,055(1 - e^{-0,02D_*}) \dots\dots\dots (2.14)$$

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}} D \dots\dots\dots (2.15)$$

Di mana D_* adalah ukuran butir tak berdimensi, $s = \rho_n/\rho_s$, dan v adalah viskositas kinematik fluida. Nilai tak berdimensi *bedload transport* didefinisikan,

$$\Phi_n = \frac{q_{b,n}}{[gD^3(s-1)]^{1/2}} \dots\dots\dots (2.16)$$

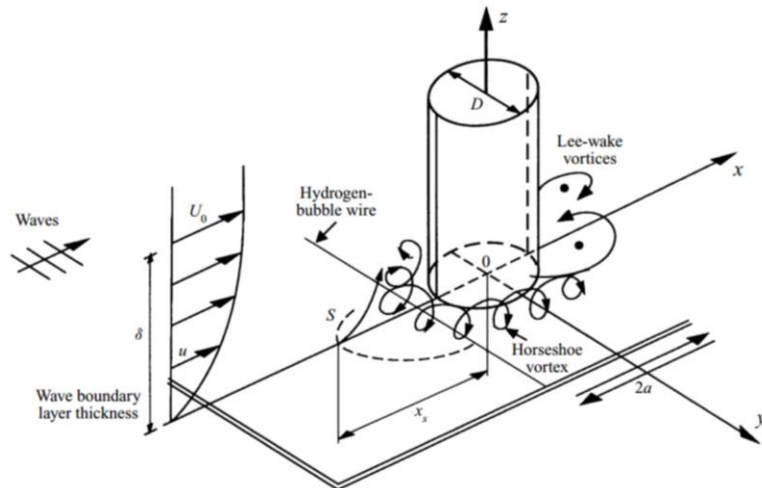
Di mana $q_{b,n}$ adalah laju transpor dalam satuan volume per lebar dasar per waktu. Φ_n didapatkan dari persamaan Meyer-Peter dan Muller berikut,

$$\Phi_n = B_n(\theta_n - \theta_{cr,n})^{1,5} c_{b,n} \dots\dots\dots (2.17)$$

Di mana B_n adalah koefisien *bedload*.

2.2.5. Gerusan di Sekitar Tiang Pancang

Gerusan dapat mengancam stabilitas struktur laut termasuk *breakwater* tiang pancang. Gerusan yang semakin besar mengurangi panjang tiang yang terpendam, frekuensi natural struktur berkurang, kemungkinan kegagalan struktur semakin besar (Ping, 2014).



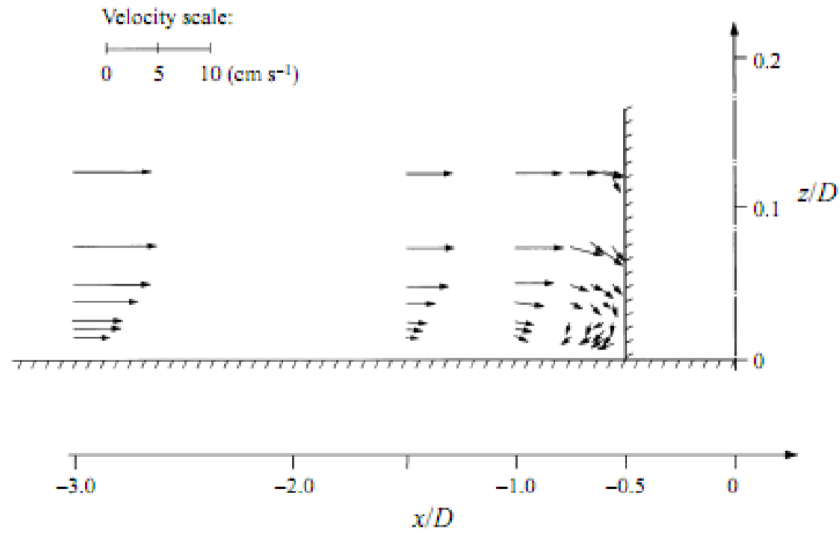
Gambar 2.3 Aliran di sekitar tiang pancang

Sumber: Ping (2014)

Sumer dan Fredsoe (1992) dalam eksperimennya menjelaskan bahwa aliran dasar yang menyebabkan gerusan di sekitar tiang vertikal terdiri dari *Horseshoe Vortex* di arah datangnya aliran dan *Vortex Shedding* atau *Lee Wake Vortices* di balik struktur.

a. *Horseshoe Vortex*

Pusaran tapal kuda terbentuk di dasar laut akibat rotasi di arah datangnya aliran. Dalam kasus gerusan akibat gelombang saja, rotasi ini terbentuk di *wave boundary layer*. Ketebalan *wave boundary layer* dipengaruhi oleh bilangan KC (*Keulegan-Carpenter Number*). *Scouring* tidak terjadi bila bilangan KC kurang dari 6. Setelah itu dimensi *scouring* semakin besar jika bilangan KC semakin besar.



Gambar 2.4 Formasi *horseshoe vortex* yang diilustrasikan dengan vektor (untuk $KC=10,3$ dan $\omega t=90^\circ$)
 Sumber: Sumer et al. (1997)

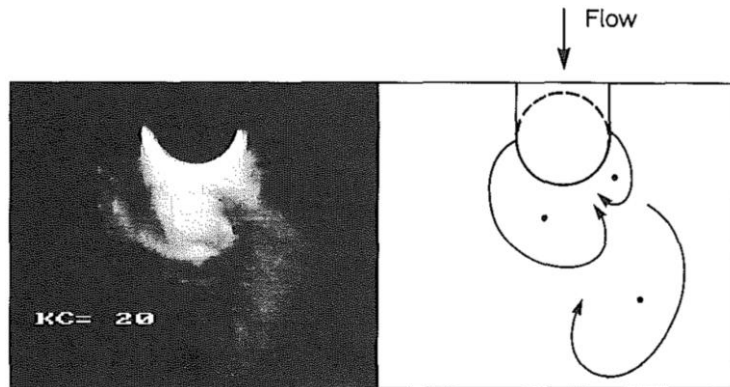
Keulegan-Carpenter Number merupakan bilangan non dimensional yang menghubungkan gaya drag dengan gaya inersia pada aliran yang berosilasi.

$$KC = \frac{TU_m}{D} \dots\dots\dots (2.18)$$

Dengan T adalah periode gelombang (s), U_m adalah kecepatan orbital gelombang (m/s) dan D adalah diameter tiang (m).

b. *Vortex Shedding*

Partikel air yang terhalang struktur selanjutnya berputar di balik struktur. Putaran ini disebut *Vortex Shedding* atau *Lee Wake Vortices*.



Gambar 2.5 Foto vortex shedding (untuk $\omega t=115^\circ$)
 Sumber: Sumer et al. (1992)

2.2.6. Kedalaman *Scouring*

Sumer et. al. (1992) dalam penelitiannya tentang *scouring* di sekitar tiang vertikal akibat gelombang, menemukan hubungan antara bilangan KC dengan kedalaman *scouring* yang terjadi bila KC sama dengan atau lebih dari 6. Hubungan itu dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$\frac{S}{D} = 1,3 \{1 - \exp[-0,03(KC - 6)]\} \quad KC \geq 6 \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

2.2.7. Lebar *Scouring*

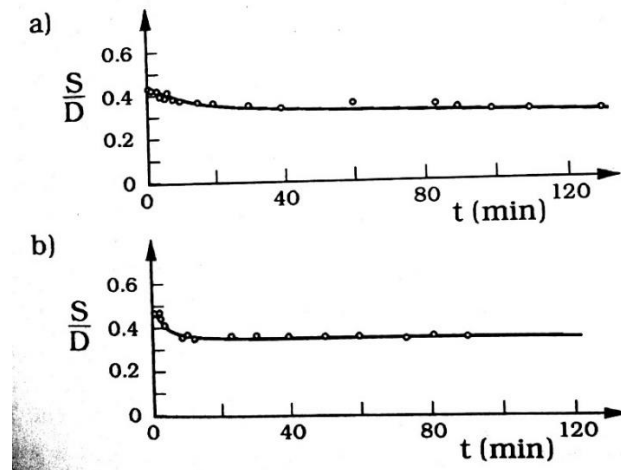
Sumer dan Fredsoe (1990) telah melakukan penelitian mengenai perhitungan lebar *scouring* hingga didapatkan rumus :

$$\frac{W}{D} = 0.35 KC^{0.65} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

Dengan W adalah lebar *scouring* (meter) yang diukur dari titik tengah tiang ke titik maksimum lubang *scouring* paling jauh.

2.2.8. Laju Propagasi *Scouring*

Laju propagarsi menunjukkan mekanisme terjadinya *scouring* tiap waktu. Waktu yang dibutuhkan untuk mengembangkan penggerusan hingga mencapai keseimbangan disebut *time scale*. Pada gambar 2.6. ditunjukkan perubahan kedalaman *scouring* dengan dengan waktu tertentu kondisi akibat gelombang.



Gambar 2.6 Pengaruh nilai KC terhadap laju propagarsi *scouring* (Sumer and Fredsoe. 1992)

2.2.9. Efek Kelompok Tiang

Breakwater tiang pancang terdiri dari beberapa baris dan kolom. Jika celah antara tiang, b (baris) atau B (kolom), kecil dibandingkan dengan diameter tiang, efek interferensi akan menyebabkan perubahan pada kedalaman gerusan equilibrium dibandingkan dengan kasus tiang tunggal (Sumer dan Fredsoe, 2002). Jika susunan tiang sangat dekat, *lee-wake vortices* akibat tiang arah *upstream* akan mempengaruhi perilaku aliran di sekitar tiang arah *downstream*. Sedangkan jika jarak antar tiang sangat besar, kedalaman gerusan di sekitar masing-masing tiang tidak akan dipengaruhi oleh keberadaan tiang lainnya dan oleh karena itu dapat diperlakukan sebagai tiang tunggal. Dari persamaan 2.19 terlihat bahwa kedalaman *scouring* merupakan fungsi dari bilangan KC. Untuk kasus kelompok tiang, bilangan non dimensional b/D dan B/D juga akan mempengaruhi hasilnya. Semakin rapat jarak antar tiang semakin besar gerusan yang terjadi (Imran, 2013).

2.2.10. Computational Fluid Dynamic (CFD)

CFD (*Computational Fluid Dynamics*) adalah metode perhitungan, memprediksi, dan pendekatan aliran fluida secara numerik dengan bantuan komputer. *CFD* juga dapat mensimulasikan transportasi jenis kimia, reaksi kimia, pembakaran, evaporasi, kondensasi, dan kristalisasi (Andersson dkk., 2012). Beberapa contoh pemodelan *CFD* adalah *Fluent*, *CFX*, *Star-CD*, *FLOW-3D* dll.

Keuntungan menggunakan *CFD* adalah dapat memperoleh informasi yang terperinci dari simulasi yang dilakukan. Informasi rinci ini akan membantu dalam meningkatkan pemahaman kualitatif dari suatu proses dan dari studi parameter dapat mengungkapkan informasi tambahan seperti *bottle necks* dan batas operasional dari peralatan (Andersson dkk., 2012).

Pada pemodelan *CFD*, *meshing* merupakan suatu hal yang paling penting, *meshing* adalah suatu daerah yang akan dijadikan sebagai objek pemodelan numerik. Semakin kecil jumlah *mesh* nya maka semakin *valid* hasil pemodelannya.

2.2.11. Froude Similarity Law

Untuk memodelkan suatu proses yang terjadi di alam, seluruh dimensi pemodelan harus sesuai dengan kondisi riil. Namun pemodelan atau eksperimen fisik akan membutuhkan ruang yang besar jika harus sama dengan kondisi riil. Maka dari itu perlu diskala untuk memperkecil dimensi pemodelan. Kesamaan geometris mengharuskan semua dimensi fisik dalam struktur *prototype* diskalakan secara merata dalam model. Berikut adalah rasio geometris Froude.

$$Fr = \frac{u_p^2}{gl_p} = \frac{u_m^2}{gl_m} \dots\dots\dots (2.21)$$

Di mana,

u_p = model fluid velocity (m/s)

u_p = prototype fluid velocity (m/s)

l_p = panjang pada *prototype* (m)

l_m = panjang yang dimodelkan (m)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

Dalam hal ini model yang digunakan harus diskala dari ukuran yang sebenarnya sehingga bisa disesuaikan dengan tempat eksperimen.

$$l_p = \lambda l_m \dots\dots\dots (2.22)$$

Panjang sebenarnya dikalikan dengan λ sebagai faktor skala. Hal yang sama digunakan dalam penentuan skala model dengan metode Froude. Maka dapat diperoleh persamaan gelombang baru sebagai berikut.

$$H_{pro} = \lambda H_{mod} \dots\dots\dots (2.23)$$

$$T_{pro} = \sqrt{\lambda T_{mod}} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dengan,

H_{pro} = Prototype Wave Height (m)

H_{mod} = Model Wave Height (m)

T_{pro} = Prototype Wave Period (m)

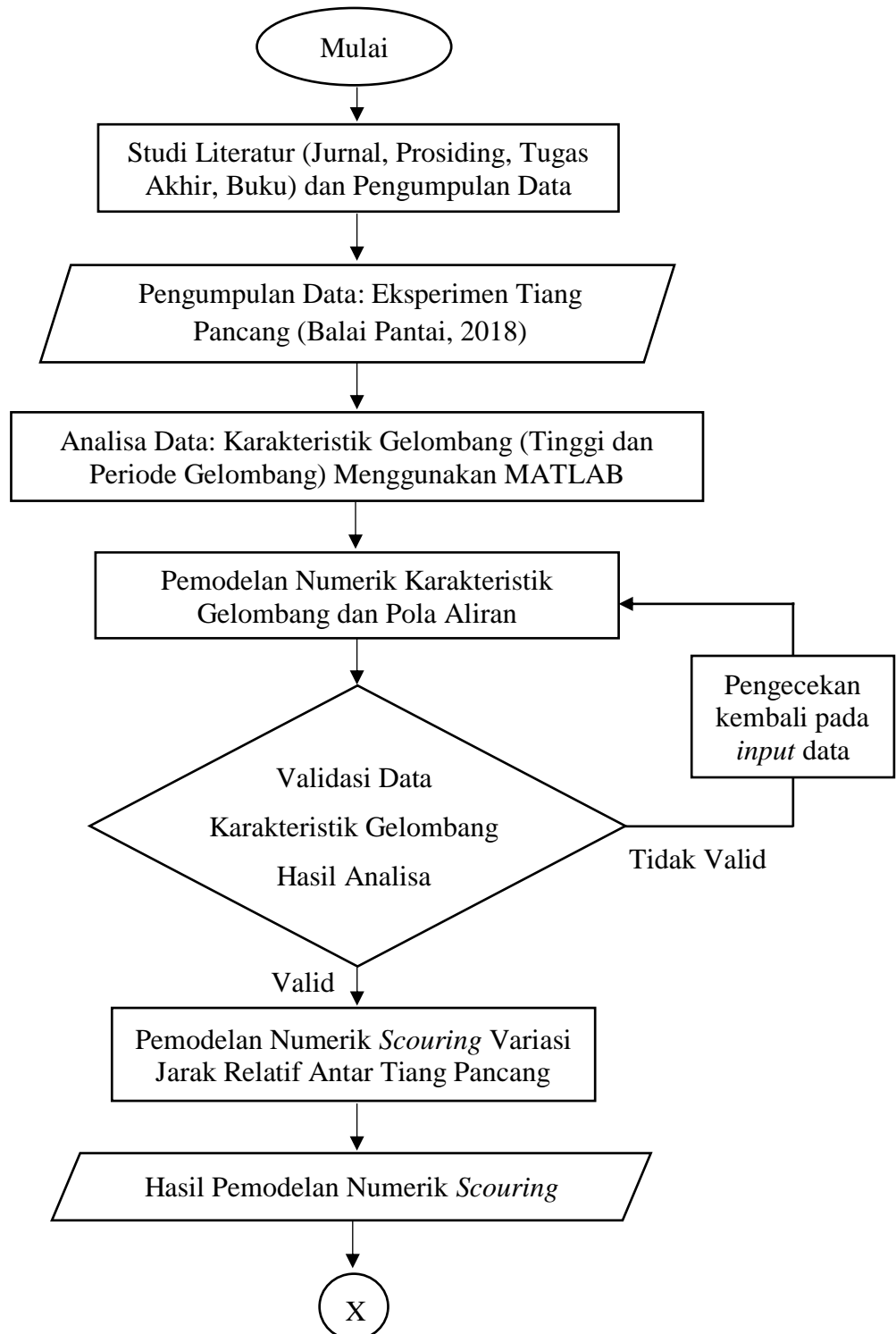
T_{mod} = Model Wave Period (m)

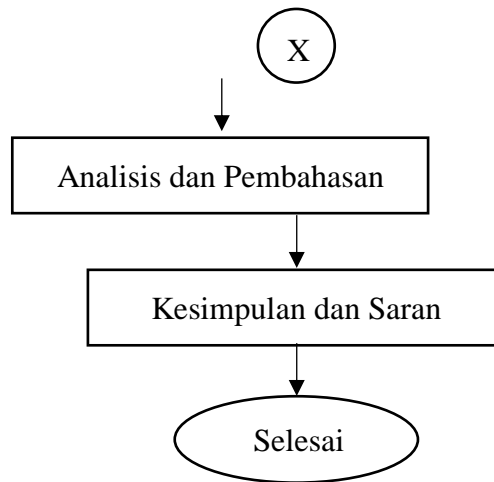
Froude Similarity Law atau hukum kesamaan Froude akan digunakan untuk analisa dimensi nantinya. *Scaling* ini khususnya akan digunakan untuk mencari dimensi riil struktur *breakwater* di laut.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2. Metodologi Penelitian

Untuk menyelesaikan permasalahan dalam penelitian tugas akhir ini diperlukan tahap-tahap yang berurutan berdasarkan urutan kerja sehingga tujuan yang diharapkan dapat tercapai dengan baik. Berikut tahapan-tahapan yang dikerjakan dalam penelitian :

1. Studi Literatur

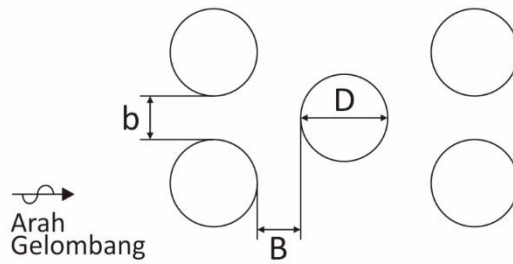
Pada tahapan ini penulis melakukan pencarian sumber informasi dan referensi. Sumber literatur diperoleh dari jurnal, prosiding, tugas akhir, buku dan sumber-sumber lainnya. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* Flow 3D. Sedangkan sumber data eksperimen diperoleh dari penelitian tiang pancang oleh Balai Pantai Bali tahun 2018.

2. Pengumpulan Data

Data yang diperoleh dari penelitian tiang pancang oleh Balai Pantai (2018) berupa data elevasi muka air. Dipilih 4 skenario dengan variasi jarak relatif antar tiang pancang.

- **Data Struktur *Breakwater* Tiang Pancang**

Penelitian ini menggunakan 4 modul dari eksperimen Balai Pantai (2018) dengan variasi jarak baris relatif ($b/D=0,5;1,0$) dan jarak kolom relatif ($B/D=0,5;1,0$) antar struktur tiang pancang. Sedangkan jarak antar kelompok tiang sebesar 33 cm. Gambar 3.2 menunjukkan jarak relatif antar tiang pancang (b/D dan B/D). Tabel 3.1 menunjukkan variasi jarak antar tiang pancang.

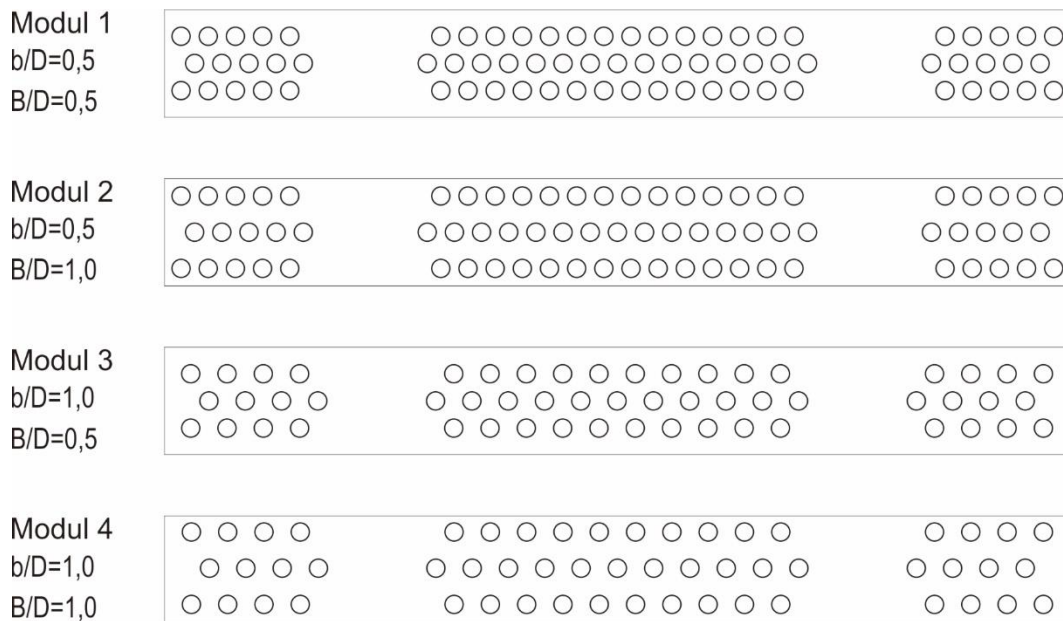


Gambar 3.2 Jarak antar tiang pancang

Tabel 3.1 Variasi Pemodelan

Modul	G (cm)	D (cm)	b (cm)	B (cm)	b/D	B/D
1	33	6	3	3	0,5	0,5
2	33	6	3	6	0,5	1,0
3	33	6	6	3	1,0	0,5
4	33	6	6	6	1,0	1,0

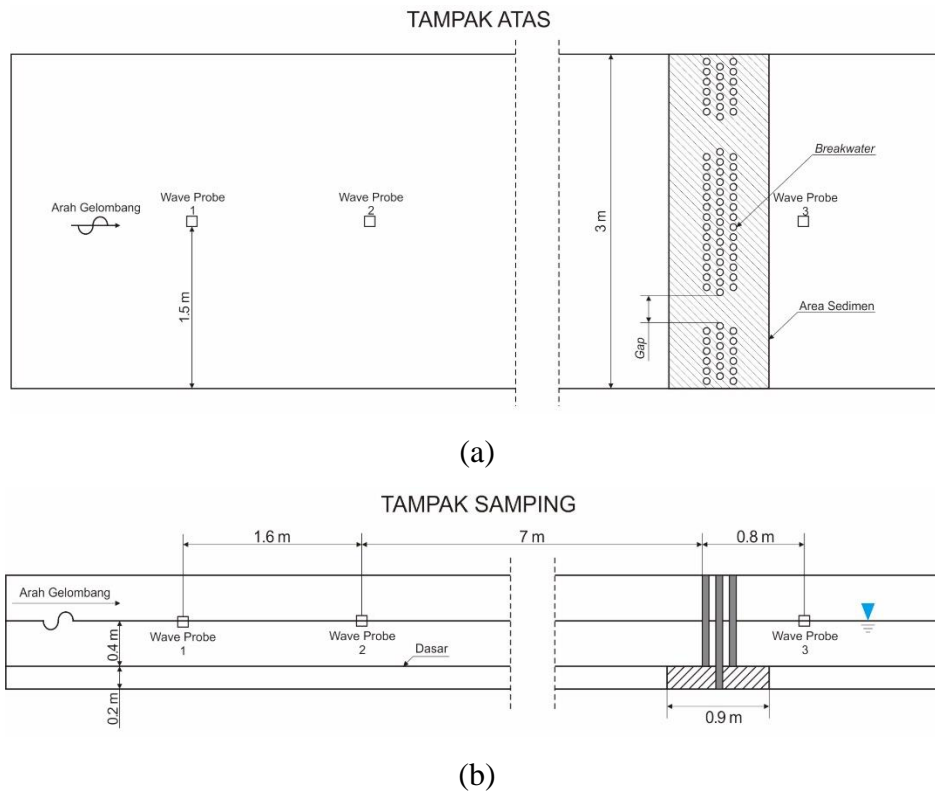
Konfigurasi tiang pada *breakwater* yang akan dimodelkan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.3 Konfigurasi tiang pancang

- **Sketsa Pengujian**

Eksperimen dilakukan dalam *flume* berukuran 40 m x 3 m x 1 m (panjang, lebar, tinggi). Sketsa pengujian tiang pancang tampak atas dapat dilihat pada gambar 3.4 (a). Sedangkan gambar 3.4 (b) merupakan sketsa pengujian tiang pancang tampak samping.



Gambar 3.4 Sketsa Pengujian (a) tampak atas (b) tampak samping

- **Data Sedimen**

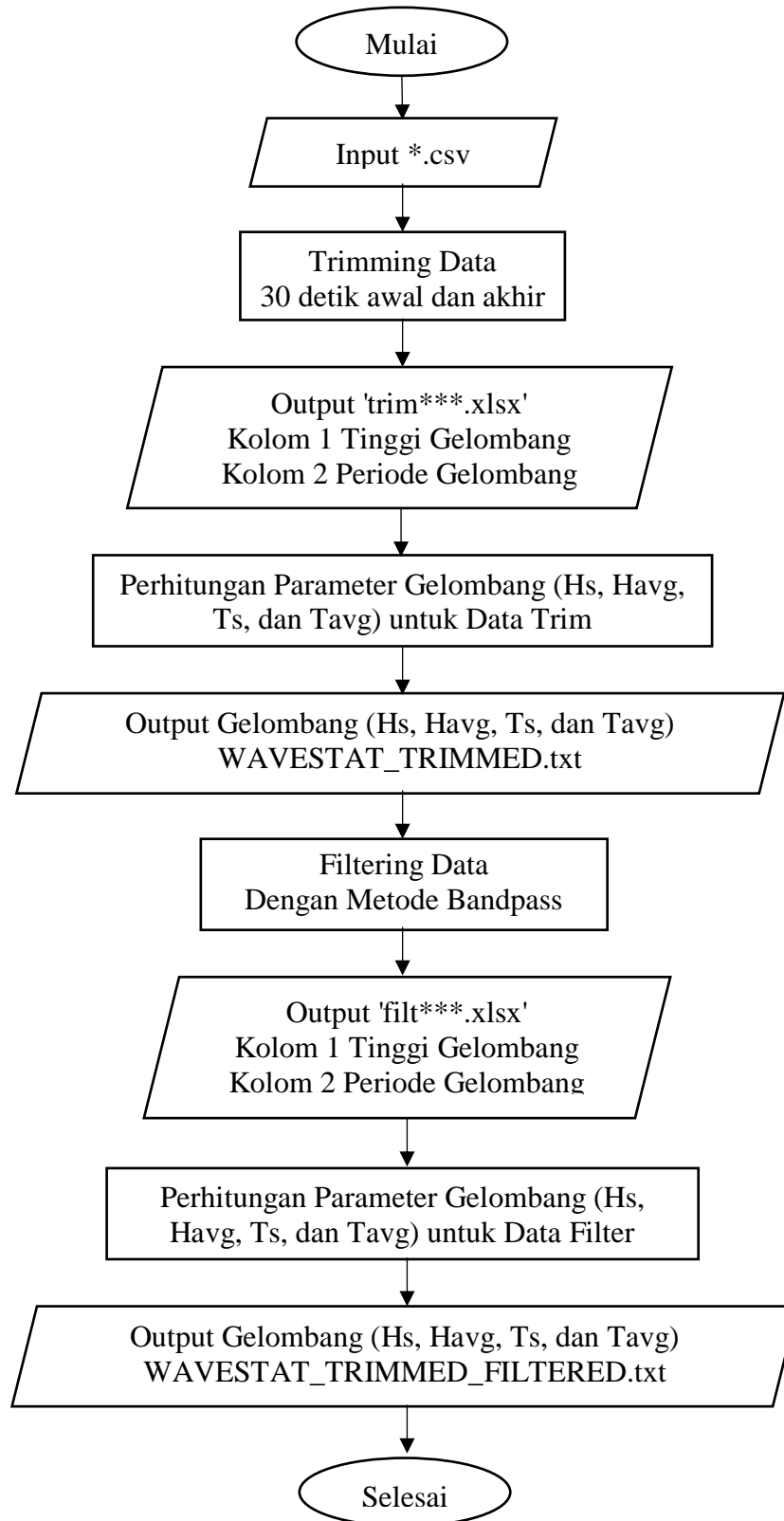
Eksperimen tiang pancang Balai Pantai tidak meneliti gerusan, sehingga data sedimen tidak tersedia. Maka dari itu penulis mengambil literatur dari Buku Dinamika Pantai (Hidayati, 2017) tentang karakteristik sedimen dari macam-macam jenis pantai. Hasilnya pantai wisata didominasi oleh pasir. Oleh karena itu dalam penelitian ini sedimen yang digunakan adalah jenis pasir dengan diameter 0,56 mm dan massa jenis 1344 Kg/m³.

- **Data Gelombang**

Data gelombang yang didapatkan berupa *file *.csv* berisi elevasi muka air dari tiap-tiap *wave probe*. Gelombang yang digunakan dalam eksperimen adalah gelombang reguler dengan $H = 0,2$ m dan $T = 3$ s dengan kedalaman air 0,4 m.

3. Analisa Data Gelombang Menggunakan MATLAB

Data gelombang yang masih berupa elevasi muka air lalu diolah untuk mengetahui karakteristik gelombang. Tujuannya adalah sebagai acuan dalam pemodelan numerik yang akan dilakukan menggunakan *software* CFD. Gambar 3.3 merupakan diagram alir algoritma program *FiltTrimWavestat.m* yang digunakan.



Gambar 3.5 Flow chart algoritma program FiltTrimWavestat.m untuk mengidentifikasi parameter gelombang dari data eksperimen

Karakteristik gelombang yang ditinjau adalah tinggi gelombang signifikan, tinggi gelombang rata-rata, periode gelombang signifikan, dan periode gelombang rata-rata. Adapun langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

1. Salin skrip TrimFiltWavestat.m dan *file* excel skenario ke dalam folder
2. Salin *direcory* folder pengerjaan ke matlab
3. Buka skrip ke editor MATLAB
4. Ganti nama *file* yang di-*input* sesuai skenario yang dikerjakan
5. Ganti juga nama *file* untuk *output* data yang sudah di-*trim* "trim.....xlsx" (line 23)
6. Ganti juga nama *file* untuk *output* data yang sudah di-*trim* dan difilter "filt.....xlsx" (line 143)
7. Running skrip MATLAB

Skrip FiltTrimWavestat.m didapat penulis dari Kerja Praktik di Balai Pantai. Berisi skrip untuk memotong (*triming*), menyaring, (*filtering*), dan mengidentifikasi parameter gelombang dari data rekaman seluruh *wave probe* menggunakan *software* MATLAB.

Trim data dilakukan sepanjang 30 detik di awal dan akhir rekaman data. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa data yang akan diolah merupakan data yang telah stabil. Pemotongan di awal rekaman dilakukan untuk menghindari *error* akibat awal pergerakan *wave generator* dari kondisi diam. Pemotongan di akhir rekaman data dilakukan untuk menghindari kemungkinan refleksi yang terjadi dari arah belakang *flume* terutama setelah berhentinya *wave generator*. Batas trim data yaitu 30 detik awal dan akhir. Sehingga data yang akan digunakan adalah data ke 750 sampai 3750.

Penyaringan data atau *filtering* dilakukan menggunakan metode *Bandpass*. *Bandpass* filter merupakan filter yang melewatkan frekuensi di antara frekuensi *cut-off* bawah dan frekuensi *cut-off* atas. Fungsi dari *bandpass* filter menghilangkan komponen frekuensi yang mengganggu (*noise*) pada data gelombang dan meloloskan data yang diinginkan dengan analisis spektrum.

Baik setelah data dipotong maupun setelah data juga disaring, barulah dilakukan perhitungan statistika gelombang meliputi Havg dan Tavg. Hal ini

dilakukan untuk membandingkan data sebelum dan setelah disaring. Dari skrip FiltTrimWavestat.m menghasilkan file *.txt berisi Havg dan Tavg untuk seluruh *wave probe*.

4. Pemodelan Numerik Karakteristik Gelombang dan Pola Aliran

Selanjutnya, dilakukan pemodelan numerik karakteristik gelombang dan pola aliran menggunakan *software* CFD-Flow 3D. Pemodelan dilakukan sesuai dengan rancang model eksperimen dengan penambahan karakteristik sedimen sehingga dalam pemodelan *scouring* nantinya menggunakan *setting* yang sama.

5. Validasi Data

Hasil pemodelan numerik merupakan hasil prediksi yang memiliki akurasi tertentu. Hasil prediksi yang baik adalah hasil yang menunjukkan *error* yang kecil. Formula yang digunakan untuk menghitung persentase *error* adalah

$$error = \left| \frac{A-F}{A} \right| \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

A adalah nilai aktual sedangkan F adalah nilai prediksi. Dalam penelitian ini validasi dilakukan dengan membandingkan tinggi gelombang rata-rata eksperimen dengan pemodelan numerik. Menggunakan tinggi gelombang rata-rata karena simulasi menggunakan gelombang reguler.

Model dianggap valid jika nilai *error* kurang dari atau sama dengan 10%. Sedangkan untuk validasi pola aliran, hanya didasarkan secara teoritis dari *input* parameter. Jika terdapat perbandingan yang relatif jauh antara hasil eksperimen dengan pemodelan, perlu dilakukan pengecekan ulang pada bagian *input* data, setelah itu bisa dilakukan pemodelan dengan variasi jarak relatif antar tiang pancang.

6. Pemodelan Numerik *Scouring* Variasi Jarak Relatif Antar Tiang Pancang

Jika model telah valid, selanjutnya dilakukan pemodelan *scouring* dengan variasi jarak relatif antar tiang pancang menggunakan *input* data sesuai dengan data yang telah divalidasi. Pemodelan *scouring* dilakukan dengan *finish time* 900 detik atau 15 menit. Setelah melakukan pemodelan numerik, akan mendapatkan hasil dari kedalaman, lebar dan laju propagasi *scouring*.

7. Hasil Pemodelan Numerik *Scouring*

Setelah simulasi selesai, maka akan didapatkan hasil pemodelan secara visual pada software Flow 3D.

8. Analisis dan Pembahasan

Setelah melakukan pemodelan akan mendapatkan hasil kedalaman, lebar, dan laju propagasi *scouring* kemudian akan dilakukan analisis dan pembahasan lebih lanjut. Hasil analisis akan disajikan dalam bentuk grafik dan hasil pemodelan agar dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

9. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil yang diperoleh, lalu ditarik kesimpulan dari pemodelan numerik *scouring* tiang pancang dan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

3.3. Analisa Dimensi

Pemodelan numerik ini didasarkan pada eksperimen fisik Balai Pantai, Bali. Dalam eksperimen fisik pada umumnya, suatu *prototype* dimodelkan lebih kecil dari ukuran sesungguhnya. Maka dari itu perhatian mengenai perbandingan skala sangat menentukan hasil yang dicapai. Skala yang digunakan dalam eksperimen Balai Pantai, Bali adalah 1:10. Berdasarkan kesamaan geometri persamaan 2.22, $l_p = \lambda l_m$ maka didapatkan dimensi riil yang dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Dimensi Riil Variasi Pemodelan

Modul	d (m)	G (m)	D (cm)	b (cm)	B (cm)	b/D	B/D
1	4	3,3	60	30	30	0,5	0,5
2	4	3,3	60	30	60	0,5	1,0
3	4	3,3	60	60	30	1,0	0,5
4	4	3,3	60	60	60	1,0	1,0

Panjang sebenarnya dikalikan dengan λ sebagai faktor skala. Dari persamaan 2.23 dan 2.24 dapat diperoleh H dan T baru sebagai berikut.

$$H_{riil} = 2 \text{ m}$$

$$T_{riil} = 3,08 \text{ s}$$

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Input Parameter Software CFD

Penentuan parameter-parameter penting yang diinput dalam *software* CFD meliputi karakteristik gelombang dan parameter area sedimen.

4.1.1. Karakteristik Gelombang

Perhitungan secara teoritis perlu dilakukan untuk mengetahui jenis gelombang eksperimen. Perhitungan persamaan 2.3 menggunakan *input* data dari eksperimen, yakni $H = 0,2$ m, $T = 3$ s dan $d = 0,4$ m telah dilakukan.

$$L_0 = 1,56 T^2 \quad \text{m}$$

$$L_0 = 14,04 \quad \text{m}$$

$$\frac{d}{L_0} = 0,0284$$

$$\frac{d}{L} = 0,0688 \dots\dots\dots \quad \text{dari tabel fungsi } d/L \text{ dari } d/L_0 \text{ (Wiegel, 1948)}$$

$$L = 5,81 \text{ m}$$

Le Mehaute (1969) membuat grafik daerah validitas teori gelombang, lihat gambar 2.1. Pada grafik tersebut bilangan ursell, H , T , dan d diperlukan. Menggunakan *input* data eksperimen, maka didapat,

$$U_R = 105,48$$

$$\frac{H}{gT^2} = 0,0023$$

$$\frac{d}{gT^2} = 0,0045.$$

Setelah diplot ke dalam grafik, dapat disimpulkan bahwa kondisi perairan pada penelitian ini teori gelombang yang berlaku adalah *cnoidal theory*. Dalam pemodelan numerik ini, pembangkit gelombang dimodelkan pada *wave probe* 1 eksperimen. Sehingga *wave boundary condition* disesuaikan dengan karakteristik gelombang, H_{avg} , yang tercatat pada *wave probe* 1. Di bawah ini akan dilakukan analisa *wave stat* dari data yang terekam oleh *wave probe* eksperimen.

Data hasil eksperimen berupa elevasi gelombang yang direkam di seluruh *wave probe* (3 buah). Dalam satu skenario eksperimen, satu *wave probe* merekam

4500 data. Satu skenario berjalan dalam waktu 3 menit (180 detik) dengan frekuensi sampling 25 data per detik. Data yang terekam kemudian dipotong sepanjang 30 detik awal dan akhir, sehingga tersisa 120 detik, yakni 3000 data. Periode gelombang yang diterapkan dalam eksperimen adalah 3 detik, sehingga selama satu skenario percobaan terdapat 40 gelombang.

Setelah data dipotong (*trimming*) menjadi 3000 data, selanjutnya dilakukan penyaringan data (*filtering*). Data gelombang yang direkam *wave probe* pada eksperimen merupakan data mentah yang belum difilter. Balai Pantai membuat program filter sendiri menggunakan MATLAB. Tujuan filter ini adalah untuk meloloskan data yang tidak sesuai rencana. Lalu analisa *wave stat* dapat dilakukan. Berikut adalah hasil identifikasi karakteristik gelombang eksperimen.

Tabel 4.1 Karakteristik gelombang eksperimen

Skenario	b/D	B/D	WP	Havg	Tavg
1	0,5	0,5	1	0,1585	2,9908
			2	0,1364	2,9815
			3	0,0731	2,9805
2	0,5	1,0	1	0,1574	2,9916
			2	0,1325	2,9928
			3	0,0705	2,9938
3	1,0	0,5	1	0,1576	2,9949
			2	0,1353	2,9928
			3	0,0669	2,9785
4	1,0	1,0	1	0,1596	2,9916
			2	0,1338	2,9877
			3	0,0694	2,9949

Input parameter *software* CFD dari uraian di atas dirangkum dalam tabel 4.2 di bawah ini.

Tabel 4.2 Input Parameter Gelombang

Modul	H (m)	T (s)	d (m)	Teori
1	0,1585	3	0,4	<i>Stokes and Cnoidal (Fourier Series Method)</i>
2	0,1574	3		
3	0,1576	3		
4	0,1596	3		

4.1.2 Parameter Sedimen

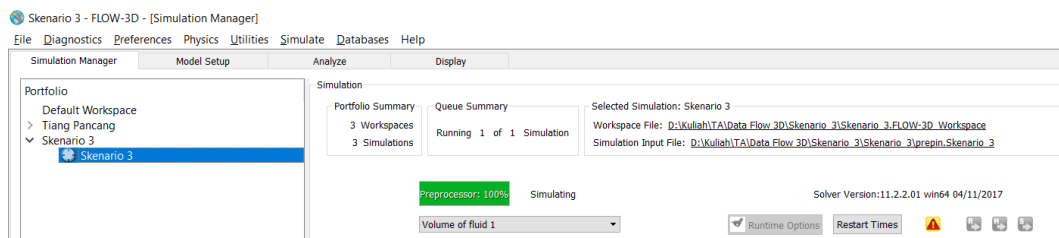
Sedimen yang digunakan adalah pasir, dengan diameter 0,56 mm dan densitas 1344 Kg/m³. Dari persamaan 2.14 didapatkan nilai $\theta_{cr,n}$ adalah 0,04. B_n adalah koefisien *bedload*, bernilai 8,0 berdasarkan nilai standar dalam *software* yang digunakan.

4.2. Pemodelan dengan CFD-FLOW3D

Dalam pemodelan ini, *flume* dipotong sehingga pembangkit gelombang yang dimodelkan berada pada posisi *wave probe* 1 eksperimen. Pemodelan ini memodelkan gelombang reguler dan *scouring* yang terjadi di sekitar *breakwater* tiang pancang. Berikut adalah tahapan pemodelan pada CFD-FLOW3D :

4.2.1. Pembuatan *Workspace*.

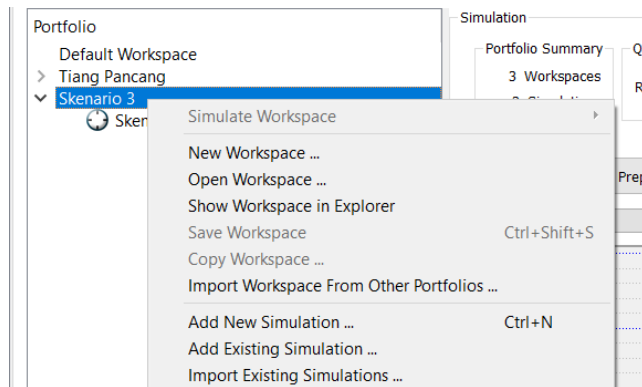
Pada saat di halaman awal CFD-FLOW3D pilih menu file di *toolbar* dan buat *new workspace* seperti pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Tampilan awal CFD-FLOW3D

4.2.2. Membuat simulasi

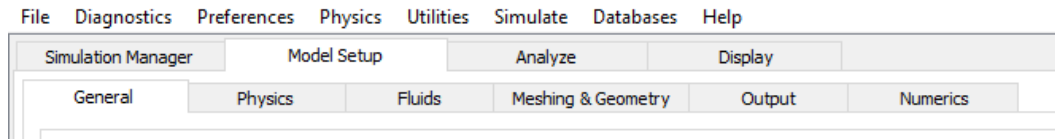
Setelah membuat *workspace* maka akan muncul portofolio di sebelah kiri CFD-FLOW3D. Pada tahap ini diminta untuk membuat simulasi baru dengan klik kanan dan pilih “*new simulation*” seperti gambar 4.2 dibawah ini.



Gambar 4.2 Pembuatan simulasi baru

4.2.3. Pengaturan Menu Model Setup

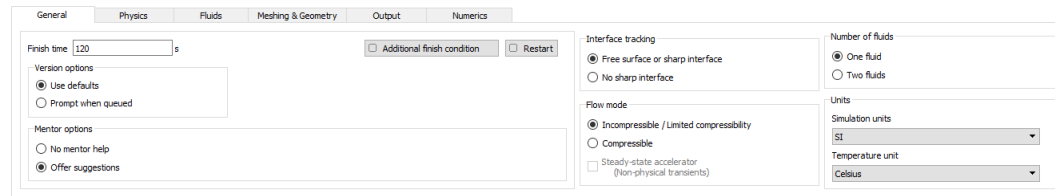
Setelah simulasi dibuat akan muncul menu *model setup*, yaitu menu di mana pemodelan *flume* dan parameter-parameter yang akan digunakan untuk *scouring* akan diatur. Tampilan menu *model setup* bisa dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Menu Model Setup

4.2.4. Pengaturan Waktu dan Satuan

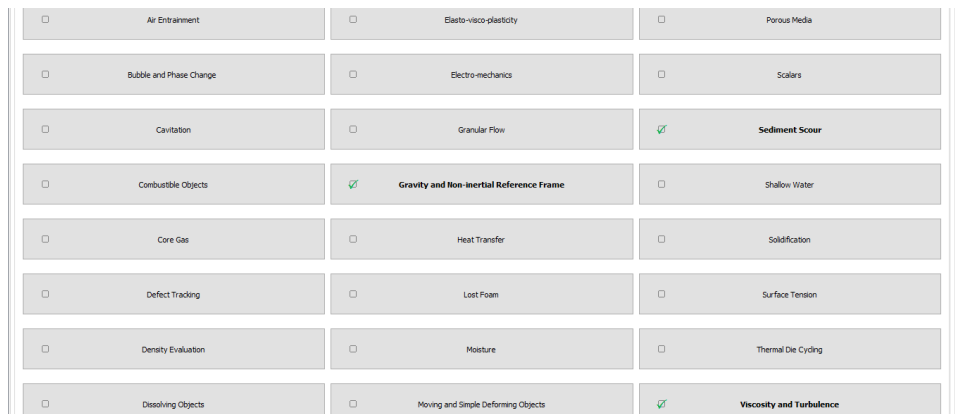
Tahap selanjutnya yaitu memilih menu *model setup* dan pilih tab *general* untuk memasukkan waktu yang digunakan dalam eksperimen yaitu 25 menit atau 1500 s. Kemudian satuan yang digunakan dalam CFD-FLOW3D yaitu satuan SI. Langkah pengerjaan dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Tampilan Model setup General

4.2.5. Pengaturan Physics

Pada tahapan ini terdapat parameter-parameter yang tersedia pada CFD-FLOW3D, akan tetapi untuk memodelkan *scouring* parameter-parameter yang digunakan adalah *sediment scour*, *gravity and Non-inertial reference frame*, *viscosity and turbulence*. seperti yang terlihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.5. Tampilan menu pada pengaturan physics

Ketiga parameter tersebut juga diatur dengan beberapa masukan masing-masing antara lain :

a. *Density Evaluation*

Pada parameter ini densitas dianggap konstan

b. *Gravity*

Pada parameter ini hanya memodelkan gravitasi pada sumbu z yaitu sebesar $-9,81 \text{ m/s}^2$.

c. *Sediment Scour*

Pada menu *sediment definition* digunakan untuk memodelkan transpor sedimen pada CFD-Flow 3D dengan memasukkan data diameter tanah dan densitas tanah.

d. *Viscosity and Turbulance*

Pada parameter ini perhitungan aliran *viscous* dan turbulen yang terjadi dapat dipilih sesuai dengan pemodelan yang diinginkan. Digunakan model $k-\omega$ karena model turbulensi ini lebih baik dalam kondisi aliran dengan gradien tekanan yang mengalir daripada model $k-\varepsilon$ atau RNG

4.2.6. Fluid Properties

Fluid properties dalam *CFD Flow 3D* digunakan untuk menentukan karakteristik fluida. Dikarenakan dalam eksperimen menggunakan air tawar maka nilai densitasnya adalah 1000 kg/m^3 .

4.2.7. Meshing and Geometry

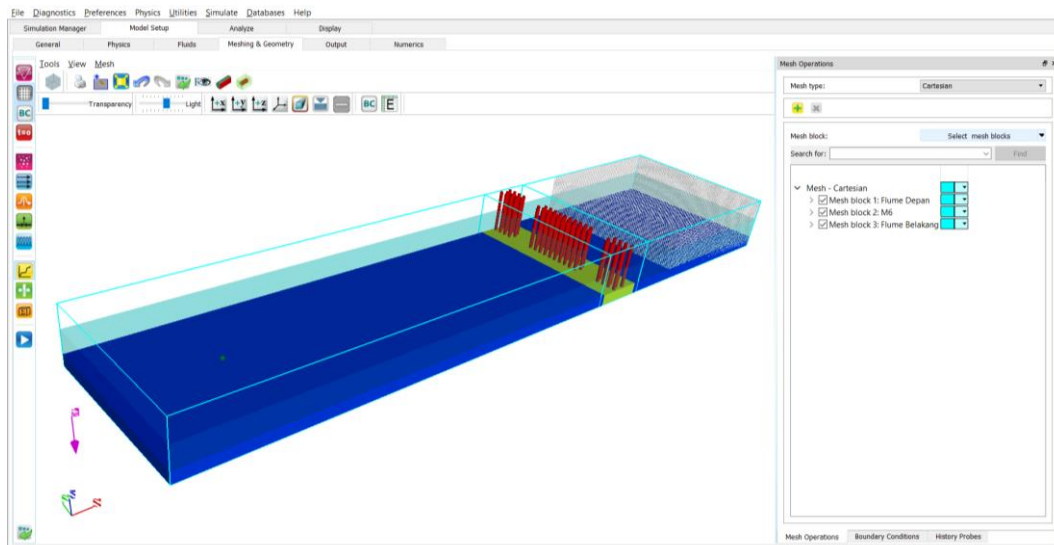
Setelah memasukkan beberapa parameter yang akan digunakan untuk pemodelan *scouring* pada *flume*, selanjutnya adalah memasukkan file pemodelan *flume* dari Autocad dengan format *.stl*. Tampilan menu bisa dilihat seperti pada gambar 4.6. Setelah semua file dimasukkan pada CFD-FLOW3D maka akan muncul hasil pemodelan tersebut seperti pada gambar A.. Pada menu *meshing and geometry* juga terdapat beberapa ikon yang terletak di sebelah kiri yaitu ikon untuk membuat *mesh*, *boundaries condition*, *probes* dll.

Tabel 4.3. *Geometry dan Peletakannya*

<i>Geometry Name</i>	Lantai Depan	Flume Depan	Area Struktur	Flume Belakang
<i>X (m)</i>	0 – 8,3	8,3 – 9,2	8,6 – 8,9	9,2 – 13,3

Tabel 4.4. *Parameter Tiap Blok Mesh*

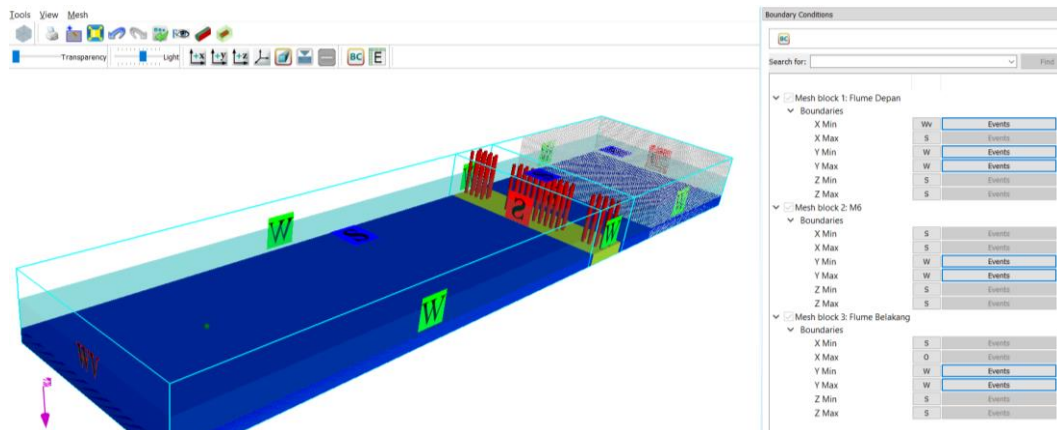
<i>Mesh Name</i>	Flume Depan	Area Struktur	Flume Belakang
<i>Size Cells (m)</i>	0,1	0,02	0,2
<i>X direction (m)</i>	0 – 8,2	8,2 – 9,3	9,3 – 13,3



Gambar 4.6. *Meshing and geometry*

4.2.8. Boundaries Condition

Setelah membuat *mesh block*, langkah selanjutnya membuat *boundaries condition*. *Boundary conditions* merupakan kondisi batas dalam pemodelan CFD-FLOW3D. Dalam tiap *mesh block* terdapat 6 *boundary condition*, yaitu X min, X max, Y min, Y max, Z min, Z max. Menu *boundaries condition* dapat dilihat pada gambar 4.7.

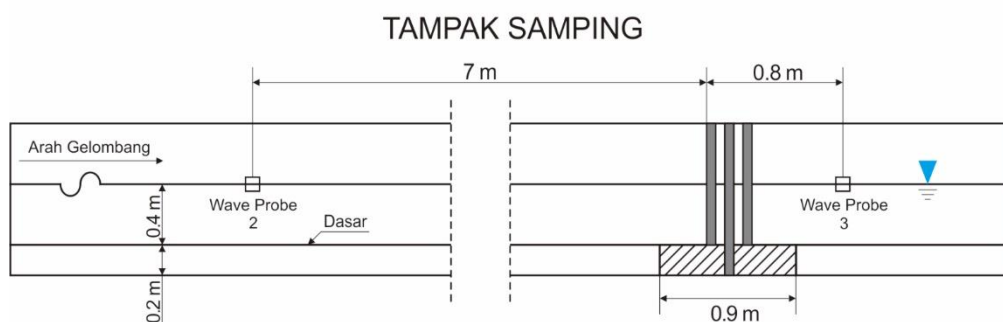


Gambar 4.7 *Boundary Condition*

Pada pemodelan ini terdapat beberapa *mesh block*. Tetapi untuk pemodelan bagian *flumena*, *boundary condition* yang digunakan pada sumbu X min yaitu *Wave*, X max yaitu *outflow* agar gelombang terus mengalir, Y min, Y max dan Z min adalah wall, sedangkan Z max adalah *symetri*.

4.2.9. Wave Probes

Wave probes digunakan untuk mengukur elevasi gelombang. Pada pemodelan ini *wave probes* dipasang berjumlah 2 buah. Letak *wave probe 2* yaitu 1,6 meter dari pembangkit gelombang dan *wave probe 3* diletakkan 9,4 meter dari pembangkit gelombang. Letak *wave probe* dapat dilihat pada gambar 4.8.

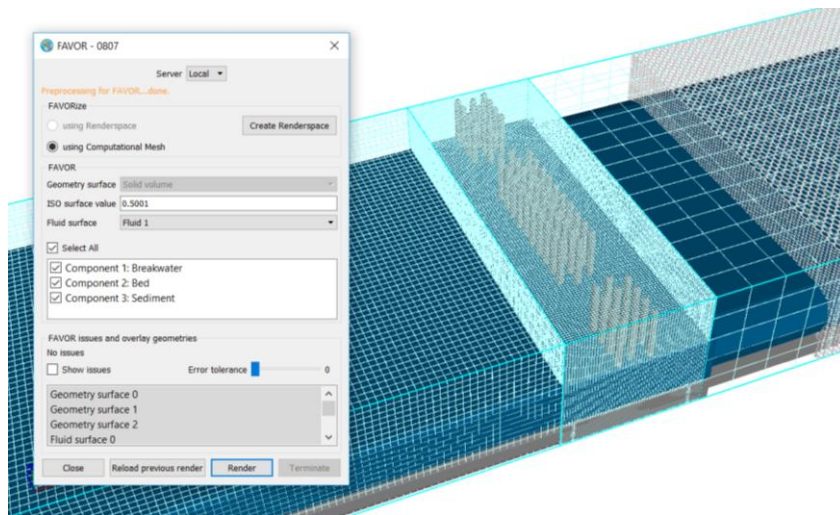


Gambar 4.8. Letak *wave probe* simulasi

4.2.10. Render Model

Pada tahap ini *render* dilakukan agar bisa melihat bagaimana hasil pemodelan setelah dilakukan *meshing*. Sebelum *running* model, *render* perlu dilakukan agar bisa tahu apakah *meshing* yang dibuat pada model sudah pas. Karena jika dalam pemodelan terdapat ukuran komponen yang kecil tetapi nilai *meshing*

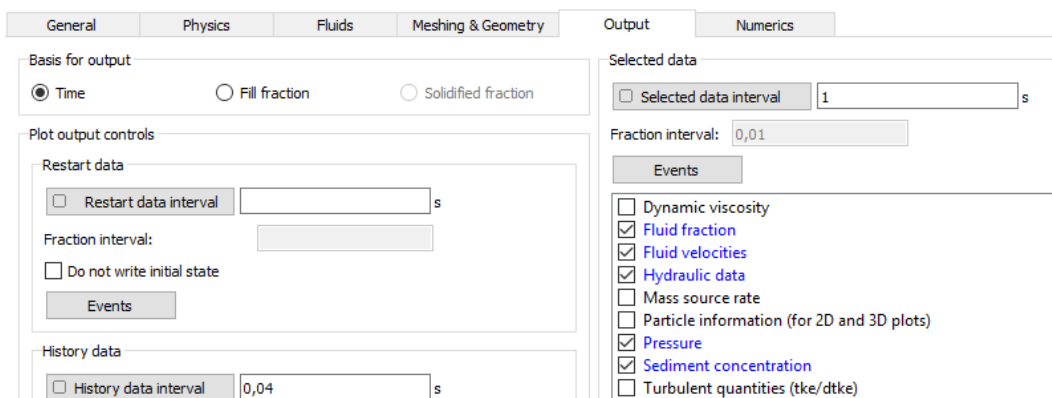
dibuat besar maka saat proses *render* akan terlihat komponen tersebut terbaca atau tidak. Gambar 4.9 merupakan hasil *render* model *flume tank*.



Gambar 4.9 Rendering Model

4.2.11. *Output Model*

Menu output model digunakan untuk mengatur interval waktu dalam proses *running* pemodelan serta untuk mencatat data pemodelan. Pada menu output juga dapat memilih event atau kejadian yang ingin ditunjukkan dalam proses *running* pemodelan. Gambar 4.10 menunjukkan pengaturan pada menu output pemodelan.



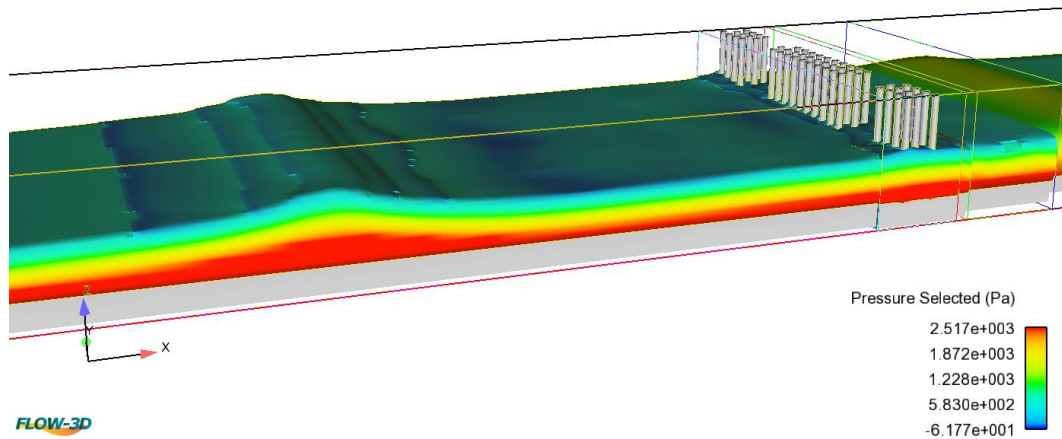
Gambar 4.10 Pengaturan *Output Model*

4.2.12. *Hasil Running Model*

Setelah memasukkan semua pengatauran yang diperlukan untuk pemodelan *scouring*, maka selanjutnya melakukan *running* model. Hasil dari *running* model

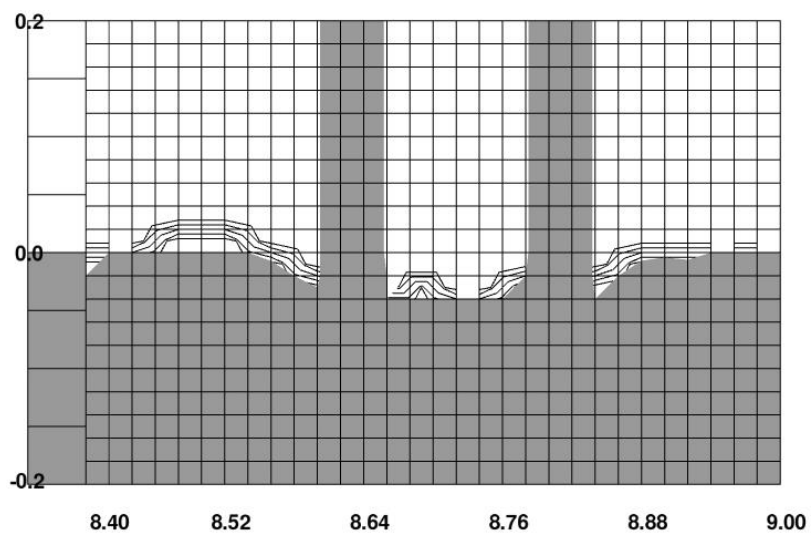
akan ditampilkan pada pemodelan *Flowsight*. Berikut gambar 4.11 adalah hasil *running* model yang telah dibuat pada CFD-FLOW3D.

Time = 25.999233



Gambar 4.11 Hasil *running* model pada *Flowsight*

Pada *Flowsight* model sudah bisa dilihat dengan jelas apakah terjadi *scouring* atau tidak. Tetapi *scouring* juga bisa dilihat pada CFD-FLOW3D di bagian *analyze*. Gambar model pada *analyze* dapat dilihat pada gambar 4.12 di bawah ini.

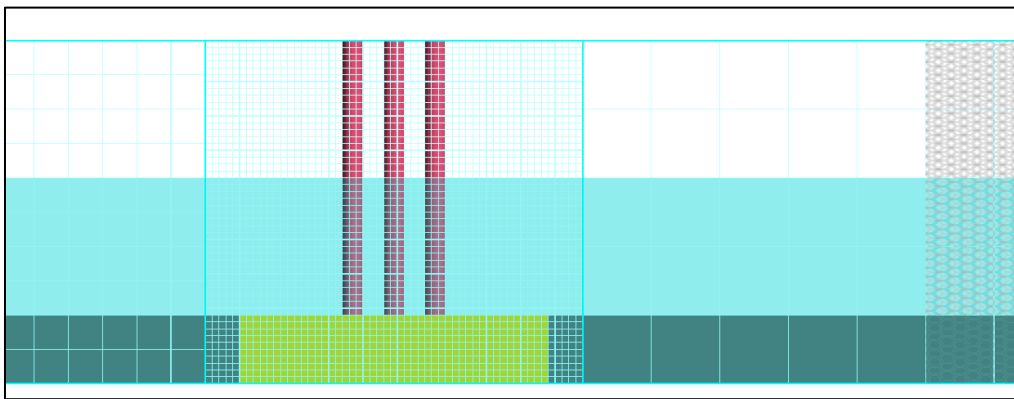


Gambar 4.12 Hasil *scouring* pemodelan

4.3. Validasi Model

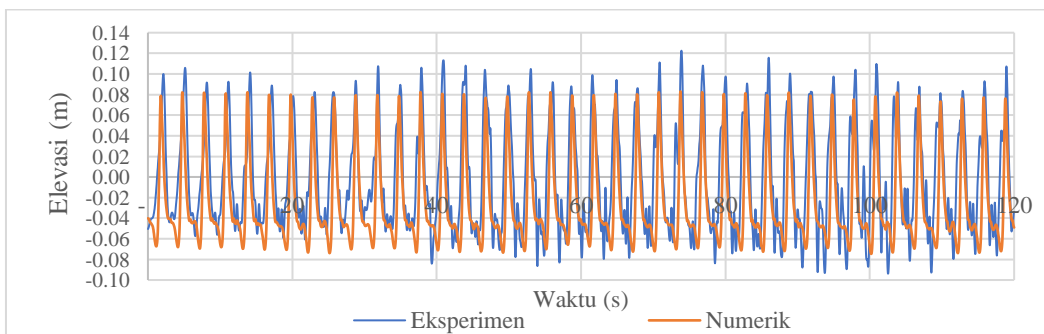
Validasi menggunakan skenario 2 ($b/D=1$ dan $B/D=0,5$). Validasi dilakukan dengan membandingkan tinggi gelombang rata-rata uji model fisik dengan uji numerik. Menggunakan tinggi gelombang rata-rata karena simulasi menggunakan gelombang reguler.

Input parameter pembangkit gelombang dilakukan secara teoritis menggunakan H_{avg} *wave probe* 1 dengan teori *Stokes and Cnoidal (Fourier Series Method)*. Ukuran *Meshing* diatur sedemikian hingga hasil simulasi mencapai *error* yang kecil.

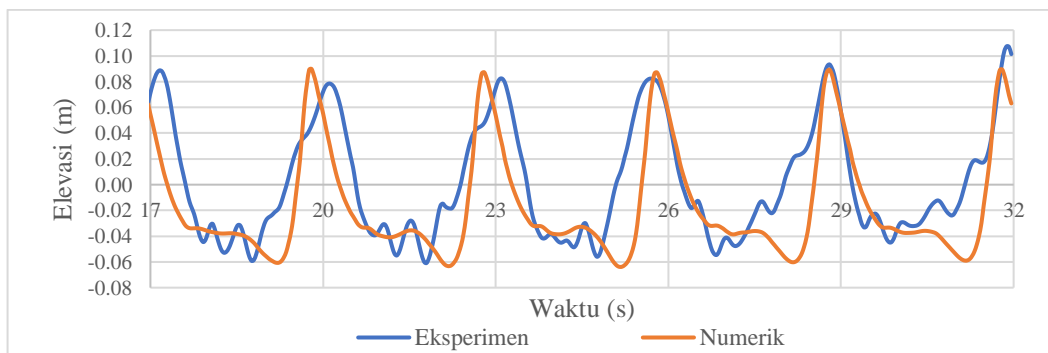


Gambar 4.13 Tampak Samping *Mesh* Pemodelan pada Perangkat Lunak CFD

Data *wave probe* 1 uji model fisik digunakan sebagai parameter pembangkit gelombang reguler dengan $H_{avg} = 0,1574$ m dan $T = 3$. Sedangkan *wave probe* yang divalidasi adalah *wave probe* 2 dan 3 dari eksperimen dengan toleransi *error* $< 15\%$. Gambar 4.14 merupakan perbandingan gelombang eksperimen dan numerik, sedangkan gambar 4.15 adalah sampel pola gelombang diambil pada periode 55 – 79 detik dari skenario Modul 3.



Gambar 4.14 Hasil validasi gelombang periode 0-120 detik.



Gambar 4.15 Hasil validasi gelombang periode 56-68 detik.

Software memodelkan gelombang sesuai parameter input bukan *time-series* namun secara teoritis. Hasilnya, bentuk gelombang yang dihasilkan menyerupai bentuk gelombang asli hasil eksperimen sebelum difilter. Karena filter bertujuan untuk mendapatkan bentuk gelombang yang diinginkan (sesuai rencana), maka dapat dikatakan bahwa program filter yang digunakan dinilai kurang mendekati bentuk gelombang yang diinginkan. Oleh karena itu validasi dilakukan terhadap gelombang asli hasil eksperimen yang tidak difilter agar hasil yang didapatkan dalam pemodelan numerik ini dapat menyerupai kondisi eksperimen.

Hasil yang didapatkan adalah bahwa persentase *error* nilai H_{avg} antara hasil eksperimen dengan pemodelan adalah sebesar 8 % pada *wave probe* 2 dan 6 % pada *wave probe* 3. Untuk detail pola gelombang yang terekam dapat dilihat pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15.

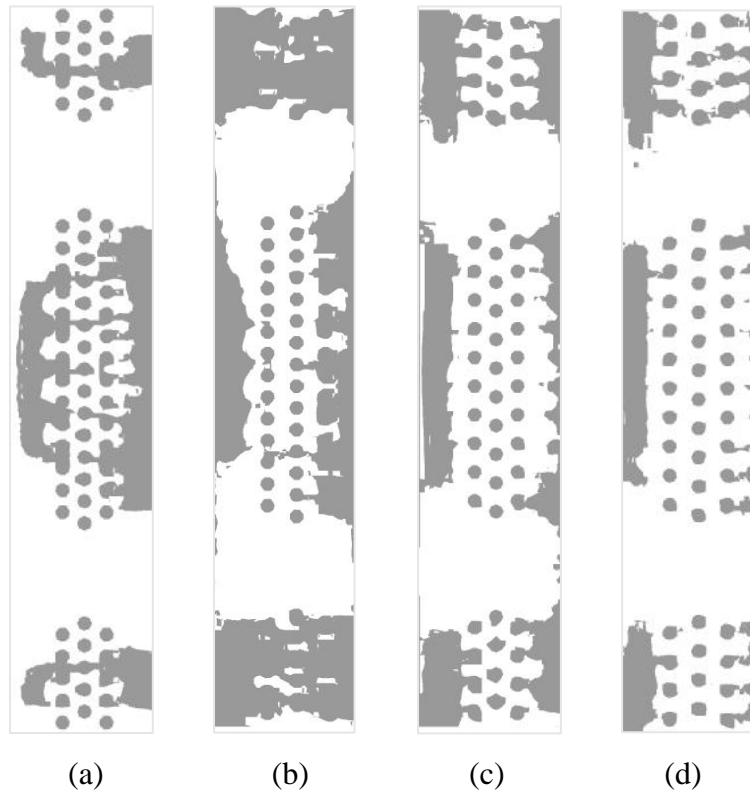
Tabel 4.5. Validasi karakteristik gelombang pemodelan numerik.

Wave Probe	Havg		Error
	Uji Fisik	Numerik	
2	0.1325	0.1217	8%
3	0.0705	0.0661	6%

4.4. Hasil Pemodelan *Scouring*

Selanjutnya adalah memodelkan menggunakan parameter yang sama seperti pada pemodelan untuk validasi. Model yang dibuat sebanyak 4 jenis, yaitu 2 variasi jarak baris antar tiang b/D (0,5; 1,0) dan 2 variasi jarak kolom antar tiang B/D (0,5; 1,0) dan jarak antar kelompok tiang (*gap*) 33 cm. Setelah semua variasi pemodelan disimulasikan selama 15 menit, selanjutnya mencatat hasil *scouring* menggunakan AutoCAD dan Microsoft Excel, sehingga didapatkan hasil *scouring* setelah 15 menit.

Analisa *Global Scour* dilakukan untuk melihat pengaruh adanya *Gap* antar kelompok tiang. Gambar 4.16 menunjukkan tampak atas area sedimen hasil pemodelan.



Gambar 4.16 Tampak Atas Area Sedimen Hasil Pemodelan (a) Modul 1 (b) Modul 2 (c) Modul 3 (d) Modul 4

Berikut adalah kedalaman *scouring* pada area *Gap* antar kelompok tiang, diambil pada bidang y 0,8 meter.

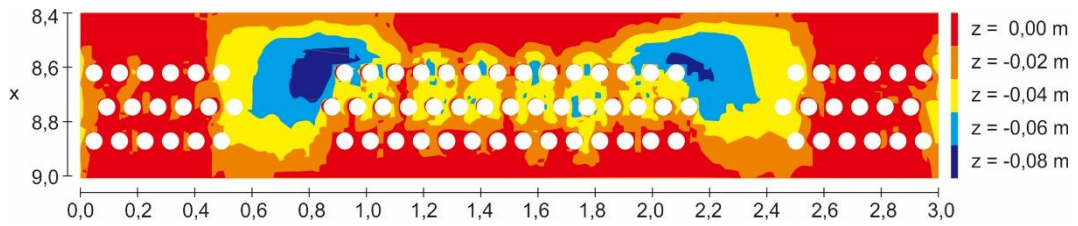
Tabel 4.6. Kedalaman *Scouring* *Gap*

Gap	Modul 1	Modul 2	Modul 3	Modul 4
S (m)	0.10	0.08	0.05	0.05
S/D	1.73	1.33	0.82	0.83

Scouring yang terjadi pada gap Modul 3 merupakan *scouring* terdalam dari seluruh skenario. Dalam hal ini bisa disimpulkan bahwa kedalaman *scouring* kecil terjadi jika B kecil dan b besar.

Selain *scouring* yang terjadi pada gap, perlu diteliti pula *scouring* lokal dari tiang pancang. Banyaknya jumlah tiang menjadi pertimbangan untuk mengambil satu irisan pada bidang y untuk meninjau kedalaman dan lebar *scouring* yang

terjadi. Dari gambar 4.17 dapat dilihat pola *scouring* yang mengelompok per 2 baris tiang.



Gambar 4.17 Pola *Scouring* tampak atas Modul 2

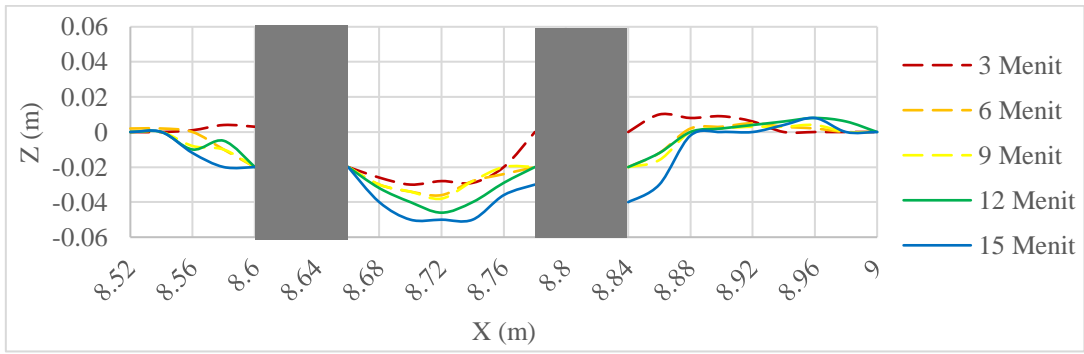
Maka dari itu potongan y yang diambil adalah pada jarak $y=1,5+0,5(D+b)$. Kedalaman *scouring* diambil pada irisan x tiang paling tengah. Sedangkan lebar *scouring* merupakan jarak dari titik tengah tiang belakang hingga titik terjauh *scouring*. Setelah dihitung menggunakan AutoCAD, didapatkan hasil yang dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.7. Hasil Pemodelan *Scouring* saat T=15 menit

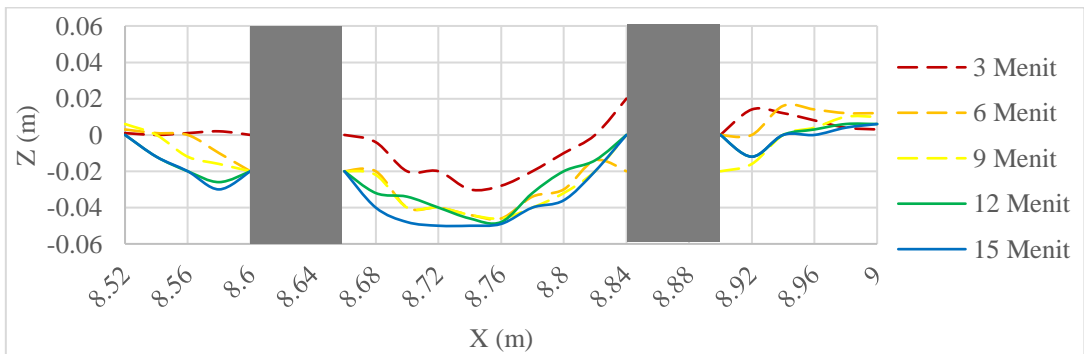
Modul	b/D	B/D	S (m)	S/D	W (m)	W/D
1	0,5	0,5	0,050	0,83	0,11	1,8
2	0,5	1,0	0,050	0,83	0,09	1,2
3	1,0	0,5	0,040	0,67	0,09	1,5
4	1,0	1,0	0,047	0,78	0,09	1,5

Hasil *scouring* pada tabel 4.6 menunjukkan bahwa pada pemodelan *scouring* dengan jarak antar tiang diperoleh hasil bahwa semakin kecil jarak antar baris tiang (b/D) maka kedalaman *scouring* semakin besar. Kedalaman *scouring* terbesar terjadi pada b/D kecil. Namun lebar *scouring* terbesar terjadi pada b/D besar dan B/D kecil.

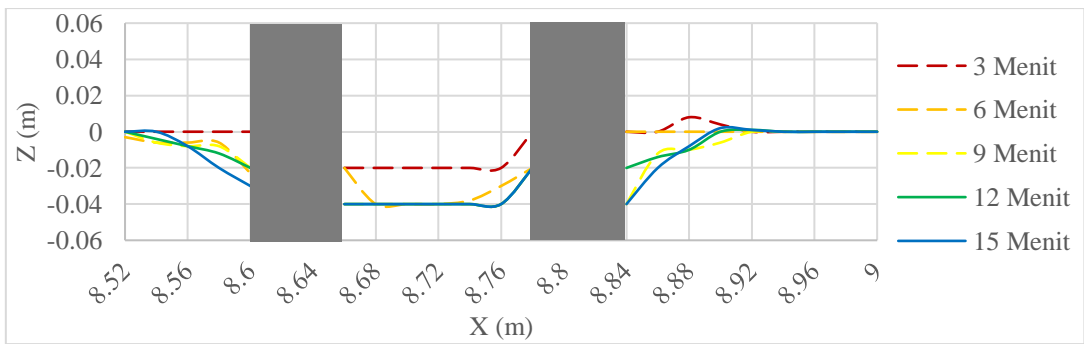
Setelah didapatkan hasil *scouring* untuk 4 variasi T = 15 menit, maka selanjutnya adalah melakukan plot perubahan pola *scouring* setiap 3 menit dari 15 menit waktu pemodelan dalam bentuk grafik pada gambar 4.18.



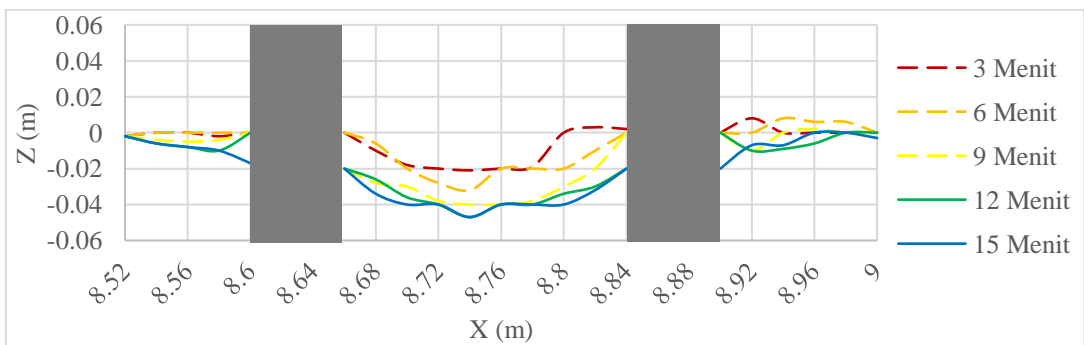
(a)



(b)



(c)

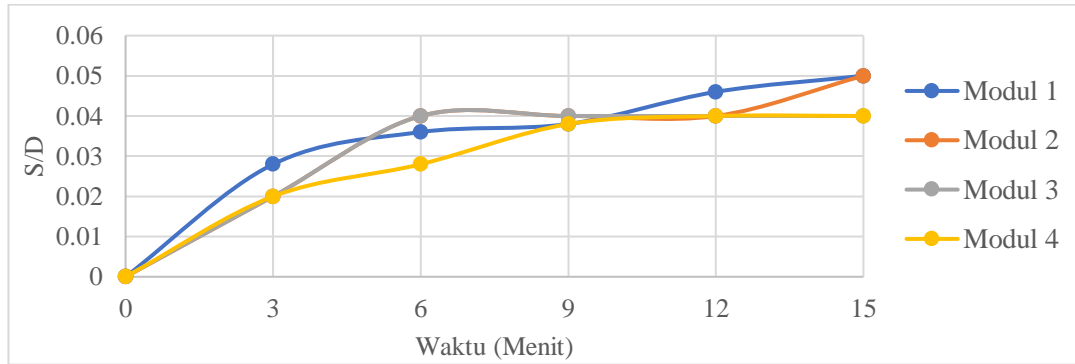


(d)

Gambar 4.18 Grafik Profil 2D (a) Modul 1 (b) Modul 2 (c) Modul 3 (d) Modul 4

Setelah mengetahui grafik profil 2D *scouring* setiap 3 menit pada variasi jarak antar tiang pancang, kemudian dibuat

Untuk grafik laju propagasi terhadap kedalaman *scouring* seluruh variasi dapat dilihat pada gambar 4.19.



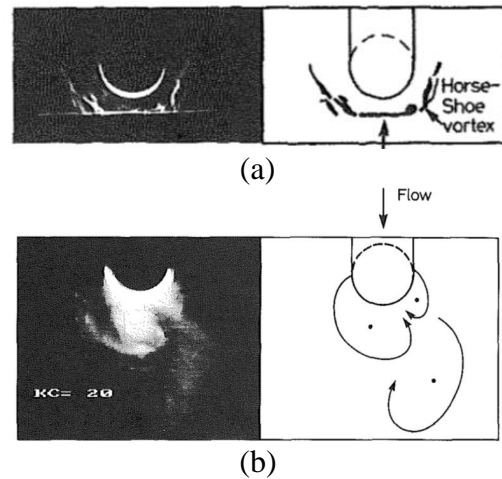
Gambar 4.19. Grafik laju propagasi *scouring*

Pada grafik di atas dapat dilihat bahwa propagasi kedalaman *scouring* terbesar terjadi pada 3 menit pertama, kemudian pada kisaran 6–15 menit kedalaman *scouring* tidak terlalu mengalami perubahan yang signifikan. Serta pada gambar di atas juga terlihat bahwa modul 1 dan 2 memiliki kedalaman *scouring* terbesar.

Shields Number seluruh skenario berdasarkan persamaan 2.8 didapat nilai sebesar 0,52, sedangkan *critical shields number* dari persamaan 2.14 didapat nilai sebesar 0,04. Dengan *shields number* lebih besar dari nilai kritisnya, $\theta > \theta_{cr}$, maka dipastikan gerusan yang terjadi adalah *live bed scour*. Gerusan jenis ini menyebabkan sedimen tersebar luas pada dasar perairan. Dari hasil pemodelan terlihat riak pada area sedimen yang menunjukkan terjadinya *live bed scour*.

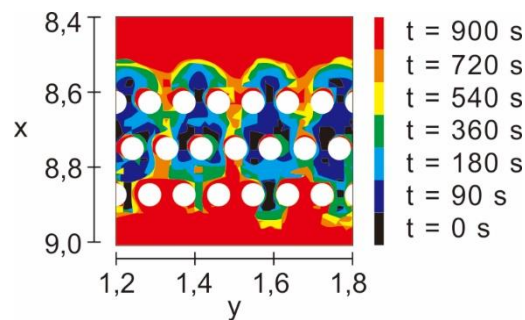
Kedalaman *scouring* berdasarkan persamaan 2.19 didapat nilai S/D sebesar 0,53, sehingga kedalaman *scouring* S sebesar 0,032 m. Sedangkan untuk lebar *scouring* dari persamaan 2.20 didapat nilai W/D sebesar 2,72 sehingga lebar *scouring* yang terjadi sebesar 0,16 m. Kedua nilai ini lebih kecil dibandingkan dengan hasil eksperimen. Lebih besarnya nilai pada hasil eksperimen disebabkan oleh interaksi antar tiang.

Nilai KC sangat menentukan dimensi *scouring* yang terjadi. Dari persamaan 2.18 didapat nilai KC sebesar 23,45. Sumer et. Al. (1992) menangkap gambar *horseshoe vortex* dan *vortex shedding* dari eksperimen untuk $KC=20$.



Gambar 4.20 Foto *scouring* tampak atas untuk $KC = 20$ (a) *horseshoe vortex* (b) *vortex shedding*. (Sumer et al. (1992))

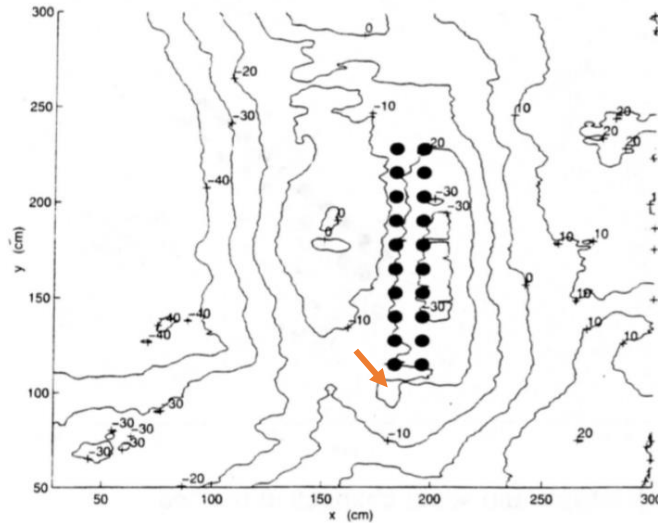
Dari foto di atas terlihat bahwa pusaran yang terjadi di kedua sisi tiang memiliki nilai yang berbeda. Pada satu buah tiang, satu sisi mengalami pusaran yang lebih besar dari pada sisi lainnya. Sedangkan dalam pemodelan, *horseshoe vortex* dan *vortex shedding* terpengaruh oleh interaksi antar tiang. Kedua pusaran tersebut cenderung mengelompok per dua baris tiang.



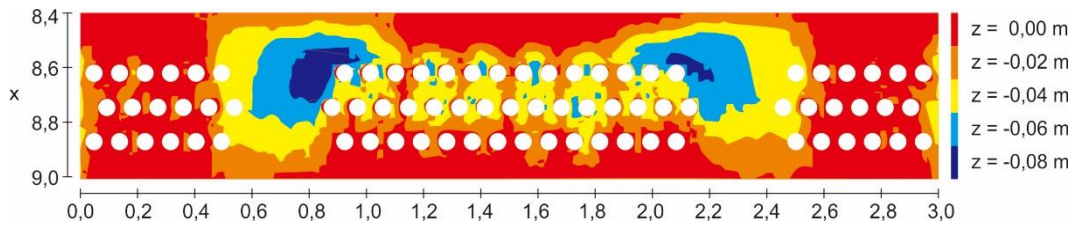
Gambar 4.21 *Horseshoe vortex* dan *vortex shedding*

Carreiras et. al. (2001) menunjukkan pengaruh kelompok tiang terhadap *scouring*. Hasilnya, terjadi *scouring* yang lebih besar dari *scouring* lokal, yang terlihat di ujung susunan tiang seperti ditunjukkan dengan panah pada gambar 4.22 Hal ini membenarkan hasil simulasi yang menunjukkan pola khas yang terjadi pada ujung-ujung kelompok tiang bagian tengah. Gerusan ini disebabkan oleh akumulasi pola aliran yang mengenai susunan *breakwater* tiang pancang sebagai satu

kesatuan, seperti yang ditemukan oleh Ataie-Ashtiani dan Beheshti (2006). Mereka menemukan bahwa jarak antar tiang kurang dari 1,15 diameter, kelompok tiang berperilaku sebagai satu tubuh. Akibatnya terjadi gerusan yang lebih besar dari *scouring* lokal.



Gambar 4.22 Perubahan morfologi pada slope 1:40 dengan $Gap/D=1$ (Carreiras et. al., 2001)



Gambar 4.23 Hasil Pemodelan Modul 3 ($b/D=0,5; B/D=0,5$) pada menit 15.

Dari gambar 4.23 dapat dilihat bahwa tiang di ujung depan mengalami pengurangan kedalaman pondasi sebesar 8 cm di hulu dan sebesar 4 cm di hilir. Dengan skala 1:10 maka kedalaman *scouring* 80 cm di hulu dan 40 cm di hilir.

Tabel 4.8. Prediksi dimensi *scouring* kondisi riil

Modul	b/D	B/D	Local Scour		Gap
			S (m)	W (m)	S (m)
1	0,5	0,5	0,50	1,1	1,0
2	0,5	1,0	0,50	0,9	0,8
3	1,0	0,5	0,40	0,9	0,5
4	1,0	1,0	0,47	0,9	0,5

Scouring menyebabkan material dasar terangkat dan terbawa hingga beberapa diameter dari struktur tiang pancang. Kedalaman *scouring* akan mencapai maksimal ketika tegangan geser tanah berkurang, yaitu ketika kecepatan partikel dasar um menurun akibat bertambahnya kedalaman air. Kedalaman *scouring* pada sisi struktur ini akan mengurangi kedalaman pondasi struktur. Dengan berkurangnya kedalaman pondasi maka daya dukung tanah lateral berkurang. Dalam kasus beban gelombang, arah pembebanan adalah horizontal. Daya dukung tanah lateral yang kecil memiliki andil dalam kegagalan struktur.

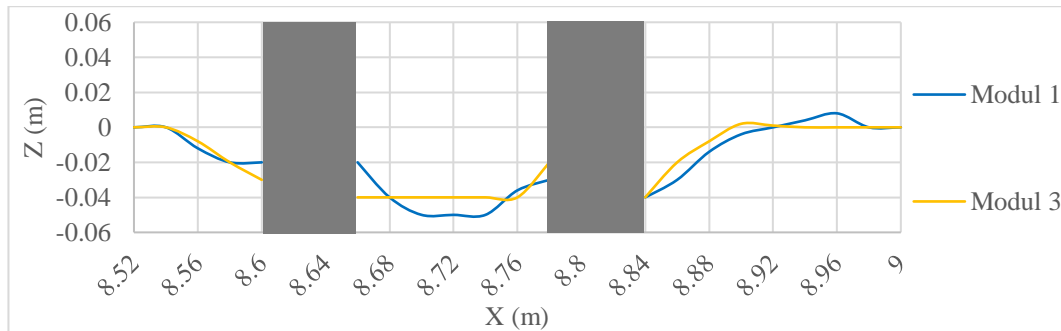
Pengurangan kedalaman pondasi yang kecil berarti daya dukung tanah lateral yang berkurang juga kecil, maka dari itu modul dengan kedalaman *scouring* terkecil adalah modul yang *reasonable* untuk diterapkan dalam pembangunan *breakwater* tiang pancang. Skenario tersebut dipilih karena kemungkinan kegagalan strukturnya kecil.

Sayed et. al. dalam penelitiannya membahas *scouring* sebagai fenomena rumit yang tidak dapat diprediksi hanya dengan pengujian dan perhitungan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan praktis berdasarkan “*Sound Engineering Judgment*” dalam mengatasi dampak gerusan pada suatu struktur. Pendekatan ini harus didasarkan pada kewajaran dari kedalaman gerusan yang diprediksi yang dilakukan bersama oleh insinyur hidrolis, geoteknik, dan struktural (konsultan dan staf pemilik) yang bekerja pada proyek. Pendekatan semacam itu sangat memungkinkan dan hemat biaya bagi para pemangku kepentingan.

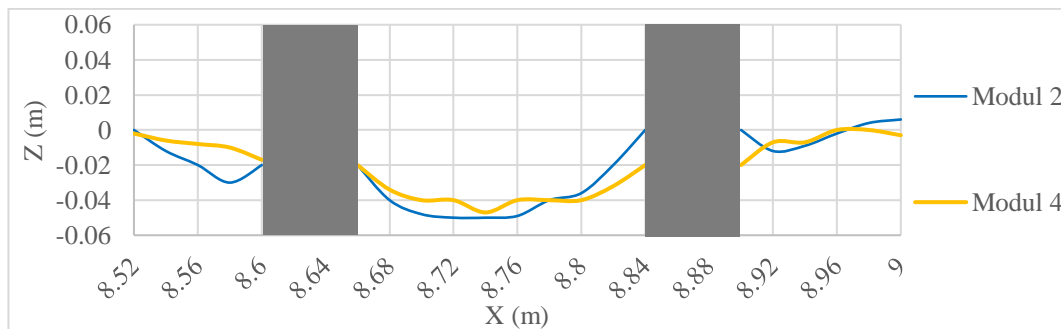
4.5. Analisis Hubungan *Scouring* dengan Parameter Tak Berdimensi

Analisis hubungan *scouring* dengan parameter tak berdimensi bertujuan untuk mempresentasikan data hasil kedalaman dan lebar *scouring*. Data hasil *scouring* akan dihubungkan dengan parameter-parameter tersebut terhadap bilangan non dimensial kedalaman (S/D) dan lebar (W/D) *scouring*. Parameter tak berdimensi yang digunakan yaitu *Column-to-Diameter Ratio* (B/D) dan *Row-to-Diameter Ratio* (b/D). Grafik perbandingan antar variasi jarak antar tiang pancang dapat digunakan untuk melihat perbedaan tiap variasi terhadap kedalaman dan lebar *scouring* yang dapat dilihat pada gambar 4.24 dan 4.25. Gambar 4.26 dan 4.27 akan

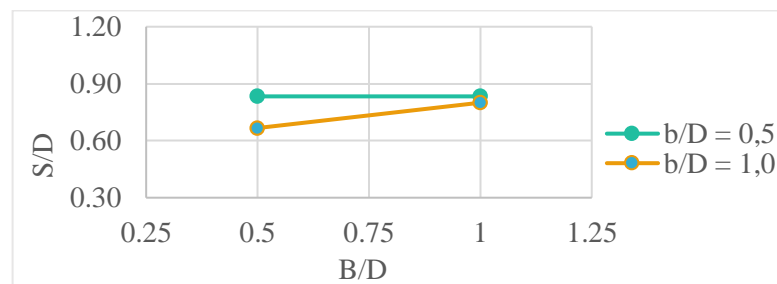
ditunjukkan hubungan parameter tak berdimensi b/D dan B/D dengan kedalaman *scouring* pada *breakwater* tiang pancang.



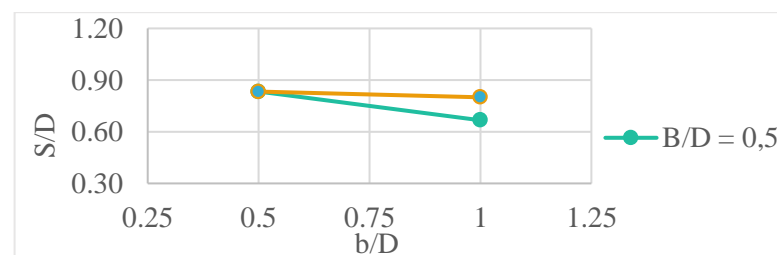
Gambar 4.24 Grafik perbandingan *scouring* ($B/D=0,5$)



Gambar 4.25 Grafik perbandingan *scouring* ($B/D=0,1$)



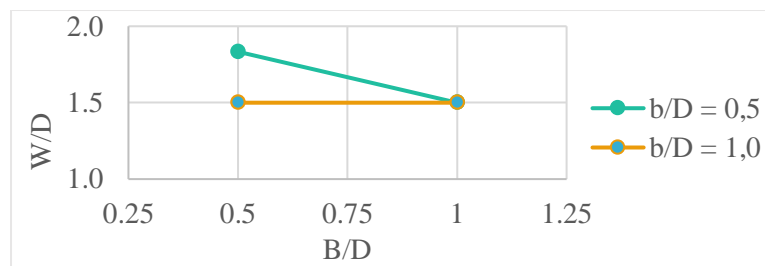
Gambar 4.26 Grafik hubungan b/D dengan kedalaman *scouring* (S/D) tiang pancang



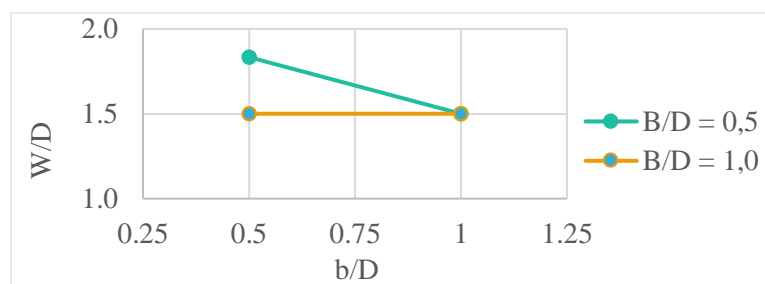
Gambar 4.27 Grafik hubungan B/D dengan kedalaman *scouring* (S/D) tiang pancang

Berdasarkan grafik di atas dapat disimpulkan bahwa *Scouring* terdalam terjadi pada b/D 0,5. Semakin kecil b/D (rapat) maka *scouring* lokal semakin dalam. Hannah (1978) dalam eksperimennya menemukan bahwa jumlah struktur (tiang) yang normal terhadap arah aliran semakin banyak semakin memperdalam gerusan. Hal tersebut mendukung hasil pemodelan pada gambar 4.27 di atas, sebab modul dengan b/D sebesar 0,5 memiliki jumlah tiang normal terhadap aliran yang lebih banyak daripada modul dengan b/D 1,0. Namun Hannah (1978) juga menemukan bahwa jumlah struktur (tiang) searah aliran memberikan pengaruh minor terhadap kedalaman *scouring*.

Pada gambar 4.28 dan 4.29 ditunjukkan hubungan parameter tak berdimensi b/D dan B/D dengan lebar *scouring* pada *breakwater* tiang pancang.



Gambar 4.28 Grafik hubungan b/D dengan lebar *scouring* (W/D) tiang pancang



Gambar 4.29 Grafik hubungan B/D dengan lebar *scouring* (W/D) tiang pancang

Dari grafik di atas dapat disimpulkan bahwa *scouring* terlebar terjadi pada b/D 0,5 dan B/D 0,5. Semakin kecil b/D dan B/D (rapat) maka *scouring* lokal semakin lebar. Imran (2013) dalam kesimpulan penelitiannya mengatakan bahwa jarak antar tiang sangat berpengaruh terhadap besaran gerusan, semakin rapat jarak antar tiang semakin besar gerusan yang terjadi. Keberadaan pilar mengakibatkan terjadinya penumpukan tekanan di hulu pilar sehingga terjadi aliran bawah

sepanjang sisi hulu pilar dan terjadi pusaran tapal kuda (*horseshoe vortex*) di sekitar pilar. Besarnya gerusan yang terjadi pada jarak yang rapat antar tiang disebabkan oleh besarnya tekanan pada celah yang rapat antar tiang. Sehingga tegangan geser dasar semakin besar, yang menyebabkan gerusan semakin besar.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan hasil pemodelan *scouring* pada *breakwater* tiang pancang akibat gelombang reguler dengan variasi jarak relatif antar tiang, dapat disimpulkan:

1. Karakteristik gelombang hasil eksperimen skenario Modul 2 ($b/D=0,5; B/D=1,0$), H_{avg} *wave probe* depan 0.1325 m, H_{avg} *wave probe* belakang 0.0705 m. Sedangkan hasil pemodelan numerik H_{avg} *wave probe* depan 0.1217 m, H_{avg} *wave probe* belakang 0.0661 m. Validasi karakteristik gelombang menunjukkan *error wave probe* depan 8% dan *wave probe* belakang 6%.
2. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kedalaman *scouring* gap terbesar terjadi pada Modul 1 ($b/D=0,5; b/D=0,5$) dengan kedalaman 10 cm. *Scouring* lokal terdalam terjadi pada Modul 1 ($b/D=0,5; B/D=0,5$) dan Modul 2 ($b/D=0,5; B/D=1,0$) sebesar 5 cm. Lebar *scouring* terbesar terjadi pada Modul 1 ($b/D=0,5; B/D=0,5$) sebesar 11 cm ke arah hilir. Hasil analisis nilai kedalaman, lebar *scouring* dengan parameter tak berdimensi *Column-to-Diameter Ratio* (B/D) dan *Row-to-Diameter Ratio* (b/D), dapat disimpulkan bahwa semakin kecil jarak antar tiang maka semakin dalam gerusan yang terjadi. Untuk laju propagasi pada 3 menit pertama *scouring* sudah menunjukkan hasil yang besar dan pada kisaran waktu 6-15 menit laju propagasi *scouring* tidak mengalami penambahan yang signifikan.

5.2. Saran

Setelah pemodelan dilakukan, terdapat saran penulis untuk penelitian selanjutnya tentang *scouring* adalah:

1. Pemodelan numerik menggunakan *software* CFD sebaiknya menggunakan grid model (*meshing*) yang rapat, namun sederhana. Tumpukan *Mesh Block* berpengaruh pada *time-step* simulasi. Sehingga, *meshing* perlu dibuat secara teliti.
2. Dari hasil pemodelan *scouring*, untuk menghindari kegagalan struktur akibat *scouring* maka perlu dirancang jarak kolom yang besar karena hasil pemodelan menunjukkan bahwa jarak kolom yang besar menghasilkan kedalaman *scouring* yang paling kecil.
3. Perlu dilakukan penelitian mengenai *scouring* pada *breakwater* dengan variasi lain, seperti jenis sedimen, jarak gap antar kelompok tiang pancang, dan lain sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ataie-Ashtiani, B. dan Beheshti, A. A. 2006. **Experimental Investigation of Clear-Water Local Scour at Pile Groups**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 10.
- Carreiras, Jose & Larroudé, Philippe & Santos, Fernando & Mory, Mathieu. (2001). **Wave Scour Around Piles**. Proceedings of The International Conference Coastal Structures '99 Santander/Spain
- CERC. 1984. **Shore Protection Manual (SPM)**. Washington DC: Department of The Army, US Army Corps of Engineers.
- CERC. 2002. **Coastal Engineering Manual (CEM)**. Washington DC: Department of The Army, US Army Corps of Engineers.
- Hamid, A. dan Danial, M. 2016. "Kegagalan Bangunan Pelindung Pantai (Studi Kasus di Wilayah Pantai Utara Kalimantan Barat)". **Seminar Nasional II Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi**. Pontianak. Universitas Tanjungpura.
- Hannah, C. R. 1978. **Scour at Pile Groups**. MSc Thesis. University of Canterbury. Christchurch, New Zealand.
- Hesten, P., 2011. **Scour Around Wind Turbine Foundations, Marine Pipelines and Short Cylinders Due to Long-Crested and Short-Crested Nonlinear Random Waves Plus Currents**. Master Thesis at Marin Teknisk, NTNU.
- Imran, H. 2013. **Studi Pengaruh Kelompok Tiang Terhadap Gerusan**. Tesis Program Studi Teknik Sipil Universitas Hasanuddin Makassar.
- Koftis, Theoharris, Panayotis Prinos and Michael Aftias. 2012. Experimental Study of a Multiple-Row Pile Breakwater. Conference: 4th **Int. Conf. on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection**

- Myrhaug, D., Holmedal, L. E., Simmons, R. R., and MacIver, R. D. 2001. **Bottom friction in random waves plus current.**
- Hidayati, Nurin. 2017. **Dinamika Pantai.** Malang. UB Press.
- Jin Won Kim, Dae Soo Lee & Jong Hyun Kim. 2001. **A Hydraulic Model Study of Intake Structure.** Nuclear Technology. 134:1, 15-22
- Ping, F. 2014. **Scour Below Pipelines and Around Vertical Piles Due to Random Waves Plus Current on Mild Slopes.** Master Thesis. Dept. of Marine Tech. NTNU Trondheim.
- Sayed S. M., Sunna H. N., Amaning K. O., Jetha N. K., Garcia J. 2009. **Stability Assesment of Bridges Impacted by Scour.** Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Sumer, B. Mutlu, dan J, Fredsøe. 1990. **Scour Below Pipelines in Waves.** Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 116 : 307-323.
- Sumer, B. M., Christiansen, N., and Fredsøe, J. 1992. **Scour Around Vertical Pile in Waves.** Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.
- Sumer, B. M., Christiansen, N., and Fredsøe, J. 1997. **Horseshoe Vortex and Vortex Shedding Around a Vertical Wall-Mounted Cylinder Exposed to Waves.** Journal of Fluid Mechanics
- Sumer, B. Mutlu, dan J, Fredsøe. 2002. **The Mechanics of Scour in The Marine Environment.** World Scientific: Denmark.
- Triatmodjo, B. 1999. **Teknik Pantai.** Yogyakarta.
- Mustafa, E. Y., and Agamy, F., A. 2011. **Scour Around Single Pile and Pile Groups Subjected to Waves and Currents.** International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST).
- Zhu, D. 2011. **Hydrodynamics characteristics of a single-row pile breakwater.** Journal of Coastal Engineering, Vol.58 : 446-451. doi : 10.1016

LAMPIRAN A

PROGRAM FILTRIMWAVESTAT

Berikut adalah skrip yang digunakan oleh Balai Pantai:

```
%Skrip Trimming, Filter dan Hitung WAVESTAT
%by Eduardo Meyrianso Simanjuntak
%Experimental Station Coastal for Engineering

%%Baca data
xl_file = 'SN101_0210_M3N2b_h20_t30_d60_181002112726_tms.csv';

Fs = 25; %frekuensi data

probe= xlsread(xl_file);
time = 0:1/Fs:180;

%% Trimming

t_cutoff = 30; % detik (awal dan akhir sama)
tn_cutoff = t_cutoff*25;

probe = probe(tn_cutoff:end-tn_cutoff,:);
time = time(tn_cutoff+1:end-tn_cutoff);
time =transpose(time);

%Output Trimming

xlswrite(['trimSN101_0210_M3N2b_h20_t30_d60_181002112726_tms.xlsx'
l,probe)

%Perhitungan wavestat untuk data yang ditrim
nprobe=8
for l=1:nprobe

elv= probe;

panjang = length(elv);

%untuk wave probe 1
elevasi(:, :) = elv(:,1); %Ganti menjadi elv(:,3) untuk wave probe
3

% Frequency sampling
% Fs = 1/25;
% t = Fs:Fspanjang*Fs;
% time = transpose(t);

D = [time,elevasi];
D(:,2)=D(:,2)-mean(D(:,2))
iD=find(diff(sign(D(:,2))))==2;%zero-upcrossing
%iD=find(diff(sign(D(:,2))))==-2;%zero-downcrossing
```



```

for k=1:length(iD)-1;
Heights(k)=max(D(iD(k):iD(k+1),2))-min(D(iD(k):iD(k+1),2));
Periods(k)=max(D(iD(k):iD(k+1),1))-min(D(iD(k):iD(k+1),1));
end

% Output Wave.txt
fName = 'datwaves_trimmed.txt';
fid = fopen(fName,'w');
for i = 1:length(iD)-1
    fprintf(fid, '%s\n', [num2str(Heights(i), '%10.4f') ' '
num2str(Periods(i), '%10.4f')]);
end
fclose(fid);

wave = load('-ascii' , 'datwaves_trimmed.txt');

ndata = length(wave);
nd = [ ndata, ndata/2, ndata/3, ndata/10 ];
for kon = 2 : 4
    if ( round( nd(1,kon) ) - nd(1,kon) ) ~= 0
        nd(1,kon) =floor(nd(1,kon));
    end
end

waves = sort(wave(:,1));
periods = wave(:,2);
hmax = max(waves);
hmin = min (waves);
tmax = periods(1,1);

con = 1;
while con ~= nd(1,1) + 1
    wavescuad(con,1) = waves(con,1) ^ 2;
    con = con + 1;
end

sumahw = 0;
sumat = 0;
sumahwcuad = 0;

for cont = 1 : 4
    for i=1 : nd(1,cont)
        sumahw = sumahw + waves(i,1);
        sumahwcuad = sumahwcuad + wavescuad(i,1) ;
        sumat = sumat + periods(i,1);
    end
    if cont == 1
        haverage = ( 1 / nd(1,1) ) * sumahw;
        taverage = ( 1 / nd(1,1) ) * sumat;
        hrms = sqrt( ( 1 / nd(1,1) ) * sumahwcuad );
    elseif cont ==2
        hhalf = ( 2 / nd(1,1) ) * sumahw;
        thalf = ( 2 / nd(1,1) ) * sumat;
    elseif cont == 3
        hs = ( 3 / nd(1,1) ) * ( sumahw + ( ( 1 / 3 ) *
waves(nd(1,3)+1,1) ) );
    end
end

```

```

                ts = ( 3 / nd(1,1) ) * ( sumat + ( ( 1 / 3 ) *
periods(nd(1,3)+1,1) ) );
                elseif cont == 4
                    h10 = ( 10 / nd(1,1) ) * ( sumahw + ( 0.4 *
waves(nd(1,4)+1,1) ) );
                    t10 = ( 10 / nd(1,1) ) * ( sumat + ( 0.4 *
periods(nd(1,4)+1,1) ) );
                end
                sumahw = 0;
                sumat = 0;
end

% h100 = (100 / nd(1,1) ) * (waves(1,1) + ( 0.54 * waves(2,1) ) );
% t100 = (100 / nd(1,1) ) * (periods(1,1) + ( 0.54 * periods(2,1)
) );

Hmax(1,1) = hmax;
Hmin(1,1) = hmin;
Hs(1,1) = hs;
Ts(1,1) = ts;

end

fName = 'WAVESTAT_TRIMMED.txt';
fid = fopen(fName, 'w');
% fprintf(fid, '%s\n', 'Hmax[m]  Hmin[m]  H1/3[m]      T1/3[m]');
    for l=1:nprobe
        fprintf(fid, '%s\n', [num2str(Hmax(l,1), '%10.4f') '
num2str(Hmin(l,1), '%10.4f') '
' num2str(Hs(l,1), '%10.4f')
' num2str(Ts(l,1), '%10.4f')]);
    end
fclose(fid);

%% Filtering

Tper = 3; % Ganti Tper sesuai T pada skenario

filtH = (1/Tper)*1.5;
filtL = (1/Tper)-(filtH-(1/Tper))

% Metode yang digunakan adalah bandpass filter
d = fdesign.bandpass('N,F3dB1,F3dB2',10,filtL,filtH,Fs);
Hd = design(d, 'butter');

    for n=1:8
        wpfilts(:,n) = filter(Hd,probe(:,n));
    end

%%Output

xlswrite(['filtSN101_0210_M3N2b_h20_t30_d60_181002112726_tms.xlsx'
],wpfilts)

%Perhitungan Wavestat Data yang sudah ditrim dan difilter
nprobe=8
for l=1:nprobe

```

```

elv= wpfilts;

panjang = length(elv);

%untuk wave probe 1
elevasi(:, :) = elv(:,1);

D = [time,elevasi];
D(:,2)=D(:,2)-mean(D(:,2))
iD=find(diff(sign(D(:,2))))==2;%zero-upcrossing
%iD=find(diff(sign(D(:,2))))==-2;%zero-downcrossing

for k=1:length(iD)-1;
Heights(k)=max(D(iD(k):iD(k+1),2))-min(D(iD(k):iD(k+1),2));
Periods(k)=max(D(iD(k):iD(k+1),1))-min(D(iD(k):iD(k+1),1));
end

% Output Wave.txt
fName = 'datwaves_trimmed_filtered.txt';
fid = fopen(fName,'w');
for i = 1:length(iD)-1
    fprintf(fid, '%s\n', [num2str(Heights(i), '%10.4f') ' '
num2str(Periods(i), '%10.4f')]);
end
fclose(fid);

wave2 = load('-ascii' , 'datwaves_trimmed_filtered.txt');

ndata = length(wave2);
nd = [ ndata, ndata/2, ndata/3, ndata/10 ];
for kon = 2 : 4
    if ( round( nd(1,kon) ) - nd(1,kon) ) ~= 0
        nd(1,kon) =floor(nd(1,kon));
    end
end

waves2 = sort(wave2(:,1));
periods = wave2(:,2);
hmax2 = max(waves2);
hmin2 = min(waves2);
tmax = periods(1,1);

con = 1;
while con ~= nd(1,1) + 1
    wavescuad(con,1) = waves2(con,1) ^ 2;
    con = con + 1;
end

sumahw = 0;
sumat = 0;
sumahwcuad = 0;

for cont = 1 : 4
    for i=1 : nd(1,cont)
        sumahw = sumahw + waves2(i,1);
    end
end

```

```

        sumahwcuaad = sumahwcuaad + wavescuaad(i,1) ;
        sumat = sumat + periods(i,1);
    end
    if cont == 1
        haverage = ( 1 / nd(1,1) ) * sumahw;
        taverage = ( 1 / nd(1,1) ) * sumat;
        hrms = sqrt( ( 1 / nd(1,1) ) * sumahwcuaad );
        elseif cont ==2
            hhalf = ( 2 / nd(1,1) ) * sumahw;
            thalf = ( 2 / nd(1,1) ) * sumat;
        elseif cont == 3
            hs2 = ( 3 / nd(1,1) ) * ( sumahw + ( ( 1 / 3 ) *
waves2(nd(1,3)+1,1) ) );
            ts2 = ( 3 / nd(1,1) ) * ( sumat + ( ( 1 / 3 ) *
periods(nd(1,3)+1,1) ) );
        elseif cont == 4
            h10 = ( 10 / nd(1,1) ) * ( sumahw + ( 0.4 *
waves2(nd(1,4)+1,1) ) );
            t10 = ( 10 / nd(1,1) ) * ( sumat + ( 0.4 *
periods(nd(1,4)+1,1) ) );
        end
        sumahw = 0;
        sumat = 0;
    end

Hmax(1,1) = hmax;
Hmin(1,1) = hmin;
Haverage(1,1) = haverage;
Hs(1,1) = hs;
Taverage(1,1) = taverage;
Ts(1,1) = ts;
end

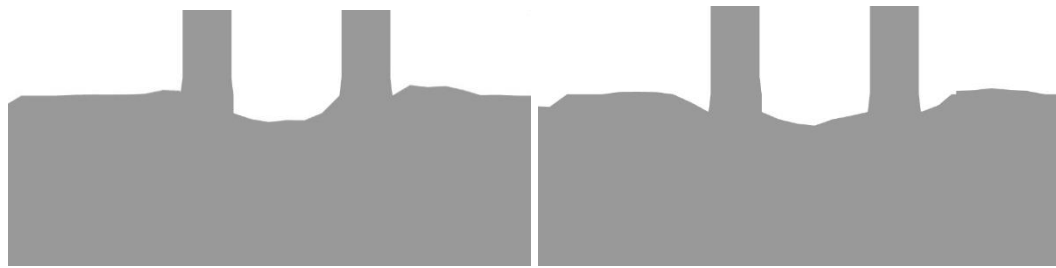
fName = 'WAVESTAT_TRIMMED_FILTERED.txt';
fid = fopen(fName,'w');
fprintf(fid,'%s\n','Hmax[m]      Hmin[m]      Haverage      H1/3[m]
Taverage      T1/3[m]') ;
    for l=1:nprobe
        fprintf(fid,'%s\n',[num2str(Hmax(l,1),'%10.4f') ' '
num2str(Hmin(l,1),'%10.4f') ' '
num2str(Haverage(l,1),'%10.4f') ' ' num2str(Hs(l,1),'%10.4f')
' ' num2str(Taverage(l,1),'%10.4f') ' '
num2str(Ts(l,1),'%10.4f')]);
    end
fclose(fid);

```

LAMPIRAN B
GAMBAR *SCOURING* PEMODELAN

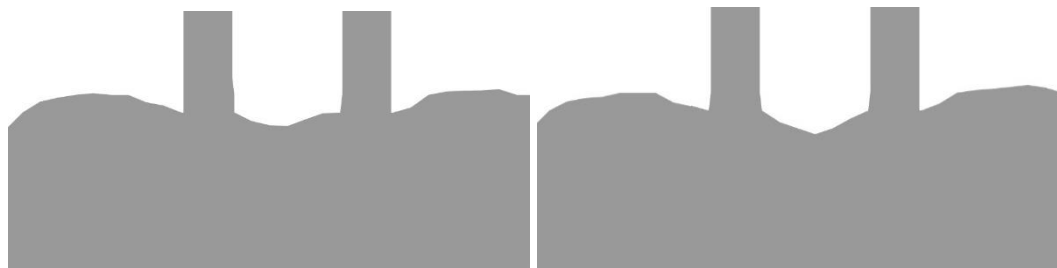
Modul 1

Berikut adalah hasil pemodelan *scouring* dari *software* untuk Modul 1 ($b/D=0,5; B/D=0,5$) setiap 3 menit.



3 Menit

6 Menit



9 Menit

12 Menit



15 Menit

Modul 2

Berikut adalah hasil pemodelan *scouring* dari *software* untuk Modul 2 ($b/D=0,5; B/D=1,0$) setiap 3 menit.



3 Menit

6 Menit



9 Menit

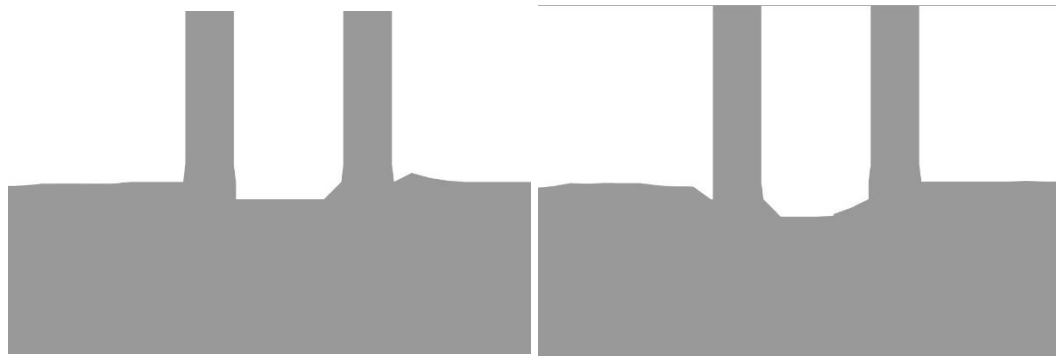
12 Menit



15 Menit

Modul 3

Berikut adalah hasil pemodelan *scouring* dari *software* untuk Modul 3 ($b/D=1,0; B/D=0,5$) setiap 3 menit.



3 Menit

6 Menit



9 Menit

12 Menit



15 Menit

Modul 4

Berikut adalah hasil pemodelan *scouring* dari *software* untuk Modul 4 ($b/D=1,0; B/D=1,0$) setiap 3 menit.



3 Menit

6 Menit



9 Menit

12 Menit



15 Menit

BIODATA PENULIS



Muhammad Yandi Wiryawicaksana, dilahirkan di Yogyakarta, pada tanggal 14 Juni 1997 yang merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan formal mulai dari TK Muslimat NU 08 Gresik, SD NU 1 Trate Gresik, SMPN 1 Gresik, SMAN 1 Gresik. Pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Selama empat tahun menjadi mahasiswa, penulis banyak mengikuti kegiatan kemahasiswaan. Di tahun pertama penulis mengikuti kegiatan sebagai staf magang UKM Cinta Rebana ITS di Departemen Pengembangan Sumber Daya Anggota, di tahun kedua menjadi staf Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan di Departemen Media Informasi, dan di tahun ketiga menjadi Kepala Departemen Multimedia UKM Cinta Rebana ITS. Pada tahun ketiga, penulis pernah melakukan kerja praktik di Balai Pantai PUSAIR Bali selama dua bulan. Apabila ingin menanyakan Tugas Akhir mengenai *scouring* pada *breakwater* tiang pancang dengan menggunakan pemodelan CFD, dapat menghubungi penulis melalui email sebagai berikut : yandiwiryawicaksana@gmail.com