



TUGAS AKHIR (MO 141326)

STUDI EKSPERIMEN *SCOURING* PADA DUA PIPA KONDISI *IN-TRENCH*
DAN MELETAK AKIBAT GELOMBANG REGULER DENGAN VARIASI
JARAK (*GAP*) ANTAR PIPA

DWI FAKHRI CHUSAINI

NRP. 04311440000094

DOSEN PEMBIMBING:

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

Dr. Ir. Wahyudi. M. Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



TUGAS AKHIR (MO 141326)

**STUDI EKSPERIMEN *SCOURING* PADA DUA PIPA KONDISI
IN-TRENCH DAN MELETAK AKIBAT GELOMBANG
REGULER DENGAN VARIASI JARAK (*GAP*) ANTAR PIPA**

DWI FAKHRI CHUSAINI

NRP. 04311440000094

DOSEN PEMBIMBING:

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

Dr. Ir. Wahyudi. M. Sc.

**DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



FINAL PROJECT (MO 141326)

**EXPERIMENTAL STUDY OF *SCOURING* BELOW TWO
PIPELINES WITH IN-TRENCH AND LAID CONDITION DUE
TO REGULAR WAVES BY VARIATE THE SPACING
BETWEEN PIPES (GAP)**

DWI FAKHRI CHUSAINI

NRP. 04311440000094

SUPERVISORS:

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

Dr. Ir. Wahyudi. M. Sc.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

MARINE TECHNOLOGY OF FACULTY

SEPULUH NOPEMBER TECHNOLOGY OF INSTITUTE

SURABAYA

2018

STUDI EKSPERIMEN *SCOURING* PADA DUA PIPA KONDISI *IN-TRENCH* DAN MELETAK AKIBAT GELOMBANG REGULER DENGAN VARIASI JARAK (*GAP*) ANTAR PIPA

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

DWI FAKHRI CHUSAINI

NRP. 04311440000094

Disetujui Oleh :

1. Suntoyo, ST., M.Eng., Ph.D (Pembimbing I)

2. Dr. Ir. Wahyudi, M.Sc. (Pembimbing II)

3. Drs. Mahmud Mustain, M.Sc, Ph. D (Penguji I)

4. Prof. Ir. Mukhtasor, M. Eng., Ph. D. (Penguji II)

Surabaya, 20 Juli 2018

STUDI EKSPERIMEN *SCOURING* PADA DUA PIPA KONDISI *IN-TRENCH* DAN MELETAK AKIBAT GELOMBANG REGULER DENGAN VARIASI JARAK (*GAP*) ANTAR PIPA

Nama Penulis : Dwi Fakhri Chusaini
NRP : 04311440000094
Departemen : Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing : Suntoyo, ST., M.Eng., Ph.D
Dr. Ir. Wahyudi, M.Sc.

ABSTRAK

Pipa bawah laut menjadi salah satu perkembangan teknologi yang banyak digunakan dalam moda transportasi hasil produksi fluida berupa minyak atau gas dari *offshore* ke *onshore* maupun antar platform untuk proses olah dan produksi. Dengan jarak yang panjang dan kondisi dasar laut yang ekstrim, *scouring* menjadi salah satu permasalahan yang sering terjadi. *Scouring* terjadi akibat arus dan gelombang yang mengenai struktur pipa kemudian membuat aliran vortex yang akan menggerus tanah sekitar pipa dengan arah yang sejajar. Apabila fenomena ini dibiarkan terus menerus maka menimbulkan *freespan* dan mengalami kegagalan pada struktur. Pada kasus penggunaan dua pipa (*two pipelines*) sebagai distribusi hasil migas juga akan mengalami *scouring*. Karena *scouring* dapat mengganggu kinerja operasi pipa bawah laut maka dalam Tugas Akhir ini akan dibahas tentang eksperimen *scouring* pada dua pipa dengan memvariasikan jarak antar pipa (*gap*) akibat gelombang regular untuk mengetahui besar maksimum kedalaman, lebar dan laju propagarsi *scouring*. Eksperimen dilakukan di Laboratorium Energi dan Lingkungan Laut Jurusan Teknik Kelautan FTK ITS. Skala yang digunakan dalam eksperimen adalah 1:10, dengan model pipa PVC diameter 1,5 inch. Dengan total 12 eksperimen, memvariasikan 3 jarak antar pipa, 2 peletakan (e/D) dan 2 tinggi gelombang (H). Hasil pengujian tanah diperoleh data butiran tanah dengan $SG = 2.658$ dan $d_{50} = 0.56$ mm. Eksperimen yang dilakukan dengan 12 variasi mendapatkan beberapa profil *scouring* dari dua pipa dari variasi *gap* (40 cm 60 cm 80 cm), tinggi gelombang ($H = 11$ cm, $H = 13$ cm) dan posisi peletakan ($e/D = 0$, $e/D = -0.1$). Waktu saat *scouring* mengalami *scouring* maksimum adalah 25 menit. Profil *scouring* 2D tersebut diskala dan digambar dalam Autocad untuk diperoleh kedalaman dan lebar *scouring* per masing-masing variasi. Hasil kedalaman dan lebar *scouring* dibandingkan dengan perhitungan empiris dengan menggunakan Ms Excel. Kondisi kedalaman dan lebar eksperimen *scouring* yang terbesar terjadi pada kondisi $H = 11$ cm. $e/D = -0.1$, dan *gap* 40 cm yaitu 0.23 cm dan 3.36 cm. Hubungan hasil *scouring* dengan parameter-parameter tak

berdimensi yaitu Keulegan Carpenter (KC), *Shield Parameter* (Θ), tinggi gelombang relatif (H/gT^2), dan *Burial Depth Diameter Ratio* (e/D). Berdasarkan perbandingan hubungan tersebut, semakin besar nilai KC, *shield parameter*, dan tinggi gelombang relative maka akan semakin besar pula nilai kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi. Pada kondisi peletakan pipa (e/D) semakin terbenam, maka pipa mengalami kedalaman *scouring* semakin kecil namun lebar semakin membesar.

Kata kunci : **pipa bawah laut, *scouring* dua pipa, eksperimen, gelombang regular, jarak antar pipa (*gap*)**

**EXPERIMENTAL STUDY OF SCOURING BELOW TWO PIPELINES
WITH IN-TRENCH AND LAID CONDITION DUE TO REGULAR WAVES
BY VARIATE THE SPACING BETWEEN PIPES (GAP)**

Name : Dwi Fakhri Chusaini
NRP : 04311440000094
Department : Teknik Kelautan
Supervisors : Suntoyo, ST., M.Eng., Ph.D
Dr. Ir. Wahyudi, M.Sc.

ABSTRACT

Pipelines is one of technology that used to transport the oil and gas products from offshore platform to onshore platform or between each platform to continue the process of production. Since long distance and extreme condition of seabed, scouring is be the one problem that always happened on pipelines. Scouring is caused by wave and current that contact the structure, then formed the flow's vortex and made the erosion of pipe's ground in one direction. If this phenomenon occurs many more, freespan will formed and get failure in structure. In the case using of two pipelines to distribute the oils and gas product, will get the scouring. Because the scouring can damage the operation of pipelines, so in this final research the scour will be studied specifically. The topic is about experimental study of *scouring* below two pipelines with in-trench and laid condition due to regular waves and variate spacing between pipes (gap). The object of research is to know the maximum depth and width scour, propagation of scour, and the relation between scour and non-dimensioanal parameter. The experiment was tested in Energy and Enviromental of Ocean Laboratory, Department Ocean Engineering FTK ITS. The scale of experiment using is 1:10, with 1.5 inch diameter PVC's pipe for the model. Total of experiments were twelve, variated three spacing between pipes (gap), two position of pipes (e/D), and two waves height (H). The result of soil testing was known a grain soil's data with $SG = 2.658$ and $d_{50} = 0.56$ mm. The result of twelve experiments got some data profile of scouring below to pipelines with gap variation (40 cm 60 cm 80 cm), wave height ($H = 11$ cm, $H = 13$ cm) and position of pipes ($e/D = 0$, $e/D = -0.1$). Time spendened on a maximum depth and width of scouring is 25 minutes. The 2D profil of scouring is scaled and sketched in Autocad to know the depth and width every one variation. That scouring's result is compared by equation of empirical law using Ms. Excel. The largest depth and width of scouring occurs in condition $H = 11$ cm, $e/D = -0.1$, and gap 40 cm, are 0.23 cm and 3.36 cm. The relation between scouring and non-dimensional parameter

are Keulegan Carpenter (KC), Shield Parameter (Θ), wave steepness (H/gT^2), dan Burial Depth Diameter Ratio (e/D). According to the relation of them, increasingly the value of non-dimensional parameter, so the depth and width of scouring value are higher. In pipe position (e/D) is more trenchingly, so the scouring depth of the pipelines is smaller but the width is the larger.

Key words : **pipelines, scouring below pipelines, experiment, regular waves, spacing between pipes (gap)**

KATA PENGANTAR

Segala puji kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir selama satu semester dan dapat mendokumentasikan dalam bentuk laporan ini. Tujuan penulisan Tugas Akhir adalah sebagai syarat terakhir dalam kelulusan dan memperoleh gelar sarjana teknik di departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selain itu, penulisan ini bertujuan sebagai bentuk laporan pembelajaran setelah melakukan penelitian Tugas Akhir di Departemen Teknik Kelautan.

Dalam mengerjakan penelitian Tugas Akhir banyak pihak-pihak yang membantu memberikan ilmu dan memberikan pengalaman mereka. Mulai dari pengambilan mata kuliah, penentuan topik Tugas Akhir, dan proses selama pengerjaan penelitian. Dengan Tugas Akhir yang berjudul “**Studi Eksperimen Scouring Pada Dua Pipa Kondisi In-Trench dan Meletak Akibat Gelombang Regular Dengan Variasi Jarak (Gap) Antar Pipa**”, penulis belajar banyak hal yang berkaitan dengan ilmu gelombang, sedimen dan eksperimen di laboratorium.

Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan banyak trimakasih kepada pihak-pihak yang terkait dalam pengerjaan penelitian Tugas Akhir ini. Penulis juga memohon maaf apabila terdapat kesalahan ucapan maupun perbuatan selama pengerjaan Tugas Akhir. Kritik dan saran menjadi harapan penulis sebagai koreksi untuk lebih baiknya laporan ini. Semoga laporan Tugas Akhir ini bermanfaat bagi penulis dan pembaca apabila dibutuhkan sebagai referensi maupun bacaan.

Surabaya, 06 Juli 2018

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam serangkaian pengerjaan laporan Tugas Akhir ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang terkait dalam membantu kegiatan penelitian Tugas Akhir selama satu semester ini. Pada kesempatan yang pertama ini, penulis mengucapkan syukur *Alhamdulillah* kepada Allah SWT yang selalu memberikan petunjuk dan perlindungan dalam menjalani kehidupan. Selain itu, beberapa pihak juga turut membantu dalam kelancaran penelitian Tugas Akhir ini yang dilakukan oleh penulis, diantaranya:

1. Kedua orang tua, kakak dan adik kandung saya yang selalu setia berdoa dan memberi nasihat, dukungan moral dan bantuan materi serta.
2. Bapak Suntoyo, ST., M.Eng., Ph.D, selaku dosen pembimbing I yang tulus memberikan banyak ilmu, pengalaman, saran dan masukan dalam setiap bimbingan maupun pengajaran.
3. Bapak Dr. Ir. Wahyudi, M. Sc. selaku dosen pembimbing II, yang juga memberikan ilmu dan waktu dalam setiap bimbingan
4. Bapak Drs. Mahmud Mustain, M.Sc, Ph. D selaku Kepala Laboratorium *flumetank* dan yang telah membantu dalam memberikan fasilitas yang digunakan dalam mengerjakan penelitian Tugas Akhir ini.
5. Bapak Prof. Ir. Mukhtasor, M. Eng., Ph. D. selaku penguji II dalam sidang Tugas Akhir yang memberi ilmu dan masukan yang mendukung dalam penelitian ini.
6. Bapak Arif Mochtar selaku Teknisi Laboratorium yang telah membantu dalam membimbing dan memberikan ilmu dalam proses eksperimen *scouring*
7. Keluarga besar Teknik Kelautan angkatan 2014 (MAELSTROM) yang memberi dukungan dan semangat dalam masa sedih dan senang selama mengikuti alur kehidupan di kampus dan luar kampus.
8. Bapak dan ibu kos yang selalu memberikan fitur-fitur kaget, sehingga teman kos saya Didid juga kaget.
9. Teman- teman kolompok Tugas Akhir *Scouring* Didit, Dicky dan Bima yang selalu mengingatkan dan memberi dukungan selama mengerjakan penelitian.

10. Teman-teman Lab Flumetank dan Lab Komputasi FTK-ITS, yang juga memberikan nasihat, pelajaran, rasa kebersamaan, dan ilmu selama mengerjakan penelitian.
11. Teman-teman kelompok TRB II-III, yang memberikan semangat dan pelajaran dewasa sehingga dapat menjalin kebersamaan yang dewasa sampai saat ini.
12. Teman-teman daerah Gebang, Didit, Sabilul, Zulfikar, Haris, Deddy, Bagas, Mada, Iqbal (Jarang ke Gebang), dan daerah Keputih, Yoga, Irvan, Seno, Abdi, Rudi serta Khamid daerah Wonokromo, yang membuat penulis mengerti akan arti kehidupan sebenarnya. (maaf hiperbola)
13. Teman-teman kontrakan BME, Drajat, Raka, Hanifan, Toni, Handi, Azam, yang memberikan semangat dalam mengerjakan Tugas Akhir seiring dengan DOTA.
14. Teman-teman kosan terdahulu Arik, Danang, dan Seno yang memberikan pengalamannya dan dukungannya selama tinggal di kos Benteng Takesi.
15. Teman-teman ataupun pihak-pihak yang terlibat dalam menemani, mengingatkan, membimbing hingga sampai saat ini.
16. Pihak-pihak cafe (Roda 6, Cinta, ANZ, Wayahe, STMJ) yang memberikan tempat kenyamanan dan ketenangan dalam mengerjakan penelitian ini.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
COVER PAGE	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	7
2.2.1 Gelombang Regular	7
2.2.2 Pengertian <i>Scouring</i>	12
2.2.3 <i>Scouring Below Pipelines</i>	13
2.2.4 Pemodelan Fisik.....	22
2.2.5 Specific Gravity Tanah	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2 Prosedur Penelitian.....	30
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Pengujian Tanah	37
4.2 Analisa Dimensi Model Eksperimen.....	39
4.3 Pengolahan Data Gelombang	43
4.4 Hasil Eksperimen	45
4.4.1 Kondisi Dua Pipa Meletak	45

4.4.2	Kondisi Dua Pipa <i>In-Trench</i>	62
4.5	Analisa Kedalaman dan Lebar <i>Scouring</i>	77
4.5.1	Kondisi Tinggi Gelombang 11 cm.....	79
4.5.2	Kondisi Tinggi Gelombang 13 cm.....	80
4.5.3	Perhitungan Empiris Kedalaman dan Lebar <i>Scouring</i>	81
4.6	Analisa Hubungan <i>Scouring</i> dengan Parameter Tak Berdimensi	83
4.7	Laju Propagasi <i>Scouring</i> terhadap Waktu	92
4.8	Perbandingan Dengan Penelitian Lain	95
BAB V PENUTUP		97
5.1	Kesimpulan.....	97
5.2	Saran	98
DAFTAR PUSTAKA		99
LAMPIRAN		
• LAMPIRAN A HASIL PROFIL 2D SCOURING SETIAP PENCATATAN 5 MENIT • LAMPIRAN B TABEL PERHITUNGAN EMPIRIS • LAMPIRAN B TABEL PERBANDINGAN SCOURING DENGAN PARAMETER TAK BERDIMENSI		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Submarine Pipelines System.....	5
Gambar 2.2. Definisi gelombang linier.....	9
Gambar 2.3. Gerakan partikel gelombang hingga dasar laut	11
Gambar 2.4. Pergerakan partikel gelombang dari titik tengah	11
Gambar 2.5. Proses scouring pada pipa.....	14
Gambar 2.6. Two pipelines	17
Gambar 2.7. <i>Equilibrium profile</i> pada banyak pipa akibat arus.....	18
Gambar 2.8. <i>Equilibrium profile</i> pada banyak pipa akibat gelombang dan arus ...	18
Gambar 2.9. Kondisi kedalaman <i>scouring</i> akibat gelombang pada <i>live bed</i>	19
Gambar 2.10. Pengaruh nilai KC terhadap profil lebar <i>scouring</i>	20
Gambar 2.11. Pengaruh nilai KC terhadap laju propagarsi <i>scouring</i>	21
Gambar 3.1. Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir	28
Gambar 3.2. Sketsa Pengujian Tampak Samping.....	31
Gambar 3.3. Sketsa Pengujian Tampak Atas	31
Gambar 3.4. Variasi koondisi pipa $e/D = 0$	33
Gambar 3.5. Variasi koondisi pipa $e/D = -0.1$	34
Gambar 3.6. Variasi jarak antar pipa (<i>gap</i>).....	34
Gambar 4.1. Grafik analisa pembagian butiran tanah	37
Gambar 4.2. Jarak dua pipa berdasarkan nilai pergerakan lateral pipa	39
Gambar 4.3. Hubungan tinggi gelombang lapangan dan model	41
Gambar 4.4. Hubungan kecepatan partikel gelombang lapangan dan model	41
Gambar 4.5. Hubungan jarak antar pipa (<i>gap</i>) lapangan dan model	41
Gambar 4.6. Kalibrasi <i>waveprobe</i>	42
Gambar 4.7. <i>Output</i> data gelombang 11 cm dari matlab (<i>wavan</i>).....	43
Gambar 4.8. <i>Output</i> data gelombang 13 cm dari matlab (<i>wavan</i>).....	43
Gambar 4.9. Kondisi dua pipa meletak jarak 40 cm ($H = 11$ cm).....	44
Gambar 4.10. Kondisi $t = 0$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	45
Gambar 4.11. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	45
Gambar 4.12. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	46
Gambar 4.13. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	46
Gambar 4.14. Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa meletak jarak 40 cm	47
Gambar 4.15. Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 40 cm, (<i>downstream</i>).....	47
Gambar 4.16. Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 40 cm (<i>upstream</i>).....	47
Gambar 4.17. Kondisi dua pipa meletak jarak 60 cm	48
Gambar 4.18. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	48
Gambar 4.19. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	49
Gambar 4.20. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	49
Gambar 4.21. Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa meletak jarak 60 cm, $H = 11$ cm	50
Gambar 4.22. Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 60 cm (<i>downstream</i>).....	50
Gambar 4.23. Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 60 cm (<i>upstream</i>).....	50
Gambar 4.24. Kondisi dua pipa meletak jarak 80 cm	51
Gambar 4.25. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	51
Gambar 4.26. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	52
Gambar 4.27. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	52

Gambar 4.28.	Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa meletak jarak 80 cm	53
Gambar 4.29.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 80 cm (downstream)	53
Gambar 4.30.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 80 cm, (upstream).....	53
Gambar 4.31.	Kondisi t = 5 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	54
Gambar 4.32.	Kondisi t = 15 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	54
Gambar 4.33.	Kondisi t = 25 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	55
Gambar 4.34.	Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa meletak jarak 40 cm	55
Gambar 4.35.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 40 cm (downstream).....	55
Gambar 4.36.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 40 cm (upstream).....	56
Gambar 4.37.	Kondisi t = 5 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	56
Gambar 4.38.	Kondisi t = 15 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	57
Gambar 4.39.	Kondisi t = 25 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	57
Gambar 4.40.	Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa meletak jarak 60 cm	57
Gambar 4.41.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 60 cm (downstream).....	58
Gambar 4.42.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 60 cm (upstream).....	58
Gambar 4.43.	Kondisi t = 5 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	58
Gambar 4.44.	Kondisi t = 15 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	59
Gambar 4.45.	Kondisi t = 25 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	59
Gambar 4.46.	Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa meletak jarak 80 cm	60
Gambar 4.47.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 80 cm (downstream).....	60
Gambar 4.48.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa meletak jarak 80 cm (upstream).....	60
Gambar 4.49.	Kondisi dua pipa <i>in-trench</i> jarak 40 cm (H = 11 cm).....	61
Gambar 4.50.	Kondisi t = 5 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	62
Gambar 4.51.	Kondisi t = 20 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	62
Gambar 4.52.	Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa <i>in-trench</i> jarak 40 cm	63
Gambar 4.53.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 40 cm (downstream).....	63
Gambar 4.54.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 40 cm (upstream).....	63
Gambar 4.55.	Kondisi dua pipa <i>in-trench</i> jarak 60 cm	64
Gambar 4.56.	Kondisi t = 5 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	64
Gambar 4.57.	Kondisi t = 20 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	65
Gambar 4.58.	Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa <i>in-trench</i> jarak 60 cm	65
Gambar 4.59.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 60 cm (downstream).....	65
Gambar 4.60.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 60 cm (upstream).....	66
Gambar 4.61.	Kondisi dua pipa <i>in-trench</i> jarak 80 cm	66
Gambar 4.62.	Kondisi t = 5 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	67
Gambar 4.63.	Kondisi t = 20 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	67
Gambar 4.64.	Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa <i>in-trench</i> jarak 80 cm	68
Gambar 4.65.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 80 cm (downstream).....	68
Gambar 4.66.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 80 cm (upstream).....	68
Gambar 4.67.	Kondisi t = 5 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	69
Gambar 4.68.	Kondisi t = 15 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	69
Gambar 4.69.	Kondisi t = 25 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	70
Gambar 4.70.	Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa <i>in-trench</i> jarak 40 cm	70
Gambar 4.71.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 40 cm (downstream).....	70
Gambar 4.72.	Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 80 cm (upstream).....	71
Gambar 4.73.	Kondisi t = 5 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	71
Gambar 4.74.	Kondisi t = 15 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	72
Gambar 4.75.	Kondisi t = 25 menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	72

Gambar 4.76. Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa <i>in-trench</i> jarak 60 cm	72
Gambar 4.77. Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 60 cm (downstream).....	73
Gambar 4.78. Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 80 cm (upstream).....	73
Gambar 4.79. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> ...	73
Gambar 4.80. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	74
Gambar 4.81. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) <i>downstream pipe</i> b) <i>upstream pipe</i> .	74
Gambar 4.82. Profil 2D <i>scouring</i> dua pipa <i>in-trench</i> jarak 80 cm	75
Gambar 4.83. Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 80 cm (downstream).....	75
Gambar 4.84. Profil 2D <i>scouring</i> pipa <i>in-trench</i> jarak 80 cm (upstream).....	75
Gambar 4.85. Perbandingan gap/D dengan S/D	76
Gambar 4.86. Perbandingan gap/D dengan w/D	77
Gambar 4.87. Grafik hubungan KC dengan bilangan tak berdimensi kedalaman <i>scouring</i> (S/D) kondisi meletak	82
Gambar 4.88. Grafik hubungan KC dengan bilangan tak berdimensi kedalaman <i>scouring</i> (S/D) kondisi <i>in-trench</i>	83
Gambar 4.89. Grafik hubungan KC dengan bilangan tak berdimensi lebar <i>scouring</i> (w/D) kondisi meletak.....	83
Gambar 4.90. Grafik hubungan KC dengan bilangan tak berdimensi lebar <i>scouring</i> (w/D) kondisi <i>in-trench</i>	84
Gambar 4.91. Grafik hubungan Θ dengan bilangan tak berdimensi kedalaman <i>scouring</i> (S/D) kondisi meletak	85
Gambar 4.92. Grafik hubungan Θ dengan bilangan tak berdimensi kedalaman <i>scouring</i> (S/D) kondisi <i>in-trench</i>	85
Gambar 4.93. Grafik hubungan Θ dengan bilangan tak berdimensi lebar <i>scouring</i> (w/D) kondisi meletak.....	86
Gambar 4.94. Grafik hubungan Θ dengan bilangan tak berdimensi lebar <i>scouring</i> (w/D) kondisi <i>in-trench</i>	86
Gambar 4.95. Grafik hubungan e/D dengan bilangan tak berdimensi kedalaman <i>scouring</i> (S/D) dengan $H = 11$ cm	87
Gambar 4.96. Grafik hubungan e/D dengan bilangan tak berdimensi kedalaman <i>scouring</i> (S/D) dengan $H = 13$ cm	87
Gambar 4.97. Grafik hubungan e/D dengan bilangan tak berdimensi lebar <i>scouring</i> (w/D) dengan $H = 11$ cm.....	88
Gambar 4.98. Grafik hubungan e/D dengan bilangan tak berdimensi lebar <i>scouring</i> (w/D) dengan $H = 13$ cm.....	88
Gambar 4.99. Grafik hubungan H/gT^2 dengan bilangan tak berdimensi kedalaman <i>scouring</i> (S/D) kondisi meletak	89
Gambar 4.100. Grafik hubungan H/gT^2 dengan bilangan tak berdimensi kedalaman <i>scouring</i> (S/D) kondisi <i>in-trench</i>	89
Gambar 4.101. Grafik hubungan H/gT^2 dengan bilangan tak berdimensi lebar <i>scouring</i> (w/D) kondisi meletak.....	90
Gambar 4.102. Grafik hubungan H/gT^2 dengan bilangan tak berdimensi lebar <i>scouring</i> (w/D) kondisi meletak.....	90
Gambar 4.103. Laju propagasi <i>scouring</i> hingga kondisi setimbang dua pipa kondisi $H = 13$ cm	93
Gambar 4.104. Laju propagasi <i>scouring</i> hingga kondisi setimbang dua pipa kondisi $H = 11$ cm	93
Gambar 4.105. Perbandingan S/D dengan penelitian lain.....	94

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Variasi eksperimen yang akan dilakukan	33
Tabel 4.1. Analisa pembagian butir tanah (gradasi).....	36
Tabel 4.2. Komposisi butiran	37
Tabel 4.3. Hasil pengujian <i>specified gravity</i>	38
Tabel 4.4. Nilai perhitungan keserupaan dimensi	40
Tabel 4.5. Hasil kedalaman dan lebar scouring 6 variasi tinggi gelombang 11 cm ...	78
Tabel 4.6. Hasil kedalaman dan lebar scouring 6 variasi tinggi gelombang 13 cm ...	79
Tabel 4.7. Hasil perhitungan empiris kedalaman dan lebar <i>scouring</i>	80
Tabel 4.8. Hasil eksperimen kedalaman dan lebar <i>scouring</i>	81
Tabel 4.9. Hasil eksperimen kedalaman dan lebar <i>scouring</i>	81
Tabel 4.10. Kondisi kedalaman <i>scouring</i> mencapai kesetimbangan (empiris).....	91
Tabel 4.11. Kondisi kedalaman <i>scouring</i> mencapai kesetimbangan (eksperimen).	92
Tabel 4.12. Kondisi kedalaman <i>scouring</i> mencapai kesetimbangan (eksperimen).	94

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi eksplorasi dan eksploitasi dunia minyak dan gas mengalami kemajuan pesat akibat kebutuhan energi yang semakin meningkat. Dengan berkembangnya teknologi minyak dan gas, fasilitas yang digunakan untuk beroperasi juga semakin canggih. Dalam kegiatan *onshore* (darat) atau *offshore* (lepas pantai), pipa bawah laut menjadi salah satu perkembangan teknologi yang banyak digunakan dalam moda transportasi hasil produksi fluida berupa minyak atau gas. Pipa bawah laut sebagai alat penunjang distribusi hasil migas, lebih efisien dan ekonomis jika dibandingkan dengan sistem transportasi seperti kapal tanker meskipun pada pembuatan dan proses instalasi pipa lebih mahal dan membutuhkan waktu yang lama. Dengan menggunakan pipa bawah laut biaya transportasi minyak dan gas berkurang menjadi seperlima (Sugiono, 2005).

Penggunaan pipa bawah laut sebagai sistem transport dan distribusi lepas pantai telah diakui oleh industri migas karena kemampuan untuk beradaptasi dengan berbagai lingkungan termasuk daerah terpencil dan modal transportasinya yang ekonomis (Guo, 2005). Sistem pipa bawah laut mengangkut hasil pengeboran fluida berupa minyak dan gas dari *offshore* platform ke *onshore* untuk dilakukan proses pengolahan dan produksi. Pengangkutan fluida juga dapat dilakukan antar *offshore* platform untuk dilakukan produksi di lepas pantai. Jarak dan rute yang dilalui jaringan pipa bawah laut sangat bervariasi dan tergantung kondisi lingkungan. Salah satu permasalahan alami yang terjadi saat operasi sistem transport pipa bawah laut adalah *scouring* (Penggerusan).

Scouring merupakan masalah yang sering terjadi pada struktur bawah laut seperti kaki-kaki platform, pondasi jetty, dan salah satunya adalah pipa bawah laut. Menurut Kinsman (1965), *scouring* adalah pergerakan dari tanah dasar laut yang disebabkan arus dan gelombang dimana prosesnya sama dengan erosi. Fenomena tersebut menyebabkan gangguan stabilitas dan kekuatan struktur saat beroperasi. Jika proses penggerusan ini terjadi terus menerus, maka akan terjadi kegagalan struktur sebelum mencapai batas umur struktur tersebut. Pada struktur horizontal

seperti pipa bawah laut hal tersebut akan menimbulkan kondisi *freecspan*. *Freecspan* terjadi saat struktur dan dasar laut kehilangan kontak dan ketika jarak *freecspan* melebihi panjang yang diijinkan, pipa akan kehilangan tumpuan dan mengalami defleksi (Budiarti, 2016).

Besarnya *scouring* atau gerusan tanah sekitar struktur dipengaruhi oleh beberapa faktor. Peletakan struktur, kedalaman laut, kecepatan gelombang dan arus, kondisi dasar laut (tanah) mempengaruhi proses *scouring* (gerusan) yang terjadi pada daerah struktur. Perancangan pipa bawah laut yang kurang mempertimbangkan faktor tersebut akan mengakibatkan kerusakan dan resiko yang tinggi. Dalam kasus tertentu, instalasi pipa bawah laut dengan *two pipelines* (dua pipa) juga akan mengalami *scouring*. Pemasangan pipa bawah laut yang sejajar dan berjumlah lebih dari satu perlu diperhatikan aspek-aspek yang akan berpengaruh pada efek *scouring*. Salah satu aspek dalam desain *two pipelines* (dua pipa) adalah jarak antar pipa (*gap*). Perancangan *gap* pada dua pipa yang sejajar bertujuan untuk mengurangi kemungkinan besar *scouring* yang terjadi.

Dalam penelitian Tugas Akhir ini akan dilakukan eksperimen untuk meninjau pengaruh jarak antar pipa bawah laut terhadap besar *scouring* yang terjadi. Pipa bawah laut yang diskala akan dilakukan pengujian di laboratorium Flume Tank dengan membangkitkan gelombang regular. Hasil dari eksperimen ini yaitu kedalaman maksimum, lebar dan laju propagasi *scouring*. Diharapkan hasil data dari eksperimen ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk desain pipa bawah laut dengan *two pipelines* (dua pipa) dan mengurangi efek *scouring* yang terjadi.

1.2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana nilai kedalaman dan lebar *scouring* pada dua pipa kondisi meletak dan *in-trench* akibat gelombang regular dengan variasi jarak (*gap*) antar pipa?

2. Bagaimana hubungan kedalaman dan lebar *scouring* terhadap dua pipa kondisi meletak dan *in-trench* akibat gelombang regular dengan variasi jarak (*gap*) antar pipa?
3. Bagaimana laju propagarsi *scouring* pada dua pipa kondisi meletak dan *in-trench* akibat gelombang regular dengan variasi jarak (*gap*) antar pipa?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui nilai kedalaman dan lebar *scouring* pada dua pipa kondisi meletak dan *in-trench* akibat gelombang regular dengan variasi jarak (*gap*) antar pipa.
2. Untuk mengetahui hubungan kedalaman dan lebar *scouring* terhadap dua pipa kondisi meletak dan *in-trench* akibat gelombang regular dengan variasi jarak (*gap*) antar pipa.
3. Untuk mengetahui laju propagarsi *scouring* pada dua pipa kondisi meletak dan *in-trench* akibat gelombang regular dengan variasi jarak (*gap*) antar pipa.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian tugas akhir dalam pengujian ini yaitu untuk mengetahui *scouring* yang terjadi pada dua pipa akibat faktor gelombang regular dengan variasi jarak (*gap*) pada pipa dan posisi peletakan pipa. Hasil eksperimen dapat digunakan sebagai bahan validasi percobaan secara numerik yang telah ada atau pertimbangan dalam desain pipa bawah laut di lapangan untuk meminimalisir *scouring*.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberikan dalam tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Analisa *scouring* yang dilakukan analisa dua dimensi
2. Gelombang yang dibangkitkan yaitu gelombang regular
3. Variasi dalam eksperimen yaitu jarak antar pipa (*gap*)
4. Nilai $e/D \leq 0$
5. Kondisi pipa terletak diatas dasar laut dan terbenam dasar laut (e/D ditentukan)

6. Tidak ada pelindung pipa
7. Kemiringan *seabed* diabaikan
8. Sudut aliran air terhadap pipa tegak lurus ($\alpha = 90^\circ$)
9. Ukuran diameter tanah d_{50}
10. Ukuran diameter pipa 1,5 in.
11. Berat jenis dan tebal pipa sebenarnya diabaikan
12. Model uji pipa berbahan PVC

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I Pendahuluan

Berisi tentang gambaran mengenai penelitian eksperimen yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan yang menjawab rumusan masalah, manfaat 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 yang digunakan 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 analisa dari seluruh hasil penelitian dari eksperimen yang telah dilakukan menggunakan rumus empiris yang terdapat dalam dasar teori maupun referensi lainnya.

BAB V Kesimpulan dan Saran

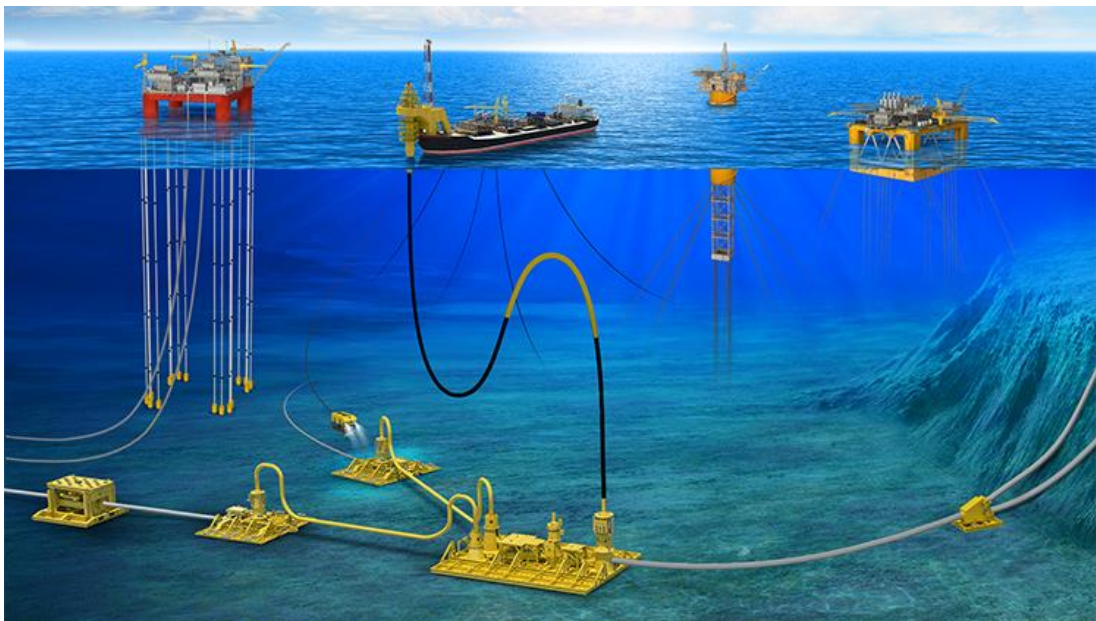
Hasil penelitian yang diperoleh akan dapat disimpulkan dan diberi saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Jaringan pipa bawah laut (*subsea pipeline*) diartikan sebagai bentangan pipa fluida dengan jarak yang sangat panjang. *Pipeline* digunakan dalam berbagai macam tujuan salah satu diantaranya adalah sebagai trunk line yakni mengangkut minyak dan/atau gas dari fasilitas produksi menuju daratan (Mousselli, 1981). Hasil fluida yang ditransportasikan dari *offshore* ke *onshore* akan dilakukan produksi lebih lanjut. Produksi juga dapat dilakukan di *offshore platform* yang mempunyai fasilitas produksi minyak dan gas seperti *semisubmersible*, *Floating Production Storage and Offloading*, dan *SPAR platform*. Kegiatan yang melibatkan transportasi hasil eksplorasi migas ini menggunakan *subsea pipeline system* yang lebih efisien dan cepat. Desain dan instalasi jaringan pipa bawah laut terilustrasi pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. *Submarine Pipelines System*

(Sumber : Oil States Industries. 2018)

Pipa bawah laut harus dirancang untuk dapat beroperasi pada kondisi perairan dalam atau dangkal. Pipa yang diletakkan di dasar laut (*seabed*) akan mengalami

kontak dengan perilaku tanah akibat pengaruh lingkungan. Pada pipa yang terkubur (*buried*) juga dipengaruhi faktor lingkungan meskipun sedikit. Pipa bawah laut yang diinstal di perairan dalam/dangkal akan menghasilkan fenomena *souring* (gerusan tanah) disebabkan oleh aliran air dari gelombang dan arus. Proses tersebut dapat menghasilkan *local scour* pada daerah struktur pipa dan juga mengakibatkan terkikisnya tanah dari pipa yang terkubur (*buried*). Aliran tersebut akan mengakibatkan adanya kontraksi, pembentukan *vortex*, turbulensi, terjadinya gelombang pecah, difraksi dan refleksi yang memungkinkan adanya material yang terbawa oleh arus (Ramadhan, 2017). Jika pada proses tergerusnya tanah ini dibiarkan terus-menerus akan mengakibatkan kondisi *freespan*. Ketika bentangan bebas (*freespan*) yang terjadi pada pipa maka mengganggu ketidakseimbangan kondisi operasi pipa ketika transport fluida. Saat pipa beroperasi dengan tekanan fluida internal tertentu namun kondisi tanah yang tergerus akan membuat ketidakstabilan struktur pipa dan mengakibatkan kegagalan struktur. Sehingga perlu diperhatikan dalam mendesain pipa bawah laut agar mengurangi *scouring* yang terjadi.

Penelitian yang membahas tentang *scouring* pada pipa salah satunya adalah Westerhorstman (1899) dengan studi eksperimen besarnya *scouring* akibat variasi *pipe spacing* jarak pada pipa (*multiple pipes*). Percobaan beliau dilakukan di laboratorium dengan memvariasikan jarak pada dua atau tiga pipa dengan peletakan tertentu dan kombinasi gelombang arus yang dibangkitkan. Hasil eksperimen tersebut mengatakan bahwa dengan jarak antar pipa yang lebih kecil menghasilkan *scouring* yang sedikit, namun apabila jarak tersebut diperbesar maka *scouring* yang terjadi lebih banyak.

Zhao, et al. (2015) mempublikasi penelitiannya yang berjudul *Local scour around two pipelines in tandem in steady current*, dengan membahas pengaruh rasio jarak antara dua pipa yang sejajar terhadap kedalaman *scouring* yang dihasilkan dan waktu terjadinya. Pengujian dilakukan pada kondisi *clear water* dan *live bed* dengan kecepatan arus yang sama yang disebabkan pengaruh *vortex shedding* akibat jarak yang divariasikan struktur pipa. Penelitian ini juga membahas perilaku hubungan *scouring* antara *upstream pipe* dan *downstream pipe* (dua pipa yang sejajar).

Cheng, et al. (2014), dalam judul penelitiannya *3D Scour Below Pipelines Under Waves And Combined Waves And Currents*, melakukan eksperimen *scouring* pada pipa dengan kondisi gelombang saja yang dibangkitkan serta kombinasi gelombang dan arus. Pada penelitian ini memperoleh nilai *Keulegan-Carpenter number* (KC) yang mempengaruhi laju *scouring*. Jika peletakan pipa semakin dalam maka nilai KC akan semakin besar dan laju propagasi *scouring* akan berkurang. Demikian sebaliknya.

Selain penelitian tersebut, Suntoyo dkk (2016) juga melakukan penelitian “aplikasi permodelan *turbulent boundary layer* untuk pengembangan model *scouring* pada *marine pipeline* di perairan Indonesia dan penanggulangannya”. Metode dan teori yang digunakan dalam menghitung propagasi *scouring* pada *marine pipeline* meliputi kedalaman, lebar dan waktu penjaralan *scouring* pada *pipeline* akibat gelombang, regular, irregular dan kombinasi arus.

Penelitian lain juga dilakukan oleh beberapa mahasiswa Jurusan Teknik Kelautan ITS seperti Pebriantina (2016) yang melakukan pemodelan 2D *scouring* pada pipa dengan variasi diameter pipa dan kondisi *in-trench*. Hasil kesimpulan dari penelitian tersebut bahwa semakin besar diameter pipa, kedalaman dan lebar *scouring* juga semakin besar. Penelitian “Studi eksperimen *scouring* pada pipa meletak dan *in-trench* akibat gelombang regular” yang dilakukan oleh Novia (2017), memfokuskan pembahasannya pada pengaruh peletakan posisi pipa e/D terhadap karakteristik *scouring*. Semakin dalam pipa terkubur semakin kecil *scouring* yang terjadi.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Gelombang Regular

Gelombang merupakan suatu fenomena yang terjadi karena alam. Gelombang terjadi akibat adanya hembusan angin yang mendorong permukaan air laut sehingga terbentuk gelombang. Gelombang yang dibentuk berdasarkan angin sebagai pembangkitnya adalah tipe gelombang angin. Selain tipe gelombang angin, gelombang pasang surut juga menjadi salah satu tipe gelombang yang dibangkitkan oleh gaya tarik-menarik benda-benda langit terutama matahari dan bulan. Dua tipe gelombang ini juga dapat disebut gelombang pendek dan gelombang panjang

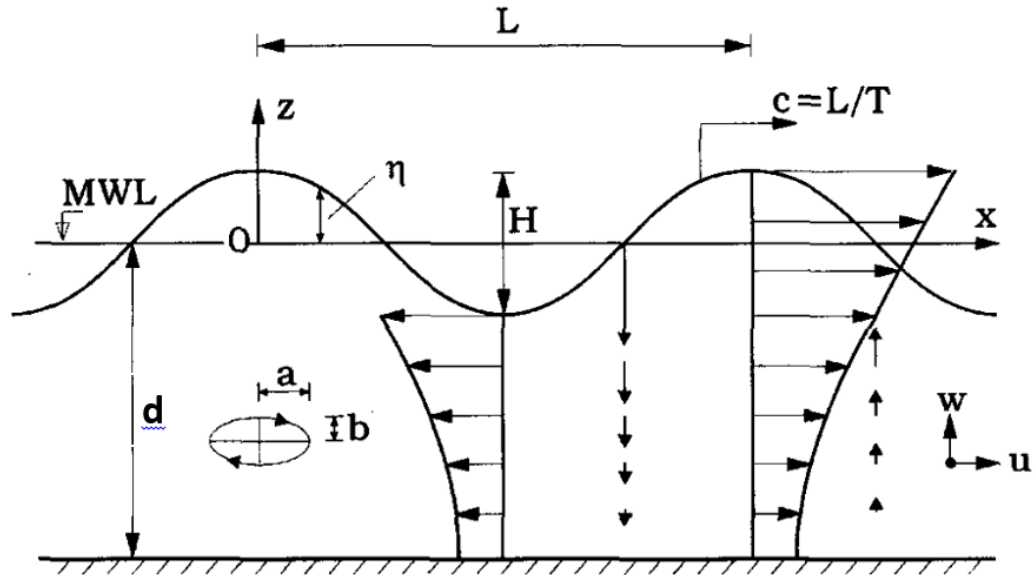
(Zakaria, 2012). Pada gelombang angin, mempunyai besar periode gelombangnya yang kecil yaitu beberapa detik sampai menit dalam terjadinya satu gelombang. Gelombang panjang, seperti gelombang pasang surut (pasut) mempunyai besar periode gelombang sangat besar antara jam sampai tahunan untuk mencapai satu gelombang.

Gelombang reguler memiliki bentuk propagasi yang konstan dan memiliki nilai tinggi dan periode gelombang relatif tetap. Gelombang reguler adalah pendekatan dari sebuah kenyataan dengan beberapa asumsi penyederhanaan terhadap beberapa faktor terbentuknya gelombang (Triatmodjo, 1999). Seperti kondisi di laut, gelombang yang terjadi sangatlah kompleks dan tidak dapat dirumuskan dengan akurat. Namun hal tersebut dapat dipelajari dengan melakukan beberapa asumsi sehingga muncul beberapa teori gelombang. Metode yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan pendekatan klasifikasi dan teori gelombang. Teori gelombang linier merupakan salah satu teori gelombang yang paling dasar dan sederhana yang ditemukan oleh Airy pada tahun 1845.

Asumsi-asumsi yang berkaitan dengan gelombang diberikan untuk mempermudah penurunan teori gelombang dasar pada amplitudo kecil (teori Airy) adalah sebagai berikut:

1. Zat cair adalah homogen dan tidak termampatkan, sehingga rapat massa adalah konstan.
2. Tegangan permukaan diabaikan.
3. Gaya *coriolis* (akibat perputaran bumi diabaikan).
4. Tekanan pada permukaan air adalah seragam dan konstan.
5. Zat cair adalah ideal, sehingga berlaku aliran tak rotasi.
6. Dasar laut adalah horizontal, tetap dan *impermeable* sehingga kecepatan vertikal di dasar adalah nol.
7. Amplitudo gelombang kecil terhadap panjang gelombang dan kedalaman air.
8. Gerak gelombang berbentuk silinder yang tegak lurus arah penjalaran gelombang sehingga gelombang adalah dua dimensi.

Untuk menurunkan persamaan gelombang perlu difahami terlebih dahulu definisi dan notasi yang dipergunakan dalam persamaan yang akan diturunkan dan diilustrasikan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Definisi gelombang linier

(Sumber : Sumer & Fredsøe. 2002)

Dari gambar 2.2, notasi-notasi yang berkaitan dengan teori gelombang dasar untuk menurunkan persamaan adalah sebagai berikut:

- d : jarak antara muka air rerata dan dasar laut
- $\eta(x,t)$: fluktuasi muka air terhadap muka air diam $\eta = a \cos(kx - \omega t)$
- a : amplitudo gelombang
- H : tinggi gelombang $= 2 \cdot a$
- L : panjang gelombang
- T : periode gelombang
- C : cepat rambat gelombang (L/T)
- k : bilangan gelombang $(2\pi/L)$
- ω : frekuensi gelombang $(2\pi/T)$

2.2.1.1 Klasifikasi Gelombang Menurut Kedalaman Relatif

Semakin dalam perairan laut, profil dan kecepatan gelombang tidak berpengaruh pada kondisi dasar laut. Sebaliknya untuk perairan dangkal sampai

wilayah transisi, pengaruh gelombang masih berpengaruh. Perairan laut memiliki kedalaman yang relatif berbeda dan kondisi gelombang yang tak tentu. Menurut Yuwono, (2009) perbandingan kedalaman laut dan periode gelombang (d/L) dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam gelombang berdasarkan kedalaman relatif yang dilustrasikan pada tabel 2.1. yaitu :

Tabel 2.1. Klasifikasi Gelombang Menurut Teori Gelombang Linier (Airy)

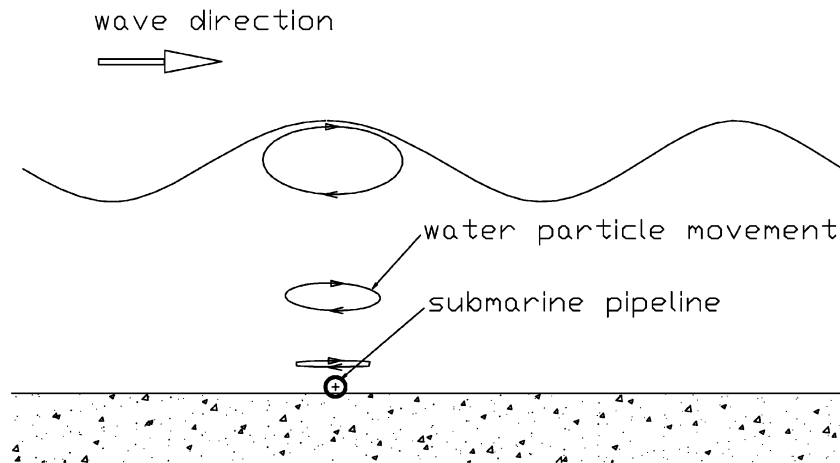
(Sumber : Yuwono N. 1982)

Keterangan	Gelombang dilaut dangkal	Gelombang di laut transisi	Gelombang di laut dalam
d/L	$d/L \geq 1/2$	$1/20 < d/L < 1/2$	$d/L \leq 1/20$
Tanh ($2\pi d/L$)	$\approx 2\pi d/L$	$\text{Tanh}(2\pi d/L)$	≈ 1
Cepat rambat gelombang	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left[\frac{2\pi d}{L}\right]$	$C = C_o = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
Panjang Gelombang	$L = T\sqrt{gd}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left[\frac{2\pi d}{L}\right]$	$L = L_o = \frac{gT^2}{2\pi} = 1,56T^2$

2.2.1.2 Orbital Gelombang

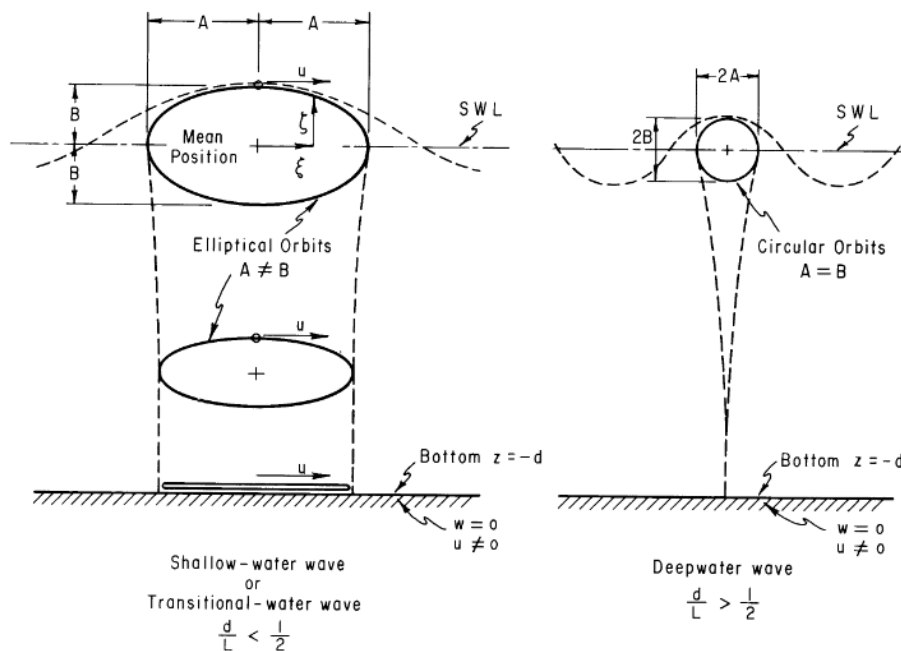
Orbital gelombang merupakan partikel atau bagaian dari air gelombang yang berada di sekitar dan mempunyai profil kecepatan. Kecepatan orbit gelombang bergantung pada kedalaman perairan laut. Jika perairan mempunyai kedalaman yang dangkal, kecepatan orbital gelombang dapat mencapai dasar laut dan mempengaruhi kondisi dasar laut. Begitupun sebaliknya dengan perairan laut yang dalam, kecepatan orbital mempunyai sedikit pengaruh pada kondisi dasar laut.

Partikel gelombang bergerak mengitari orbital selama dia mempunyai kecepatan tertentu. Pada laut dangkal, partikel gelombang bergerak pada orbit yang berbentuk elips dan pada laut dalam berbentuk silinder. Jika posisi tengah partikel adalah titik tengah dari bentuk elips atau silinder, maka jarak vertikal partikel titik tengah tidak boleh melebihi dari tinggi gelombang. Namun, karena nilai tinggi gelombang dianggap kecil sehingga jarak displasemen dari partikel fluida juga dianggap kecil. Seperti pada gambar 2.3. skema pergerakan gelombang harmonik dan 2.4. diilustrasikan jarak partikel gelombang dari posisi tengah untuk laut dangkal dan dalam yaitu sebagai berikut:



Gambar 2.3. Gerakan partikel gelombang hingga dasar laut

(Sumber : Gao et. al. 2002)



Gambar 2.4. Pergerakan partikel gelombang dari titik tengah

(Sumber : *Shore Protection Manual* Vo. 1 p. 2-17, 1984)

Untuk mencari nilai jarak partikel dari titik tengah ke orbital terluar seperti pada gambar tersebut. A dan B adalah jarak horisontal dan vertikal dengan mengikuti bentuk masing-masing orbital di laut dalam maupun laut dangkal.

Pada laut dalam, persamaan yang sudah disederhanakan menunjukkan nilai A dan B adalah sama pada orbit silinder. Sehingga persamaannya adalah:

$$A = B = \frac{H}{2} e^{2\pi z/L} \quad \text{untuk } \frac{d}{L} > \frac{1}{2} \quad (2.1)$$

Pada kondisi laut dangkal, persamaannya menjadi

$$A = \frac{H}{2} \frac{L}{2\pi d} \quad (2.2)$$

$$\text{untuk } \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$$

$$B = \frac{H}{2} \frac{z + d}{d} \quad (2.3)$$

Bentuk orbital partikel dari permukaan hingga ke *seabed* (dasar laut) mempunyai perbedaan. Pada laut dangkal, orbit yang berbentuk elips ini akan berubah seperti pada gambar 2.4. dan memiliki kecuraman yang kecil. Sedangkan di laut dalam mempunyai kecuraman yang tajam. Sehingga pada *seabed* pengaruh dari gerakan partikel gelombang juga harus ditinjau.

Untuk mencari amplitudo gerakan orbital dari partikel air pada *seabed* menggunakan rumus:

$$a = \frac{H}{2} \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \quad (2.4)$$

Dimana nilai z merupakan jarak vertikal dari muka air rata-rata ke dasar laut, sehingga $z = -d$. Nilai maksimum kecepatan partikel air pada dasar adalah:

$$U_m = \frac{\pi H}{Tw} \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \quad (2.5)$$

2.2.2 Pengertian *Scouring*

Ketika sebuah struktur ditempatkan di lingkungan laut, keberadaan struktur akan mengubah pola aliran di daerah sekitarnya dan menyebabkan satu atau beberapa fenomena seperti berikut:

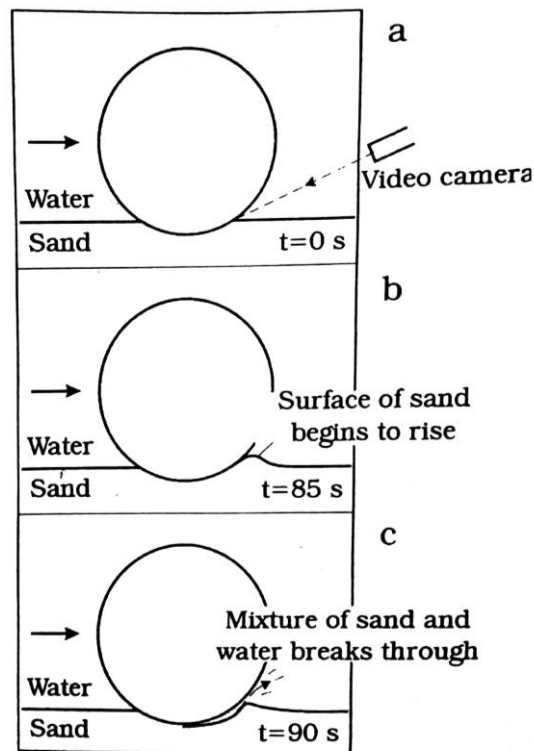
1. Kontraksi arus
2. Pembentukan pusaran vortex di depan struktur

3. Pembentukan vortisitas lee-wake (dengan atau tanpa vortex shedding) di belakang struktur
4. Terbentuknya turbulensi
5. Terjadinya refleksi dan difraksi gelombang
6. Terjadinya gelombang pecah
7. Perbedaan tekanan di dalam tanah yang dapat menimbulkan perubahan kondisi.

Fenomena tersebut dapat menyebabkan penambahan pada kapasitas sedimentasi local dan pasti mengalami *scouring* (gerusan). *Scouring* terjadi karena aliran arus, gelombang atau kombinasi arus dan gelombang yang dapat mengganggu stabilitas struktur. *Scouring* biasanya terjadi pada struktur yang sederhana seperti *pipeline* dan pondasi atau terjadi pada struktur kompleks seperti, *breakwater*, *offshore platform*, atau bangunan laut lainnya dengan posisi vertikal maupun horizontal (Sumer & Fredsøe, 2002).

2.2.3 *Scouring Below Pipelines*

Scouring pada pipa di dasar laut dapat terjadi akibat pengaruh gelombang, arus maupun kombinasi arus dan gelombang. Aliran fluida yang mengalir pada struktur pipa akan menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan antara bagian depan pipa (*upstream pipeline*) dan bagian belakang pipa (*downstresm pipeline*). Ketika kecepatan aliran bertambah, kondisi kritis dimana aliran rembesan di bawah pipa bertambah lebih cepat dari perbedaan tekanan yang terjadi sehingga menimbulkan campuran antara air dan tanah (*seabed*) yang membuat celah atau jarak di bawah pipa dengan dasar laut. Proses tersebut lama kelamaan akan menyebabkan gerusan yang terjadi di bagaian belakang pipa seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Proses scouring pada pipa

(Sumber : Summer et al. 2001 a)

Proses *scouring* menimbulkan perubahan pada daerah sekitar struktur. Gerusan (*scouring*) dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu gerusan global dan gerusan lokal.

1. Gerusan Global (*Global Scour*)

Gerusan global adalah gerusan yang terjadi pada sekitar keseluruhan struktur (tidak pada satu daerah tertentu)

2. Gerusan Lokal (*Local Scour*)

Gerusan lokal adalah gerusan yang terjadi pada satu daerah tertentu dan biasanya terpusat pada salah satu elemen struktur. Pada gerusan lokal terdapat dua macam tipe yang dipengaruhi oleh *shield parameter*. *Shield parameter* atau yang juga disebut *Shield Number* merupakan nilai tak berdimensi yang digunakan untuk menghitung gerakan awal proses sedimentasi pada aliran fluida Shoulsby, (1997). Nilai tersebut merupakan dimensi dari tegangan geser tanah (*shear stress*).

Dua tipe gerusan lokal tersebut adalah sebagai berikut:

- *Clear Water Scouring*

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

Nilai Parameter *Shiled* (θ) yang digunakan dalam analisa *scouring* akibat gelombang regular dengan formulasi persamaan dari Soulsby, (1997) sebagai berikut:

$$\theta = \frac{\tau_w}{\rho g \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) d_{50}} \quad (2.6)$$

Dengan,

τ_w = Tegangan geser akibat gelombang pada dasar laut

ρ = Massa jenis air

ρ_s = Massa jenis sedimen tanah

d_{50} = Diameter butiran tanah

g = Percepatan gravitasi

Untuk mencari nilai tegangan geser akibat gelombang pada dasar laut menggunakan formula persamaan Soulsby, (1997):

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_m^2 \quad (2.7)$$

Dengan,

f_w = Faktor pergeseran akibat gelombang

U_m = Kecepatan orbital partikel air pada dasar laut

Nilai faktor pergeseran tanah akibat gelombang dapat dicari menggunakan formula persamaan Soulsby, (1997):

$$f_w = 1.39 \frac{A}{Z_o}^{-0.52} \quad (2.8)$$

Dengan,

Z_o = *Hydraulic roughness length*

Nilai A dan Z_o dapat dicari menggunakan formula persamaan Soulsby, (1997):

$$A = \frac{U_m T}{2\pi} \quad (2.9)$$

$$Z_o = \frac{2.5 d_{50}}{30} \quad (2.9)$$

Dengan,

T = Periode gelombang

d_{50} = Ukuran butiran sedimen tanah

Sedangkan θ_{cr} merupakan nilai kritis dari *Shield Parameter* yang memiliki formulasi persamaan Soulsby, (1997):

$$\theta_{cr} = \frac{0.24}{d_*} + 0.055 (1 - \exp(-0.02d_*)) \quad (2.10)$$

Dimana d_* merupakan bilangan non dimensional dari butiran tanah

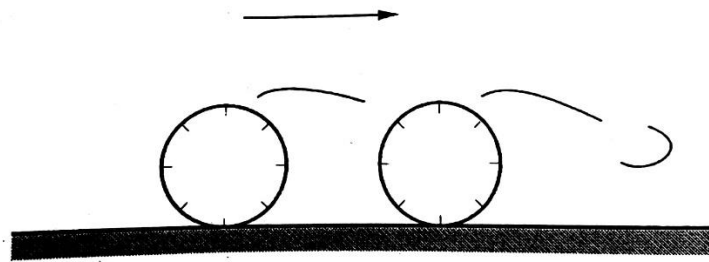
$$d_* = d_{50} \left(\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho v^2} \right)^{1/3} \quad (2.11)$$

Dengan,

v = Kinematik viskositas air

2.2.3.1 Efek *Gap of Multiple Pipelines*

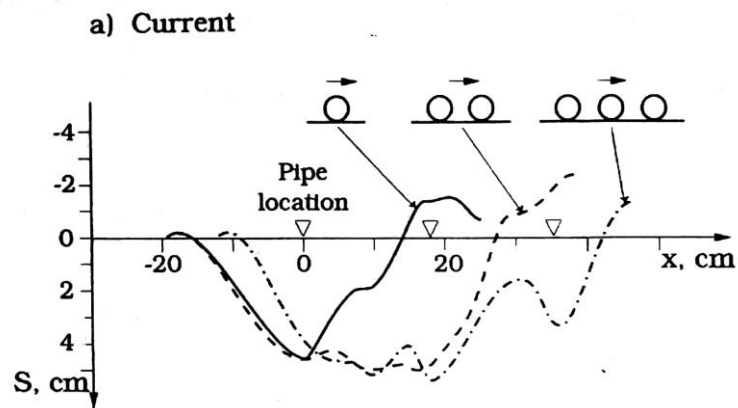
Ketika lebih dari satu pipa yang terletak pada dasar laut (gambar 2.6), karakteristik *scouring* maupun kedalaman maksimum *scouring* dapat berubah-ubah, tergantung dari jumlah pipa yang dipasang dan jarak antar pipa. Pada kasus ini, Westerhortmann et al, (1992) telah melakukan studi eksperimen *scouring* pada satu sampai tiga pipa dengan memvariasikan arus, kombinasi gelombang dan arus serta peletakan posisi pipa.



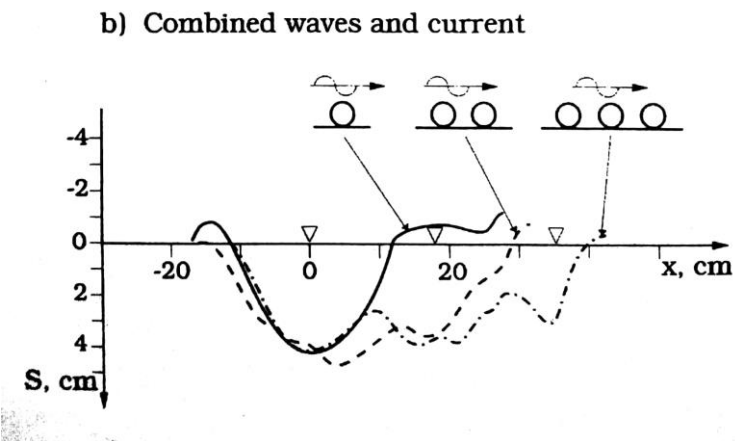
Gambar 2.6. Two pipelines

(Sumber : Sumer & Fredsøe. 2002)

Scouring yang terjadi pada satu pipa dan banyak pipa dalam kondisi tertentu mempunyai kesamaan profil *scouring*. Dengan kondisi akibat arus dan kombinasi antara arus dan gelombang, kedalaman maksimum *scouring* yang dihasilkan tidak sepenuhnya berbeda. Pada satu pipa, dua pipa, dan tiga pipa dimodelkan dalam eksperimen dengan jarak antar pipa yang sama dengan diameter. Eksperimen yang dilakukan Westerhortmann et al. pada banyak pipa (*multiple pipelines*) di mana jarak (*gap*) antar pipa sama dengan setengah diameter pipa yang mengindikasikan kedalaman maksimum *scouring* berkurang antara 5% hingga 35% jika dibandingkan dengan kasus jarak antar pipa yang sama dengan diameter pipa. Dapat dijelaskan bahwa semakin kecil jarak antar pipa, akan menghambat terjadinya *vortex shedding* dan akan mengurangi efek lee wake pada kedalaman *scouring*. Seperti pada gambar 2.7. dan 2.8. diilustrasikan kesamaan profil *scouring* pada eksperimen tiga kondisi pipa dengan arus atau kombinasi gelombang arus di mana jarak antar pipa sama dengan diameter pipa



Gambar 2.7. *Equilibrium profile* pada banyak pipa akibat arus
(Sumber : Westerhorstmann et al. 1992)



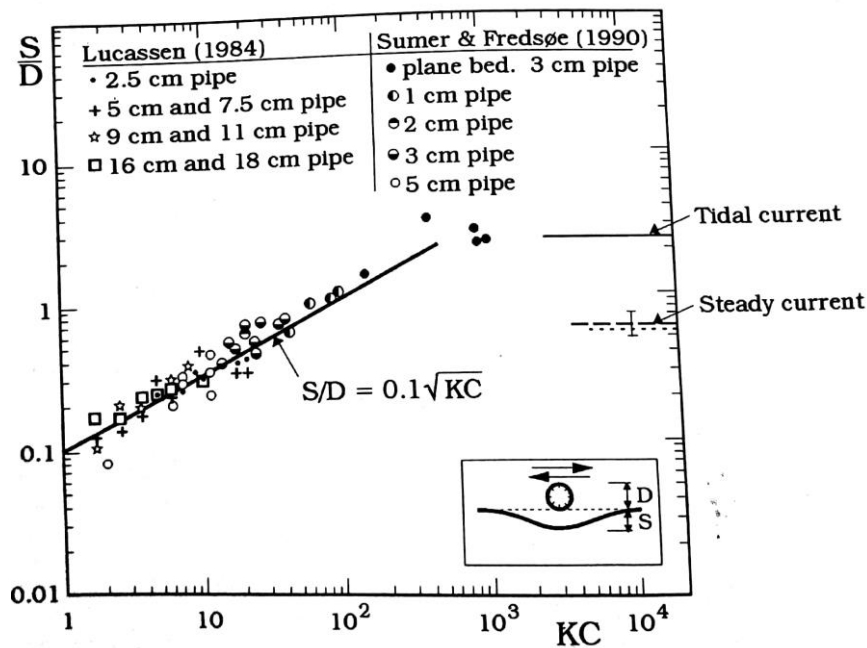
Gambar 2.8. *Equilibrium profile* pada banyak pipa akibat gelombang dan arus
(Sumber : Westerhorstmann et al. 1992)

Menurut Zhao et al (2015), pada penelitiannya tentang pengaruh jarak (*gap*) pada dua pipa terhadap laju *scouring* akibat arus yang seragam mengungkapkan bahwa efek dari eksperimen *scouring* dengan variasi jarak (*gap*) menyebabkan tiga parameter yang menjadi terpengaruh pada kondisi *livebed* maupun *clearwater* yaitu:

1. *Scour depth*
2. *Vortex shedding*
3. *Force coefficient*

2.2.3.2 Kedalaman *Scouring*

Celah antara bagian bawah pipa dan dasar yang dibentuk dari proses *scouring* semakin lama akan membesar akibat gelombang maupun arus yang meningkat. Kedalaman *scouring* (S_w) terjadi pada pipa secara terus menerus mengakibatkan fase kesetimbangan atau yang disebut *equilibrium scour depth* akibat gelombang seperti pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Kondisi kedalaman *scouring* akibat gelombang pada *live bed*
(Sumber : Sumer and Fredsoe, 1990)

Pada gambar 2.7 mendemonstrasikan *equilibrium scour depth* tak berdimensi yang berhubungan dengan nilai KC (Keulegan-Carpenter Number). Dijelaskan bahwa kenaikan kedalaman *scouring* dipengaruhi penambahan nilai KC . Kedalaman *scouring* pada kondisi *livebed* ($\theta > \theta_{cr}$) dapat ditunjukkan dengan persamaan Etemad-Shahidi et al. (2010) berikut:

$$S_w = 0.105 D KC^{0.503} \exp(-0.284 e/D) \quad , e/D \leq 0.145 \quad (2.12)$$

$$S_w = 0.024 D KC^{0.763} \exp(-0.631 e/D) \quad , e/D \leq 0.145 \quad (2.12)$$

Nilai KC (*Keulegan-Capenter Number*) juga disebut angka periode, yaitu bilangan tak berdimensi yang menghubungkan gaya drag dengan gaya inersia pada aliran yang berosilasi.

$$KC = \frac{U_m T}{D} \quad (2.13)$$

Dengan,

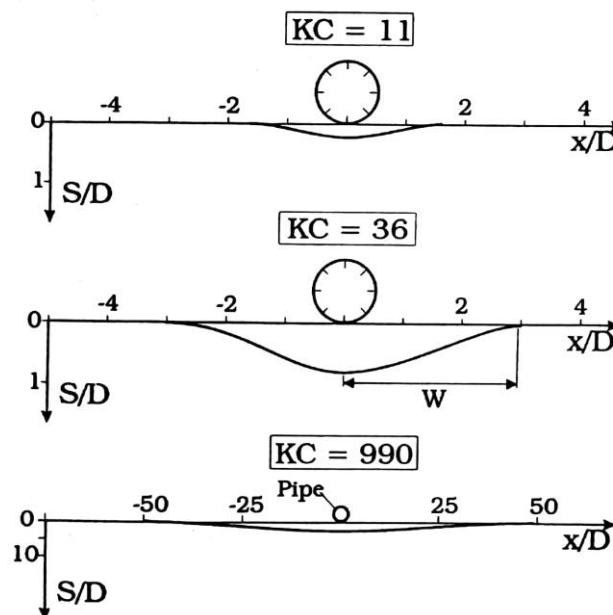
U_m = Kecepatan orbital maksimum partikel air pada kondisi undisturbed di dasar

T = Periode osilasi

D = Diameter pipa

2.2.3.3 Lebar *Scouring*

Seiring dengan kedalaman *scouring* yang terjadi pada pipa, akibat lain yang terjadi adalah lebar *scouring*. Pada penelitian Sumer dan Fredsoe, (1990) peningkatan nilai KC mempengaruhi bertambahnya profil lebar *scouring* yang terjadi. Pada gambar 2.10. diilustrasikan eksperimen tiga perlakuan dengan variasi nilai KC terhadap lebar *scouring* seperti berikut.



Gambar 2.10. Pengaruh nilai KC terhadap profil lebar *scouring*

(Sumber : Sumer and Fredsoe. 1990)

Lebar *scouring* dapat hitung menggunakan persamaan empiris dari diskusi Sumer and Fredsoe, (1990):

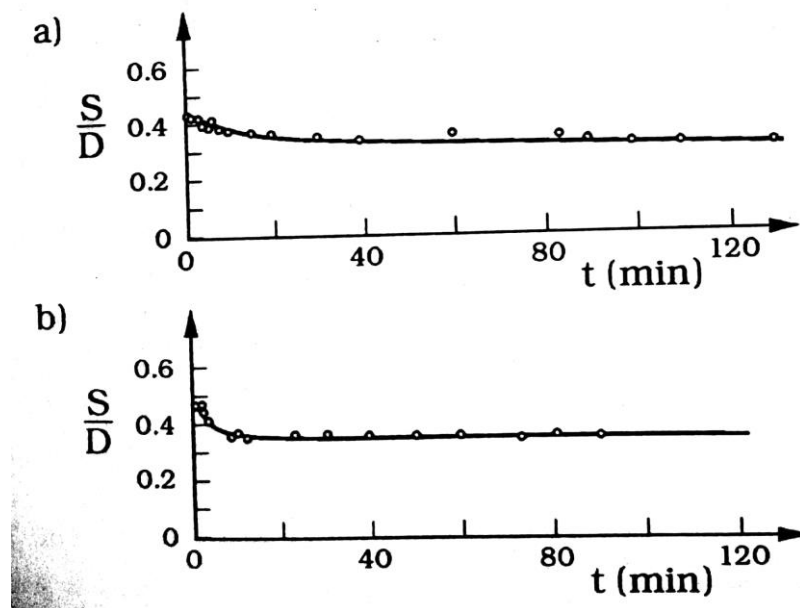
$$W_w = 0.35 D KC^{0.65} \quad (2.14)$$

Dengan,

W_w = Lebar *scouring* yang diukur dari titik tengah pipa ke titik maksimum lubang *scouring* paling jauh akibat gelombang regular

2.2.3.4 Laju Propagarsi *Scouring*

Laju propagarsi menunjukkan mekanisme terjadinya *scouring* tiap waktu. Waktu yang dibutuhkan untuk mengembangkan penggerusan hingga mencapai keseimbangan disebut *time scale*. Pada gambar 2.11. ditunjukkan perubahan kedalaman *scouring* dengan waktu tertentu kondisi akibat gelombang.



Gambar 2.11. Pengaruh nilai KC terhadap laju propagarsi *scouring*
(Sumber : Sumer and Fredsoe. 1992)

Time scale dapat diprediksi dari parameter kedalaman *scouring* dengan waktu terjadi yang diungkapkan pada formulasi Sumer dan Fredsoe. (2002) berikut:

$$S_t = S_w (1 - \exp(-\frac{t}{T})) \quad (2.15)$$

Dimana,

S_w = Kedalaman *scouring*

t = Waktu lama terjadi *scouring*

T = Didefinisikan *time scale*

Pada kondisi akibat gelombang, formulasi tak berdimensi *time scale* dipengaruhi oleh *Keulegan-Carpenter Number* dan *Shield Parameter Number* seperti berikut:

$$T = \frac{D^2}{(g(s-1)d_{50}^3)^{1/2}} T^* \quad (2.16)$$

Dengan,

D = Diameter pipa

s = Perbandingan masa jenis tanah dan massa jenis air ($s = \frac{\rho_s}{\rho}$)

Nilai T^* dapat dicari dengan formula Fredsoe et al, (1992) sebagai berikut:

$$T^* = \frac{1}{50} \theta^{-5/3} \quad (2.17)$$

Dengan,

θ = *Shield parameter number*

2.2.4 Pemodelan Fisik

Model adalah alat digunakan untuk menganalisis maupun merancang sistem. Sebagai alat komunikasi yang sangat efisien, model dapat menunjukkan bagaimana suatu operasi bekerja dan mampu merangsang untuk berpikir bagaimana meningkatkan atau memperbaikinya (Law & Kelton, 1991).

Prinsip pemodelan bertujuan untuk mempermudah analisis dan mempelajari sistem dan model dengan asumsi-asumsi yang dirancang sebagai pertimbangan hasil.

Dengan permodelan fisik, permasalahan akan lebih mudah diselesaikan secara sederhana dengan batasan tertentu.

Pemodelan fisik yang dilakukan dalam eksperimen ini adalah memodelkan pipa bawah laut dengan analisa *scouring* akibat gelombang regular. Model fisik berupa pipa PVC yang akan dilakukan eksperimen di *flume tank*. Dengan pembangkit gelombang yang dikendalikan dan hal pendukung lainnya harus lebih diperhatikan agar hasil yang didapat sama dengan hasil pada perhitungan empiris atau asli.

2.2.4.1 Keserupaan Model

Model fisik yang dirancang harus memiliki keserupaan secara geometrik, kinematik, dan dinamik dengan prototipe. Masing-masing parameter memiliki skala tersendiri dan besarnya tidak sama. Di dalam penelitian Sudarto (2007) terdapat 4 keserupaan model sebagai berikut:

a. Faktor Skala

Hubungan antara parameter model fisik dan prototype ditunjukkan oleh rasio skala, yaitu rasio parameter pada prototype untuk variabel yang sama dari nilai parameter model. Secara simbolis ditunjukkan oleh:

$$N_x = \frac{X_p}{X_m} \quad (2.18)$$

Dengan,

N_x = Skala x antara protipe dan model

X_p = Nilai x pada prototipe

X_m = Nilai x pada model

Banyak rasio skala tidak dapat dipilih secara langsung, tetapi merupakan turunan dari pemilihan skala lainnya, seperti dimensi luas yang merupakan perkalian dari dimensi panjang.

b. Keserupaan Geometri

Keserupaan geometri adalah fungsi dari dimensi panjang (L) mensyaratkan model dan prototip sebanding ukurannya dalam segala arah sehingga didapat bentuk yang sama antara prototip dan model fisik. Keserupaan geometri dinyatakan dalam:

$$N_v = N_h = N_L \quad (2.19)$$

Dengan,

N_v = Skala panjang vertikal

N_h = Skala panjang horizontal

N_L = Skala panjang

Suatu model memiliki panjang skala vertikal yang tidak sama dengan panjang skala horizontal sehingga tidak memenuhi keserupaan geometric disebut sebagai model dengan geometri terdistorsi. Model seperti dapat digunakan untuk pemodelan gelombang panjang, sedangkan pemodelan gelombang pendek seperti pengujian koefisien transmisi dan refleksi harus memenuhi keserupaan geometri.

c. Keserupaan Kinematik

Keserupaan kinematic mengacu pada pergerakan dari sebuah sistem. Pergerakan yang terjadi dapat berupa pergerakan fluida atau soli. Pergerakan didefinisikan sebagai perubahan dimensi panjang terhadap waktu.

Keserupaan kinematik menunjukkan kesamaan gerak partikel pada model maupun pada partikel. Keserupaan kinematik akan tercapai bila rasio antara komponen-komponen dari seluruh pergerakan vektorial untuk prototip dan model adalah sama untuk semua partikel dalam setiap saat.

d. Keserupaan Dinamik

Keserupaan dinamik mensyaratkan skala panjang, skala waktu dan skala gaya yang sama. Keserupaan dinamik secara matematik dijelaskan oleh hokum Newton II, bahwa gaya inersia sebanding dengan sejumlah vector dari gaya

gravitasi, gaya tegangan permukaan, gaya gesek/kekentalan, gaya kompresi elastis dan gaya tekanan, yang dinyatakan dalam persamaan matematis:

$$\vec{F}_I = \vec{F}_g + \vec{F}_v + \vec{F}_e + \vec{F}_p \quad (2.20)$$

Dengan,

F_I = Gaya inersia

F_g = Gaya gravitasi

F_v = Gaya gesek

F_e = Gaya elastis

F_p = Gaya tekanan

Rasio gaya inersia di model dan prototipe harus sama dengan rasio jumlah vektor gaya, dalam persamaan matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{[\vec{F}_I]_m}{[\vec{F}_I]_p} = \frac{[\vec{F}_g + \vec{F}_v + \vec{F}_a + \vec{F}_e + \vec{F}_p]_m}{[\vec{F}_g + \vec{F}_v + \vec{F}_a + \vec{F}_e + \vec{F}_p]_p} \quad (2.21)$$

Agar keserupaan dinamik terpenuhi, haruslah memenuhi kriteria-kriteria hidrolis tertentu. Pada hamper seluruh masalah teknik pantai (dan sekitar 90% dari seluruh masalah hidrolis), gaya akibat tekanan permukaan dari kompresi elastis biasanya kecil dan dapat diabaikan (Warnock, 1950) di dalam buku (Hughes, 1993). Karena alasan ini, keserupaan dinamik dianggap dapat terpenuhi apabila keserupaan Reynolds dan Froude terpenuhi.

- Keserupaan Reynolds

Dalam keserupaan Reynolds ini dianggap gaya yang diperhitungkan yaitu gaya inersia dan gaya gesekan akibat kekentalan.

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya friksi}} \\ &= \frac{\rho L^2 L^2}{\mu v L} = \frac{\rho v L}{\mu} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Keserupaan terjadi jika terdapat kesamaan angka Reynold antara model dengan prototype,

$$\left(\frac{\rho v L}{\mu} \right)_p = \left(\frac{\rho v L}{\mu} \right)_m \quad (2.23)$$

- Keserupaan Froude

Gaya gravitasi dan gaya inersia dianggap dominan pada keserupaan Froude:

$$\begin{aligned} N_{Fi} &= N_{Fg} \\ \frac{V_p}{(g_p L_p)^{1/2}} &= \frac{V_m}{(g_m L_m)^{1/2}} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Suku $F_r = \frac{v}{\sqrt{gL}}$ disebut dengan Bilangan Froude

2.2.4.2 Analisa Dimensi

Konsep dasar analisa dimensi adalah menyatakan variabel fisik yang ada menjadi variabel tak berdimensi dengan jumlah variabel yang lebih sedikit (Sudarto, 2007). Analisa dimensi mengurangi jumlah kerumitan akibat jumlah variabel eksperimen yang mempengaruhi gejala fisik tertentu kemudian menyederhanakan variabel-variabel tersebut menjadi variabel baru yang memiliki dimensi.

Langkah langkah analisa dimensi terdiri dari:

1. Mengidentifikasi variabel independen (variabel yang berdiri sendiri atau tidak bergantung pada variabel lainnya) yang penting.
2. Menentukan variabel yang bersifat dependen (variabel yang bergantung pada variabel lainnya).

3. Menetapkan berapa banyak variabel non-dimensi independen yang dibentuk dan variabel-variabel tersebut.
4. Mengubah sistem variabel ke dalam variabel non-dimensi yang jumlahnya sudah ditentukan sebelumnya.

Manfaat dari analisa dimensi antara lain:

1. Mengurangi jumlah variabel yang diselidiki, sehingga mempermudah pekerjaan.
2. Menghasilkan grafik non-dimensional yang berlaku umum.
3. Mudah untuk digunakan dalam model skala.

2.2.5 Specific Gravity Tanah

Berat jenis (*specific gravity*) tanah adalah angka perbandingan antara berat isi butir tanah dengan berat isi air suling pada volume yang sama dan suhu tertentu. Berat jenis tanah sangat penting diketahui yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan - perhitungan mekanika tanah.

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 + W_1) - (W_3 - W_2)} \quad (2.25)$$

Dengan,

W_1 = Berat piknometer (gr)

W_2 = Berat piknometer dan tanah kering (gr)

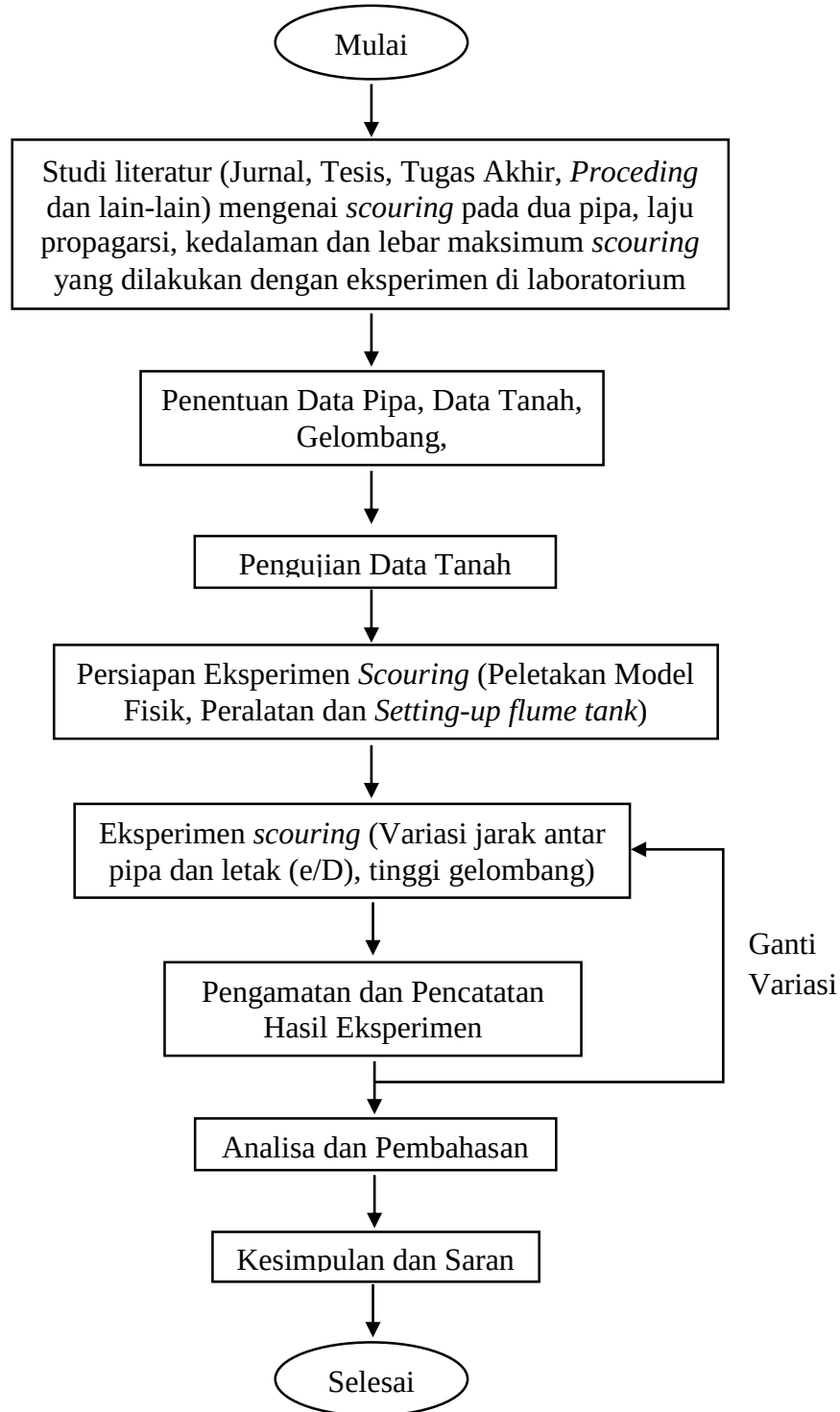
W_3 = Berat piknometer, tanah, dan air (gr)

W_4 = Berat piknometer dan air (gr)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

3.2 Prosedur 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

Studi literatur merupakan tahap yang sangat mendukung proses penelitian tugas akhir ini. Hal ini dilakukan untuk mengumpulkan informasi dan teori tentang *scouring* pada dua pipa yang dilakukan dengan eksperimen di laboratorium. Sehingga dapat dilakukan perhitungan dan analisa setelah mendapatkan hasil eksperimen.

2. Penentuan Data

Tahap selanjutnya adalah menentukan data-data yang berhubungan dengan penelitian ini. Data tersebut meliputi ukuran model pipa yang akan diuji, tanah yang digunakan sebagai letakan pipa, gelombang yang dibangkitkan. Tahap ini bertujuan untuk menentukan asumsi parameter-parameter dan batasan masalah dalam pengujian ini.

3. Pengujian Data Tanah

Sebelum melakukan eksperimen *scouring*, dilakukan pengujian data tanah. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, pengujian data tanah ini bertujuan untuk mengetahui nilai dari d_{50} dan nilai *specific gravity* yang nantinya digunakan untuk eksperimen *scouring*. Tahap ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Kelautan FTK-ITS. Tanah/pasir yang diuji merupakan jenis pasir pantai.

Pada pengujian tanah dilakukan dua pengujian yaitu uji ayakan d_{50} dan uji *specific gravity*. Peralatan yang digunakan untuk pengujian tanah ini adalah sebagai berikut

1. Piknometer 250 ml
2. Cawan

3. Oven
4. Termometer
5. Timbangan digital
6. Saringan
7. Pan
8. *Vacum Pump*

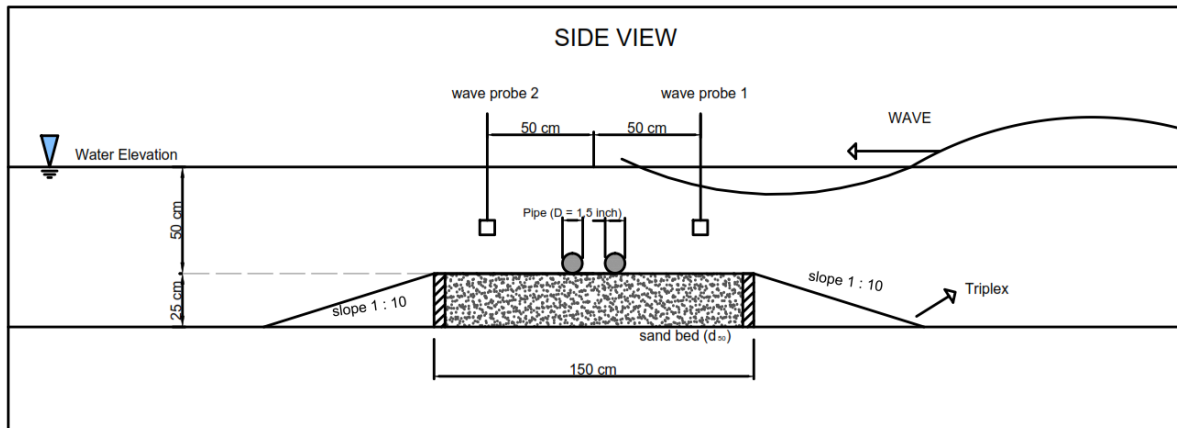
4. Persiapan Eksperimen

a. Persiapan eksperimen *scouring*

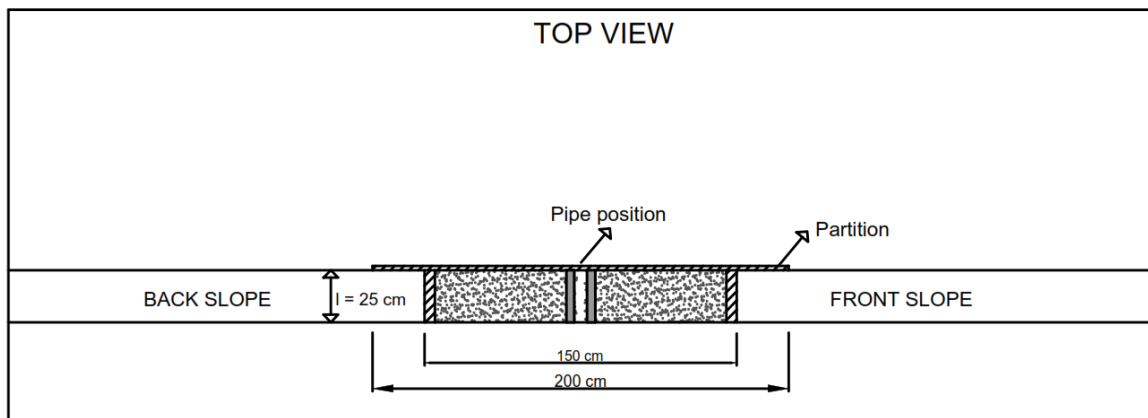
Setelah mengetahui data awal dan tanah yang siap dilakukan pengujian, maka tahap selanjutnya adalah persiapan eksperimen *scouring*. Model pipa yang akan diuji terlebih dahulu harus dilakukan skala untuk menyesuaikan model dengan tempat eksperimen. Pipa yang digunakan sebagai model eksperimen adalah pipa PVC dengan skala geometri 1:10. Pada penelitian sebelum Dimas dan Novia, diameter ukuran pipa yang dimodelkan adalah 1,5 inch karena ukuran sebenarnya adalah 16 inch dan dipasaran tidak ada ukuran model 1,6 inch. Sehingga faktor skala (λ) yang digunakan adalah 1,5/16. Sedangkan panjang pipa yang digunakan adalah 25 cm. Tanah/pasir yang digunakan berasal dari pasir pantai.

Pada penelitian ini membahas tentang pengaruh jarak antar pipa terhadap besarnya *scouring* yang hamper sama dengan penelitian Westerhorstmann yang berjudul *the effect of pipe spacing on marine pipeline scouring*. Penelitian beliau memvariasikan jarak antar pipa dengan pengaruh arus, kombinasi arus dan gelombang kemudian hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya *scouring*. Pada penelitian ini bertujuan untuk melihat efek dari jarak antar pipa dengan pengaruh gelombang regular.

Eksperimen akan diuji seperti sketsa pada gambar 3.2. dan 3.3:



Gambar 3.2. Sketsa Pengujian Tampak Samping



Gambar 3.3. Sketsa Pengujian Tampak Atas

b. Peralatan eksperimen *scouring*

Peralatan yang digunakan dalam eksperimen ini adalah:

1. *Flume tank*

Flume tank pada Laboratorium Energi dan Lingkungan Laut Jurusan Teknik Kelautan FTK ITS berukuran 20 m x 2,3 m x 2,5 m (panjang, lebar, tinggi). Pembangkit angin dengan sistem blower kecepatan maksimum 10 m/s. Pembangkit arus dengan sistem impeller dengan kecepatan 2,5 hingga 10 cm/s. Pembangkit gelombang sistem plunyer dengan karakteristik gelombang regular dan irreguler maksimum 30 cm, periode 0,5 - 3,0 detik, dan kedalaman air maksimum 80 cm. Dalam

eksperimen ini dibutuhkan lebar *flume tank* 25 cm dan pembangkit gelombang reguler. Kedalaman air pada model uji 50 cm.

2. *Wave Probe*

Wave probe merupakan alat perekam tinggi gelombang dimana elektroda yang tercelup air sesuai fluktuasi permukaan air. Dalam penelitian ini *wave probe* yang digunakan berjumlah dua buah yang diletakkan sebelum dan sesudah model uji.

3. Kamera perekam

Setiap proses eksperimen akan direkam menggunakan kamera. Fungsinya yaitu untuk mengetahui pergerakan *scouring* secara visual dan disesuaikan dengan waktu yang terekam. Dengan begitu akan didapat waktu penjaran *scouring*.

4. Penggaris

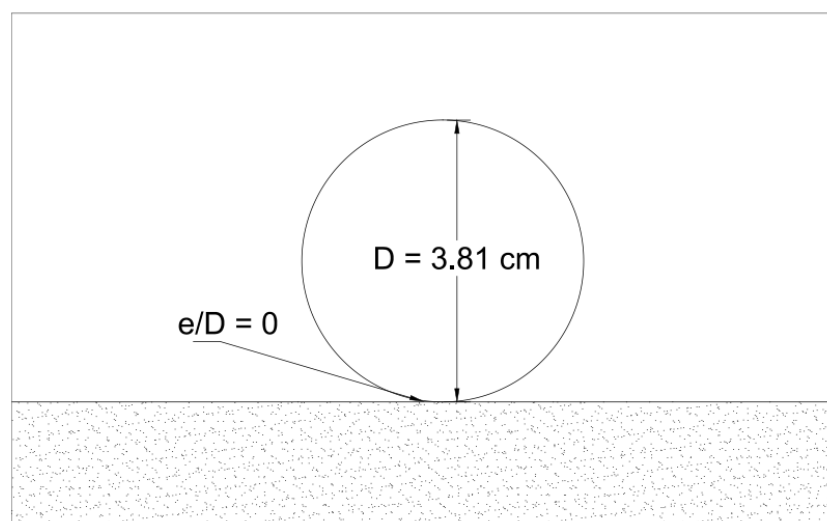
Setelah *running* selesai selalu dilakukan pengukuran kedalaman dan lebar *scouring* untuk mengetahui perubahan yang terjadi.

5. Eksperimen *Scouring*

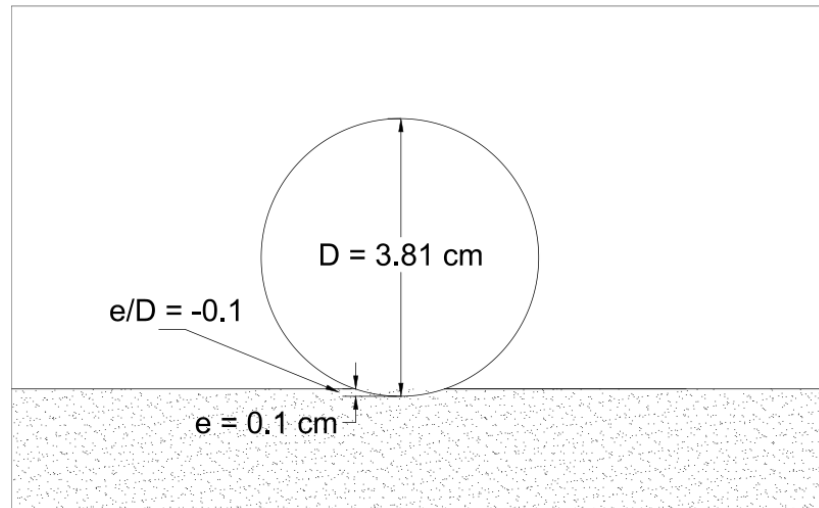
Tahap ini menjadi tahapan yang sangat penting sehingga hal-hal yang sudah dipersiapkan akan dilakukan dan diuji pada tahap ini. Penentuan variasi tinggi gelombang untuk gelombang regular berdasarkan kemampuan dari *flume tank* untuk membangkitkan gelombang. Dalam penelitian ini, terdapat 8 variasi yaitu 3 variasi jarak antar pipa (*gap*), 2 variasi H (tinggi gelombang) dan 2 variasi kondisi peletakan pipa (e/D) mulai dari meletak dan terbenam. Dalam penelitian ini, periode (T) tidak divariasikan. Berikut adalah rincian variasi yang dilakukan pada penelitian ini dan ilustrasi pada tabel 3.1

Tabel 3. 1. Variasi eksperimen yang akan dilakukan

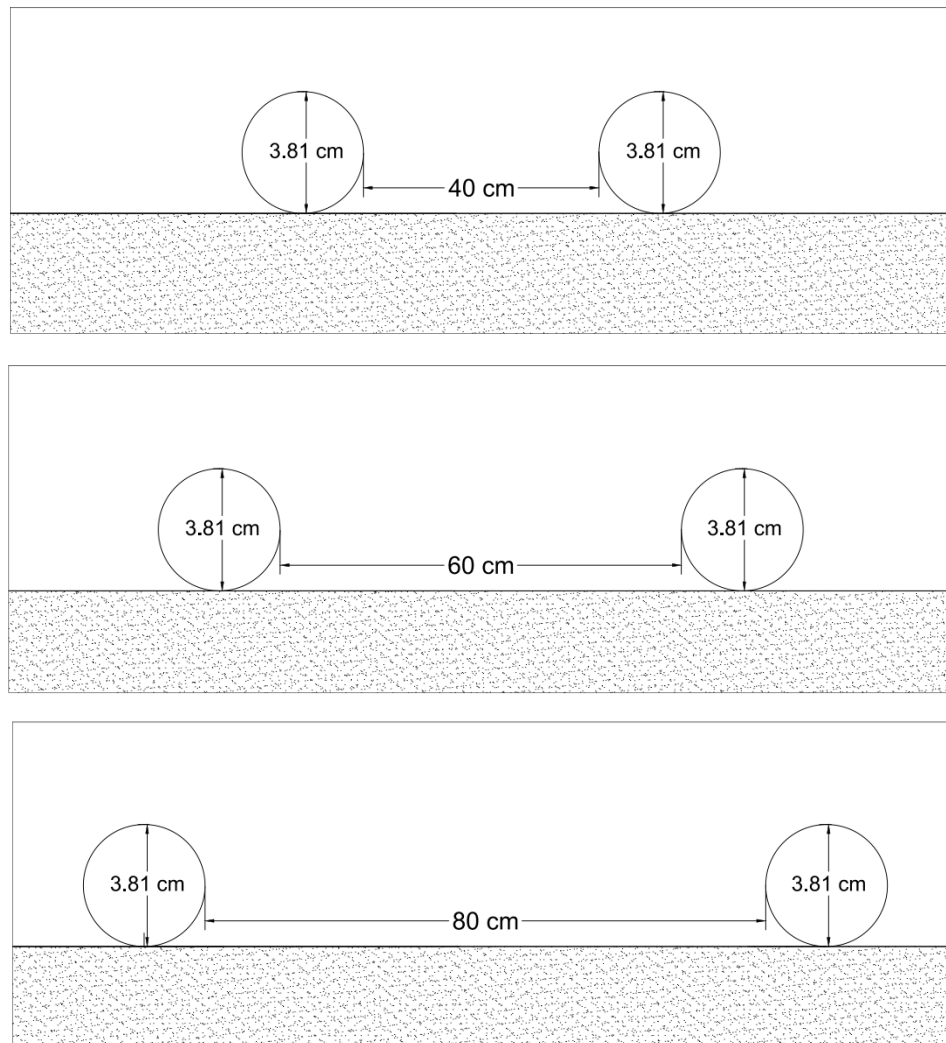
Eksperimen Ke-	T (s)	d (cm)	Gap (cm)	H (cm)	Kondisi Peletakan
1	1	50	40	11	Meletak $e/D = 0$
2	1	50	60	13	Meletak $e/D = 0$
3	1	50	80	11	Meletak $e/D = 0$
4	1	50	40	13	Meletak $e/D = 0$
5	1	50	60	11	Meletak $e/D = 0$
6	1	50	80	13	Meletak $e/D = 0$
7	1	50	40	11	<i>In-Trench</i> $e/D = -0.1$
8	1	50	60	13	<i>In-Trench</i> $e/D = -0.1$
9	1	50	80	11	<i>In-Trench</i> $e/D = -0.1$
10	1	50	40	13	<i>In-Trench</i> $e/D = -0.1$
11	1	50	60	11	<i>In-Trench</i> $e/D = -0.1$
12	1	50	80	13	<i>In-Trench</i> $e/D = -0.1$



Gambar 3.4. Variasi koondisi pipa $e/D = 0$



Gambar 3.5. Variasi koondisi pipa $e/D = -0.1$



Gambar 3.6. Variasi jarak antar pipa (*gap*)

6. Pengamatan dan Pencatatan Hasil Eksperimen

Pada tahap ini dilakukan perekaman dan dokumentasi saat berlangsungnya eksperimen *scouring*. Tiap pengujian akan dilakukan selama 25 menit hingga tidak terjadi penambahan kedalaman *scouring* (kondisi maksimum). Pencatatan data untuk nilai kedalaman dan lebar *scouring* akan dilakukan setiap interval 5 menit dengan menggunakan penggaris. Dan di setiap 5 menit, mesin berhenti selama 1 menit kemudian dinyalakan kembali.

7. Analisa dan Pembahasan

Setelah melakukan eksperimen, hasil kedalaman dan lebar *scouring* yang diperoleh akan dianalisa dan dibahas lebih lanjut untuk memperoleh validasi yang mendekati sama dengan perhitungan empiris. Hasil kedalaman maksimum dan lebar *scouring* akan dibandingkan dengan parameter non dimensional dan untuk laju propagasi ditunjukkan dengan grafik perubahan kedalaman *scouring* tiap interval waktu 5 menit selama 20 menit. Kemudian hasil tersebut akan diolah dalam Autocad untuk mengetahui profil 2D *scouring*.

8. Kesimpulan dan Saran

Tahap terakhir yaitu menyimpulkan hasil yang diperoleh dari eksperimen *scouring* pada dua pipa dan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Eksperimen dilakukan untuk mengetahui hasil nilai kedalaman dan lebar *scouring*, laju propagarsi *scouring* serta hubungan-hubungan parameter tak berdimensi. Pada eksperimen *scouring* pada dua pipa dilakukan beberapa variasi yaitu, jarak antar pipa (*Gap*), tinggi gelombang (*H*), dan kondisi peletakan pipa (*e/D*). Pengamatan dan pencatatan hasil *scouring* dilakukan setiap 5 menit sekali sampai pipa mengalami kedalaman dan lebar *scouring* maksimum. Untuk itu data hasil eksperimen akan ditunjukkan dan dianalisa lebih lanjut.

4.1 Pengujian Tanah

Pengujian tanah dilakukan sebelum eksperimen *scouring* meliputi uji ayakan tanah dan *specified gravity*, yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik tanah termasuk nilai *d50* dan *specified gravity* (*SG*). Dengan mengetahui nilai *d50* dan *SG* dapat digunakan sebagai perhitungan *scouring* secara numerik. Berikut hasil pengujian tanah yang digunakan untuk analisa *scouring* pada dua pipa pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Analisa pembagian butir tanah (gradasi)

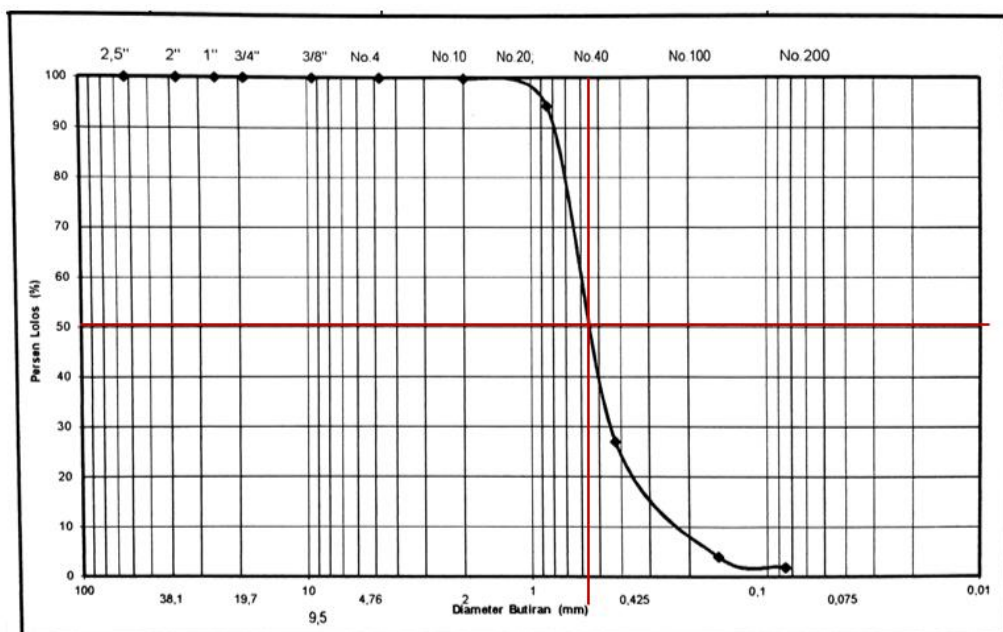
Berat tanah kering		=		500	Gr
Berat mangkok		=		26.95	Gr
Sieve		Berat Tertahan		% Tertahan	% Lolos
#	Diameter (mm)	Gr			
2 5"	63				100
1 1/2"	37.5				100
1"	25.4				100
3/4"	19.1				100
3/8"	9.5				100
4	4.76				100
10	2	27.45	0.5	0.1	99.9
20	0.85	54.44	27.5	5.5	94.4
40	0.425	363.96	337	67.4	27
100	0.149	141.57	114.6	22.92	4.08
200	0.075	37.66	10.7	2.14	1.93
Pan		35.15	8.2	1.64	
			498.5	99.71	

Tabel 4.1 menunjukkan hasil pembagian butir tanah dalam pengujian ayakan dari tanah yang lolos sampai yang tertahan (kolom 6 yang digunakan dalam grafik) dan berat yang masuk sebelum diuji dan sesudah harus sama. Kemudian didapat juga hasil komposisi butiran tanah yaitu pasir dengan nilai **98.07%** seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2. Komposisi butiran

1. Kerikil	(%)	=	0
2. Pasir	(%)	=	98.07
3. Butiran halus (lanau-lempung)	(%)	=	1.93
4. D. 60		=	0.6
5. D. 30		=	0.45
6. D. 10		=	0.23
Coeff. Uniformity (Cu) = D_{60}/D_{10}			2.61
Coeff. Gradation (Cc) = $D_{30}^2/D_{60} \cdot D_{10}$			1.4674

Nilai d_{50} yang digunakan untuk analisa *scouring* diperoleh dari hasil grafik pengolahan pembagian butiran tanah. Berikut adalah grafik pembagian butiran tanah.



Gambar 4.1. Grafik analisa pembagian butiran tanah

Pada gambar 4.1 diperoleh nilai d50 dari grafik dengan menarik garis horizontal dari kiri di titik angka d50 ke kanan yang kemudian berpotongan dengan grafik. Titik perpotongan antar garis horizontal dan grafik kemudian dibuat garis vertikal ke bawah dari titik potong sehingga diperoleh nilai d50. Nilai d50 pada pengujian ini adalah **0.56 mm**.

Setelah mengetahui nilai d50 dari uji ayakan kemudian dilakukan uji *specified gravity* (SG) dengan bantuan alat piknometer. Berikut adalah hasil pengujian *specified gravity* (SG) pada tabel 4.3

Tabel 4.3. Hasil pengujian *specified gravity*

Nomor Piknometer		23	12
Berat piknometer + air suling	(gr)	336.21	352.39
Berat pikmo. + air + tanah kering	(gr)	349.48	366.23
Angka pori		1.122	1.045
Temperatur	(C)	28	28
Specified Gravity		2.653	2.662

Dari tabel 4.3 diperoleh nilai SG tanah tersebut adalah rata-rata dari pengujian SG pada piknometer nomor 23 dan 12 yaitu **2.658**.

4.2 Analisa Dimensi Model Eksperimen

Analisa dimensi bertujuan untuk meyerhanakan permasalahan *scouring* pada dua pipa pada kondisi lapangan agar dapat dilakukan eksperimen di laboratorium sehingga pertimbangan dalam desain selanjutnya.

Pada kondisi lapangan, instalasi dua pipa bawah laut atau lebih memungkinkan terjadinya *scouring* sehingga diperlukan perencanaan yang demikian agar tidak terjadi *scouring* maksimum. Jarak antar pipa satu dengan lainnya (*gap*) menjadi salah satu aspek yang penting dalam desain instalasi pipa bawah laut. Berdasarkan DNV RP F109 pergerakan lateral horisontal pipa adalah 10xdiameter jika pipa beroperasi di area atau rute dimana tidak ada aktivitas manusia. Salah satu penelitian Shaohui dan Qingshang (2011), yang berjudul “*Identifying Minimum Safe Distance between Adjacent Parallel Pipelines*” mengatakan bahwa jarak yang paling efektif untuk pemasangan dua pipa bawah

laut adalah 10 m dari pertimbangan aspek konstruksi pipa, dampak lingkungan, kecepatan partikel, dan katodik proteksi pipa.

Berdasarkan referensi di atas dapat dilakukan analisa dimensi untuk eksperimen *scouring* pada dua pipa di dalam laboratorium.

a. Ukuran pipa

Data aktual pipa yang digunakan sebagai penelitian adalah mengacu pada penelitian sebelumnya sebagai berikut:

- Diameter pipa (D) = 16 inch
- Tebal pipa (t) = 0.5 inch

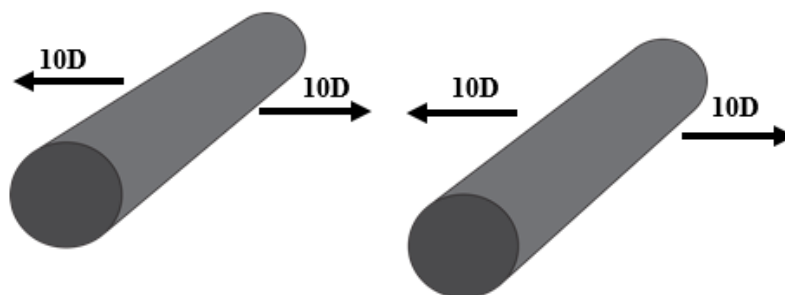
Dengan ukuran tersebut dilakukan skala untuk eksperimen yaitu **1: 10**.

Sehingga didapatkan ukuran model lab sebagai berikut:

- Diameter pipa (D) = 1.6 inch = 3.81 cm
- Tebal pipa (t) = 0.05 inch = 0.127 cm (berat diabaikan)

b. Variasi jarak antar pipa (gap)

Besar jarak antar pipa yang akan divariasikan mengacu pada referensi dari DNV RP F109 yang menyebutkan bahwa 10D adalah besar maksimum pergerakan lateral horizontal pipa seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Jarak dua pipa berdasarkan nilai pergerakan lateral pipa

Dapat dilihat bahwa jarak yang direkomendasikan untuk instalasi dua pipa atau lebih yang sejajar memiliki jarak yang aman yaitu **20D** (2x diameter).

Pada ukuran skala pipa laboratorium 1: 10 didapatkan nilai $20 \times$ diameter pipa skala yaitu $20 \times 3.81 \text{ cm} = 76.2 \text{ cm}$ yang dibulatkan menjadi **80 cm**. Variasi jarak yang digunakan dalam eksperimen *scouring* adalah sebagai berikut **80 cm, 60 cm, 40 cm**. Jarak tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh jarak terhadap besar atau kecilnya *scouring* pada pipa dan memberikan referensi baru untuk instalasi dua pipa atau lebih di lapangan.

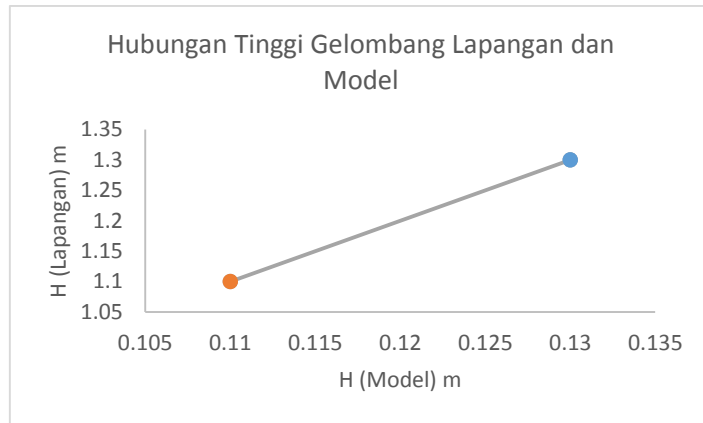
c. Hubungan Kondisi Lingkungan Model dan Lapangan

Kondisi lingkungan atau parameter yang digunakan dalam eksperimen mengacu dalam beberapa data dari aktual lapangan seperti tinggi gelombang (H), periode (T), dan data utama pipa. Dalam eksperimen ini gelombang yang dibangkitkan adalah gelombang regular dengan skala perbandingan aktual dengan model yaitu 1:10. Hubungan parameter ini bertujuan untuk mempresentasikan kondisi lapangan dan model dengan skala tertentu. Dengan menggunakan persamaan keserupaan, didapatkan beberapa nilai dari perhitungan keserupaan dimensi pada tabel 4.4.

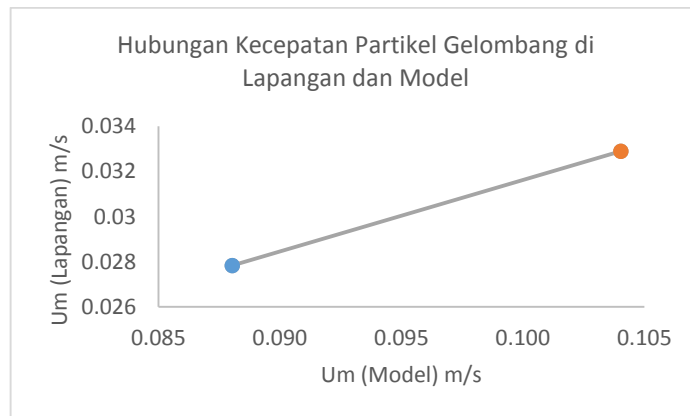
Tabel 4.4. Nilai perhitungan keserupaan dimensi

No	Parameter	Skala		Satuan
		Model	Lapangan	
1	H (Tinggi Gelombang)	0.13	1.3	m
		0.11	1.1	m
2	h (Kedalaman)	0.5	5	m
3	T (Periode)	1	0.003162	s
4	Um (Kecepatan Partikel Gelombang)	0.088	0.028	m/s
		0.104	0.033	m/s
5	Gap (Jarak Antar Pipa)	0.4	4	m
		0.6	6	m
		0.8	8	m

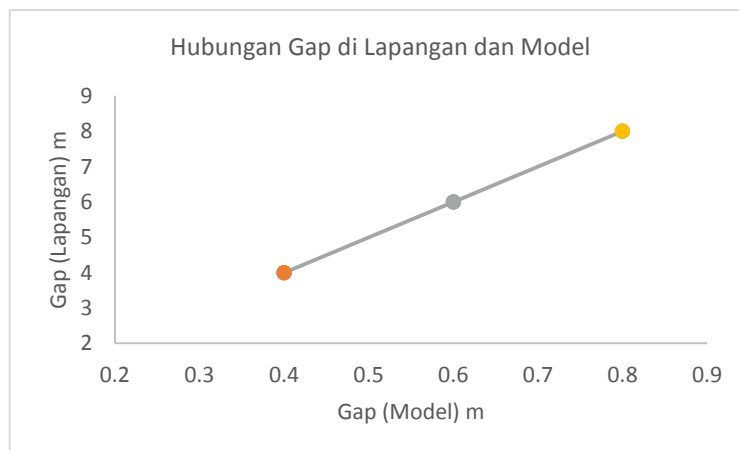
Pada analisa dimensi kondisi lingkungan model eksperimen dan lapangan ditunjukkan oleh grafik hubungan antara parameter model dan lapangan yang dapat memberikan interpretasi untuk nilai lainnya ketika dihubungkan. Berikut parameter seperti tinggi gelombang, kecepatan partikel gelombang, dan jarak antar pipa (*gap*) yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4.3. Hubungan tinggi gelombang lapangan dan model



Gambar 4.4. Hubungan kecepatan partikel gelombang lapangan dan model



Gambar 4.5. Hubungan jarak antar pipa (gap) lapangan dan model

Pada contoh ketiga grafik di atas dapat dihubungkan sumbu x dan sumbu y untuk mengetahui nilai keserupaan dimensi dari kondisi lapangan atau dari

model eksperimen. Pada ketiga grafik di atas mempunyai nilai yang dapat dihubungkan jika memotong garis linier tersebut.

4.3 Pengolahan Data Gelombang

Data gelombang diperoleh saat pengujian dilakukan dilaboratorium *flumetank* dengan alat *wave probe*. *Wave probe* digunakan untuk merekam gelombang berupa elevasi muka air dengan fungsi waktu (*time series*). Pemasangan *wave probe* di letakkan di depan dan belakang model eksperimen. Waktu pencatatan setiap 5 menit sekali. Alat tersebut dengan tiap detiknya mencatat 25 data elevasi gelombang. Hasil data gelombang akan diolah lebih lanjut dengan menggunakan software Matlab. Berikut adalah data dan analisis gelombang regular dari software bantu Matlab:

a. Kalibrasi *waveprobe*

Kalibrasi *waveprobe* bertujuan untuk menyetting hubungan antara sensor probe dengan posisi kedalaman air yang tercatat agar saat eksperimen didapatkan elevasi muka air tiap satuan waktu (*time series*) dengan hasil yang baik. Hasil kalibrasi muka air dengan kedalaman 80 cm dapat ditunjukkan dalam gambar 4.6.

Sensor	RAW Data	Min. (0 mm)	Max. (800 mm)
Channel 1	0	0	
Channel 2	0	1862	3534
Channel 3	0	1860	3557
Channel 4	0	1838	3522
Channel 5	0	0	0
Channel 6	0	0	0
Channel 7	0	0	0
Channel 8	0	0	0
Channel 9	0	0	0
Channel 10	0	0	0

Select max depth for calibration: 800 mm

Buttons: Disonnect, Connect, Save, OK, Cancel

Gambar 4.6. Kalibrasi *waveprobe*

b. Tinggi dan periode gelombang

Setelah diperoleh data mentah dari hasil eksperimen dengan tinggi gelombang 11 cm dan 13 cm, kemudian mencari nilai tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang signifikan untuk digunakan sebagai analisa *scouring*. Pada analisa pengolahan data dengan software Matlab didapatkan nilai tinggi dan periode gelombang signifikan yaitu masing-masing untuk tinggi gelombang input 11 cm adalah **10.4** cm dan **0.9** detik dan untuk 13 cm adalah **12.6** cm dan **0.9** detik. Data tersebut diambil dari alat pencatat elevasi gelombang (probe) yang berada di depan model pengujian. Berikut contoh *output* gelombang dari software matlab pada gambar 4.7. dan 4.8.

Wave Statistics

Up-Crossing (1), Down-Crossing (2) or Average (3)?: 3

```
Number of Waves           = 322
Average Wave Period       = 0.9332 seconds
Significant Wave Height   = 10.9301 centimetres
Maximum Wave Height       = 11.6000 centimetres
Average Wave Height       = 10.4118 centimetres
rms Wave Height           = 10.4225 centimetres
Average of Highest 1/10   = 11.3697 centimetres
Sigmaz                    = 1.6206 centimetres
```

Gambar 4.7. Output data gelombang 11 cm dari matlab (wavan)

Wave Statistics

Up-Crossing (1), Down-Crossing (2) or Average (3)?: 3

```
Number of Waves           = 128
Average Wave Period       = 0.9400 seconds
Significant Wave Height   = 13.0684 centimetres
Maximum Wave Height       = 11.1501 centimetres
Average Wave Height       = 10.2705 centimetres
rms Wave Height           = 10.2780 centimetres
Average of Highest 1/10   = 10.8824 centimetres
Sigmaz                    = 2.3490 centimetres
```

Gambar 4.8. Output data gelombang 13 cm dari matlab (wavan)

4.4 Hasil Eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan 12 variasi percobaan dengan 3 perubahan *gap*, 2 tinggi gelombang (H), dan 2 kondisi peletakan (e/D). Waktu yang digunakan saat pengujian selama 25 menit namun ada beberapa pengujian yang hanya menggunakan 20 menit dikarenakan *scouring* sudah mengalami *equilibrium stage*. Pada hasil ini juga ditunjukkan dengan profil *scouring* 2D dari Autocad yang dibentuk menjadi profil *scouring* Ms. Excel setiap variasi.

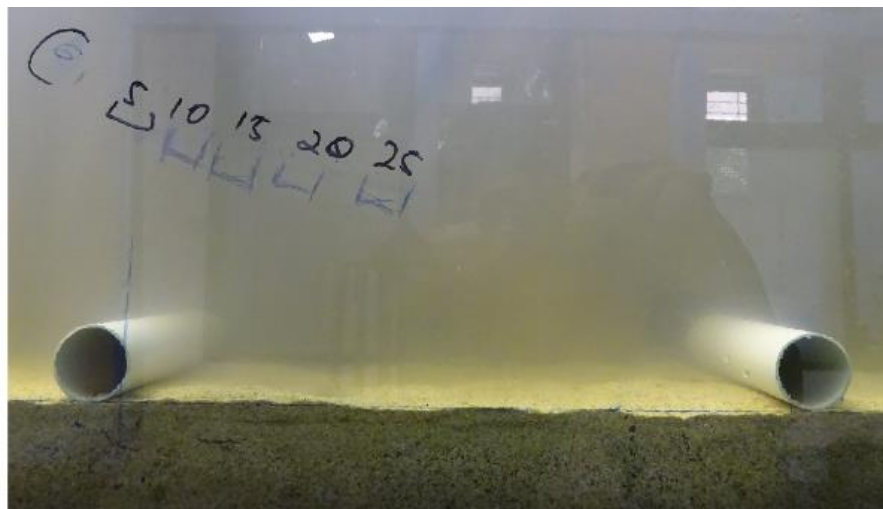
4.4.1 Kondisi Dua Pipa Meletak

Pengujian pertama untuk kondisi dua pipa meletak dilakukan dengan memvariasikan jarak yaitu 40 cm, 60 cm dan 80 cm dengan tinggi gelombang yang sama yaitu 11 cm dan 13 cm berjenis regular.

4.4.1.1 Kondisi Gelombang 11 cm

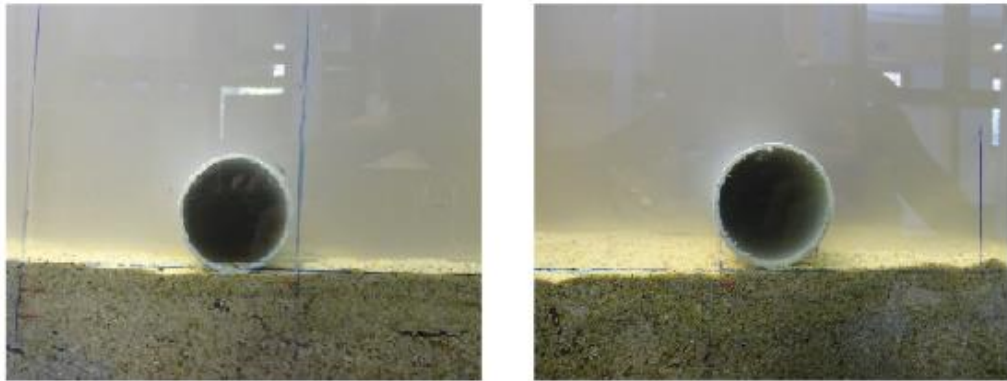
a. Jarak 40 cm

Kondisi dua pipa dengan jarak 40 cm terilustrasi seperti pada gambar 4.9 dan memiliki $e/D = 0$ (meletak).



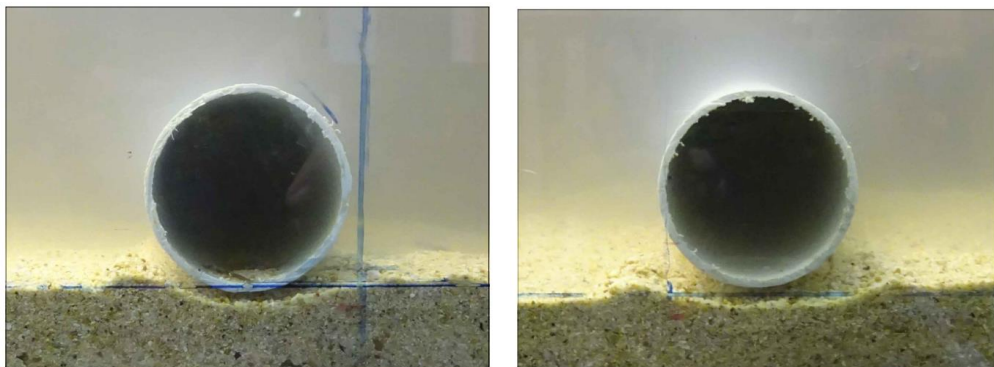
Gambar 4.9. Kondisi dua pipa meletak jarak 40 cm ($H = 11$ cm)

Gambar 4.10 menunjukkan kondisi kedua pipa a) *downstream pipe* b) *upstream pipe* pada kondisi awal ($t = 0$ s)



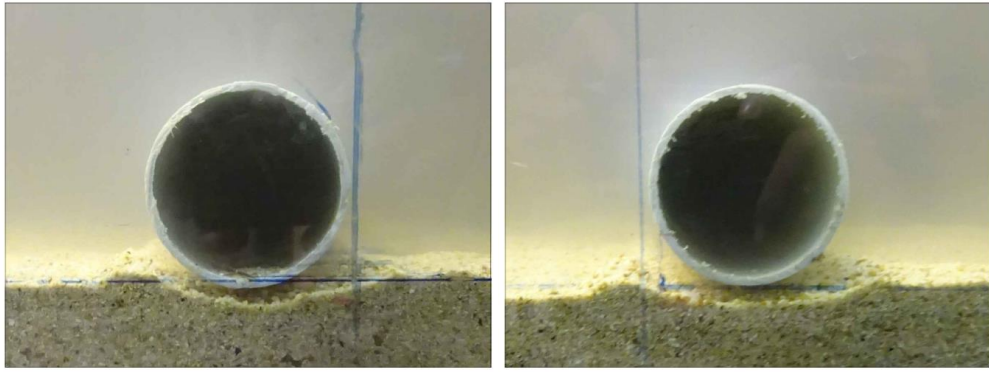
Gambar 4.10. Kondisi $t = 0$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Pada gambar 4.11 untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa sudah mulai mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.31 cm** dan **3.69 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.27 cm** dan **3.17 cm** untuk *downstream pipe*.



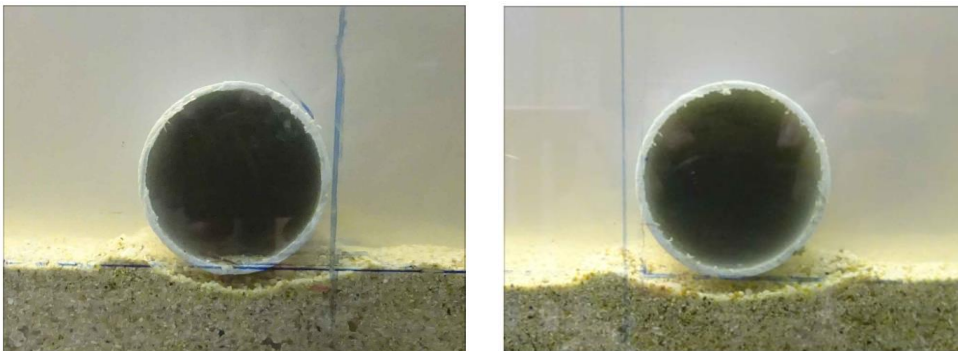
Gambar 4.11. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Setelah pengujian berlangsung selama $t = 15$ menit, dua pipa mengalami *scouring* dengan profil seperti gambar 4.12. Kedua pipa memiliki masing masing kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi akibat gelombang regular. Kedalaman dan lebar *scouring* **0.32 cm** dan **3.8 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.31 cm** dan **3.46 cm** untuk *downstream pipe*.



Gambar 4.12. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Setelah pengujian dilakukan hingga $t = 25$ menit, tidak terjadi penambahan kedalaman dan lebar *scouring* namun selang waktu $t = 15$ menit sampai $t = 20$ menit masih terjadi perubahan *scouring*. Berikut hasil profil akhir *scouring* pada gambar 4.13 dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.36 cm** dan **3.83 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.32 cm** dan **3.57 cm** untuk *downstream pipe*.



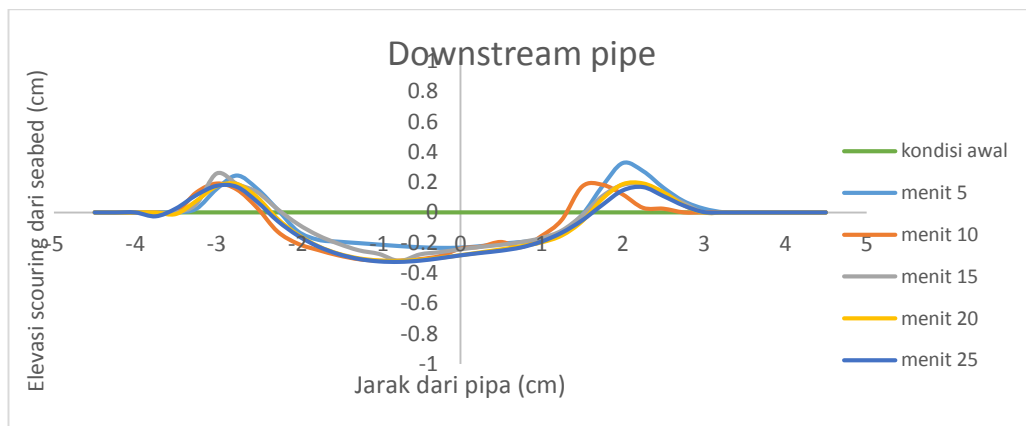
Gambar 4.13. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Bentuk profil *Scouring* 2D untuk setiap interval 5 menit pada dua pipa seperti grafik pada gambar berikut:

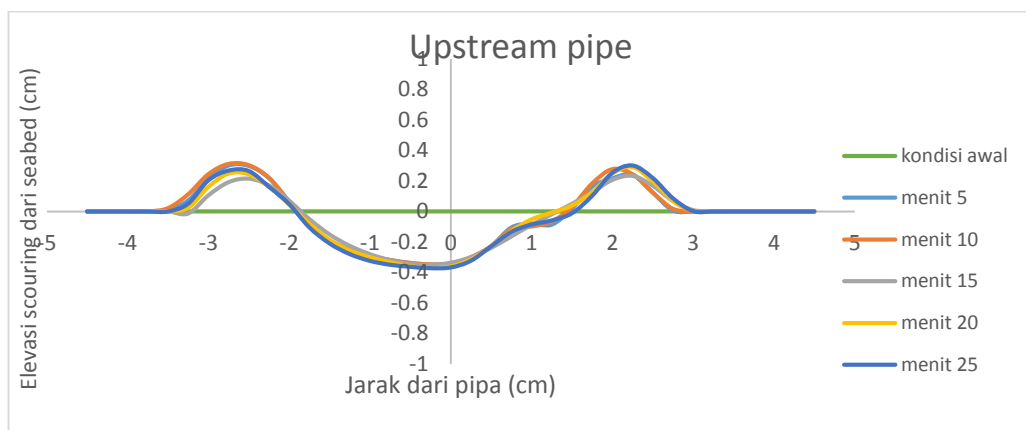


Gambar 4.14. Profil 2D *scouring* dua pipa meletak jarak 40 cm

Jika diperbesar memiliki profil seperti gambar berikut untuk pipa belakang dan pipa depan:



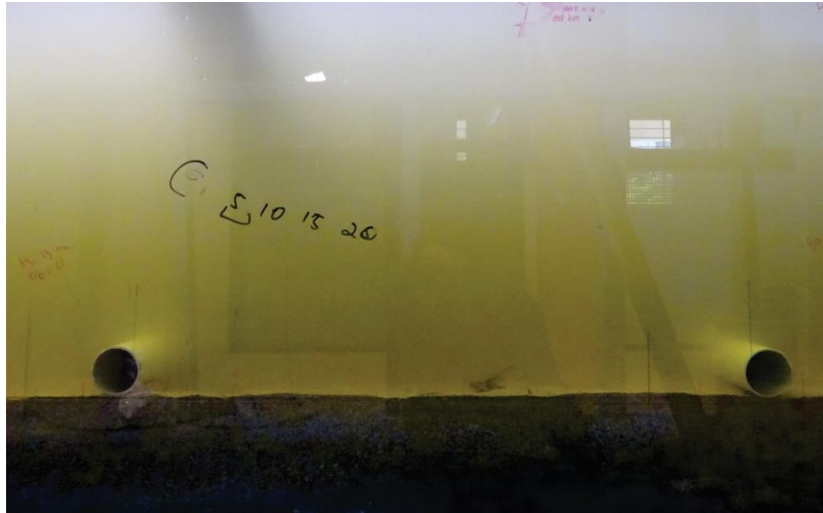
Gambar 4.15. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 40 cm, (downstream)



Gambar 4.16. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 40 cm (upstream)

b. Jarak 60 cm

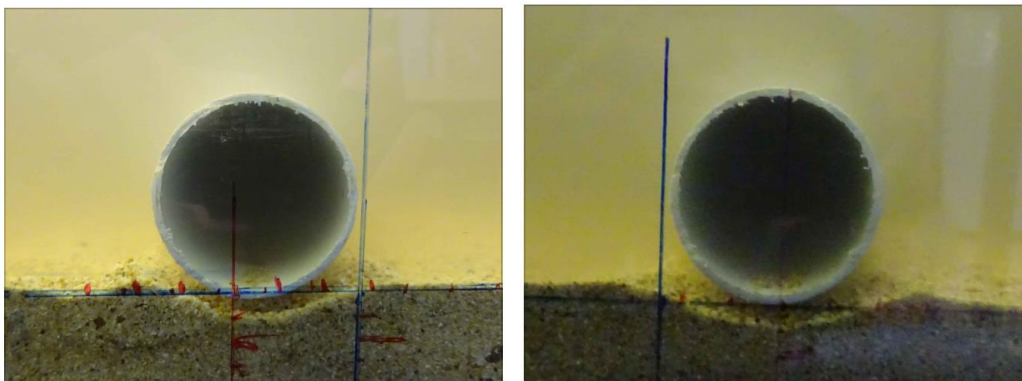
Kondisi dua pipa dengan jarak 60 cm terilustrasi seperti pada gambar 4.17 dan memiliki $e/D = 0$ (meletak).



Gambar 4.17. Kondisi dua pipa meletak jarak 60 cm

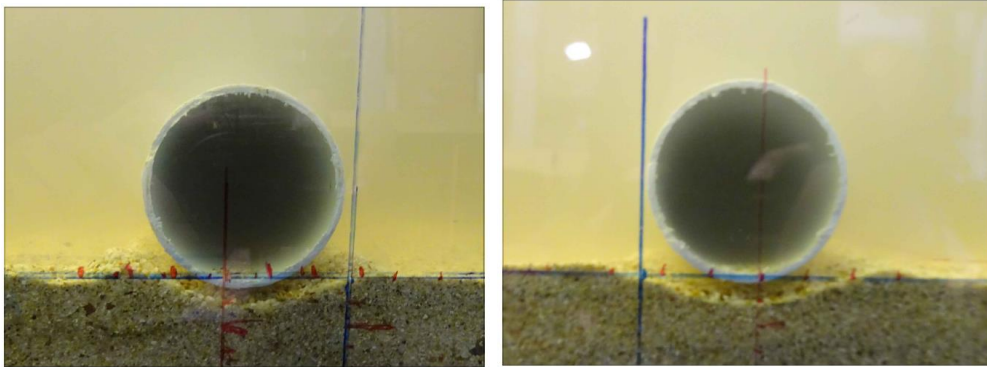
Kondisi dua pipa dengan jarak 60 cm kondisi $e/D = 0$ (meletak) ditunjukkan profil scouring hanya waktu 5 menit, 15 menit dan 25 menit. Pada lampiran nanti akan dijelaskan lebih lengkap *scouring* tiap waktu 5 menit sekali.

Pada gambar 4.18. untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa sudah mulai mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.4 cm** dan **3.71 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.32 cm** dan **3.2 cm** untuk *downstream pipe*.



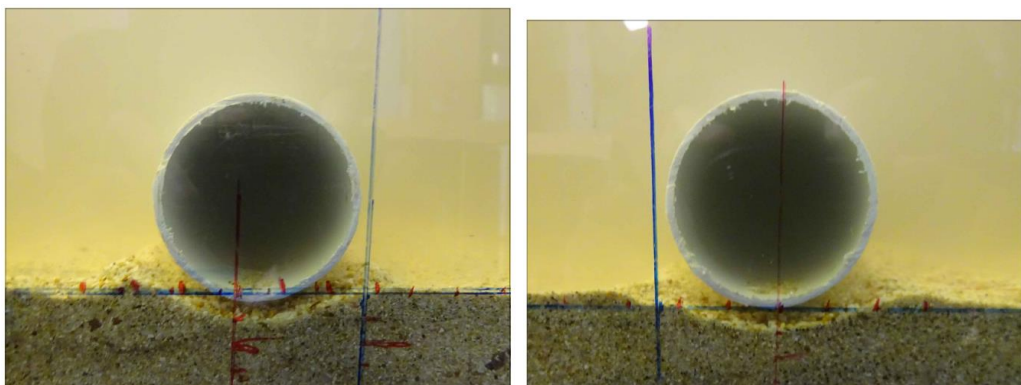
Gambar 4.18. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Setelah pengujian berlangsung selama $t = 15$ menit, dua pipa mengalami *scouring* dengan profil seperti gambar 4.19. Kedua pipa memiliki masing masing kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi akibat gelombang regular. Kedalaman dan lebar *scouring* **0.43 cm** dan **3.8 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.34 cm** dan **3.46 cm** untuk *downstream pipe*.



Gambar 4.19. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

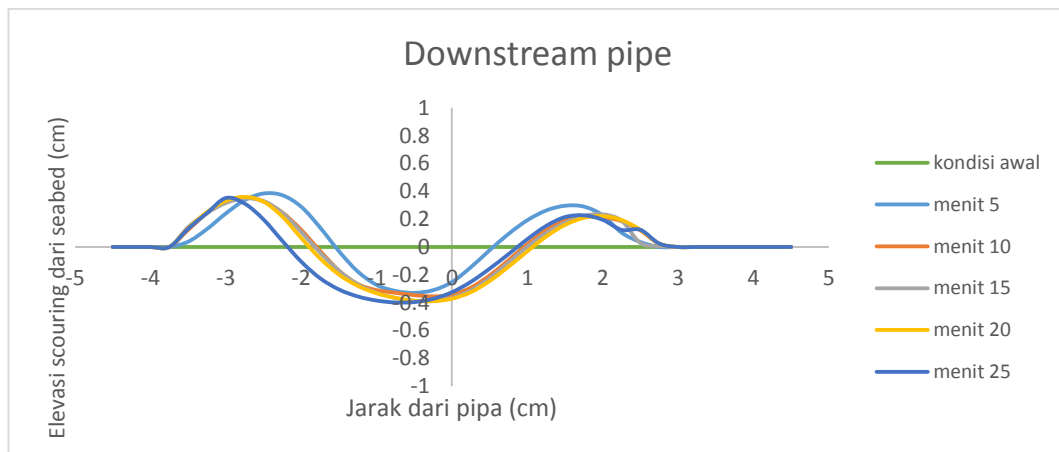
Setelah pengujian dilakukan hingga $t = 25$ menit, tidak terjadi penambahan kedalaman dan lebar *scouring* namun selang waktu $t = 15$ menit sampai $t = 20$ menit masih terjadi perubahan *scouring*. Berikut hasil profil akhir *scouring* pada gambar 4.20. dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.45 cm** dan **3.84 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.37 cm** dan **3.6 cm** untuk *downstream pipe*.



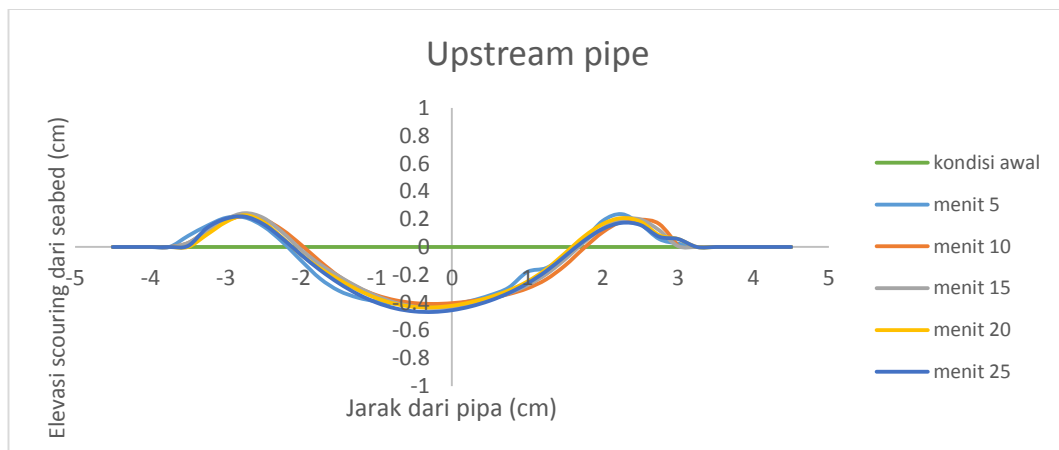
Gambar 4.20. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.21. Profil 2D *scouring* dua pipa meletak jarak 60 cm, $H = 11$ cm



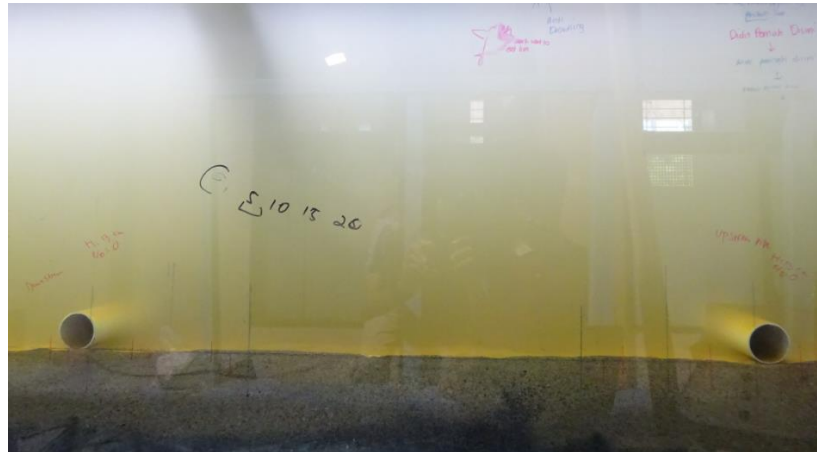
Gambar 4.22. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 60 cm (downstream)



Gambar 4.23. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 60 cm (upstream)

c. Jarak 80 cm

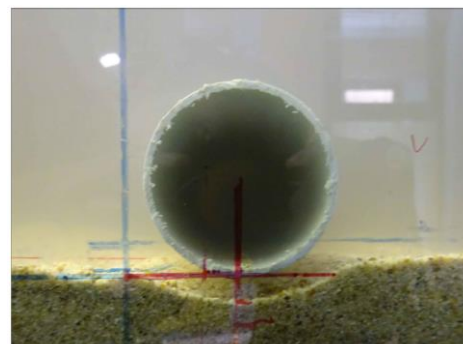
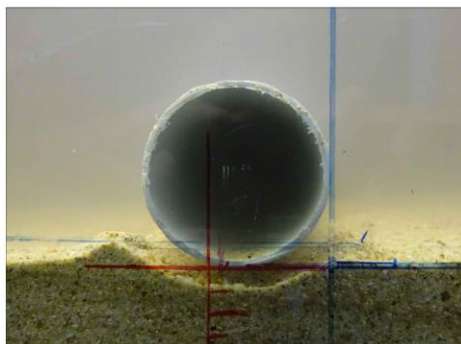
Kondisi dua pipa dengan jarak 80 cm terilustrasi seperti pada gambar 4.24. dan memiliki $e/D = 0$ (meletak).



Gambar 4.24. Kondisi dua pipa meletak jarak 80 cm

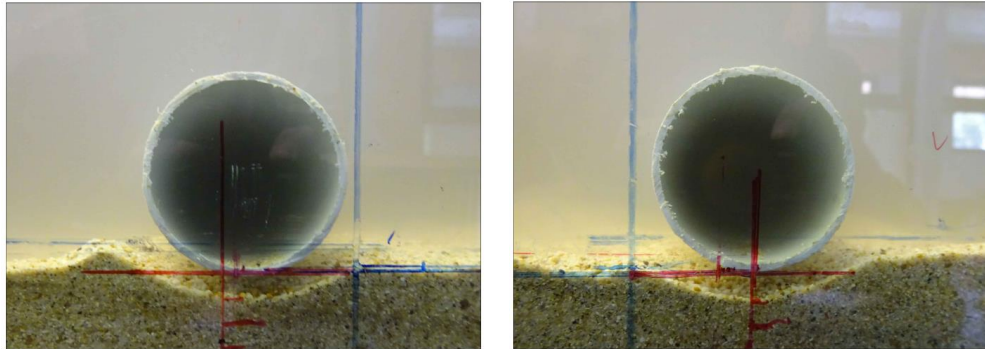
Kondisi dua pipa dengan jarak 80 cm kondisi $e/D = 0$ (meletak) ditunjukkan profil scouring hanya waktu 5 menit, 15 menit dan 25 menit. Pada lampiran nanti akan dijelaskan lebih lengkap *scouring* tiap waktu 5 menit sekali.

Pada gambar 4.25. untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa sudah mulai mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.49 cm** dan **3.75 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.4 cm** dan **3.22 cm** untuk *downstream pipe*.



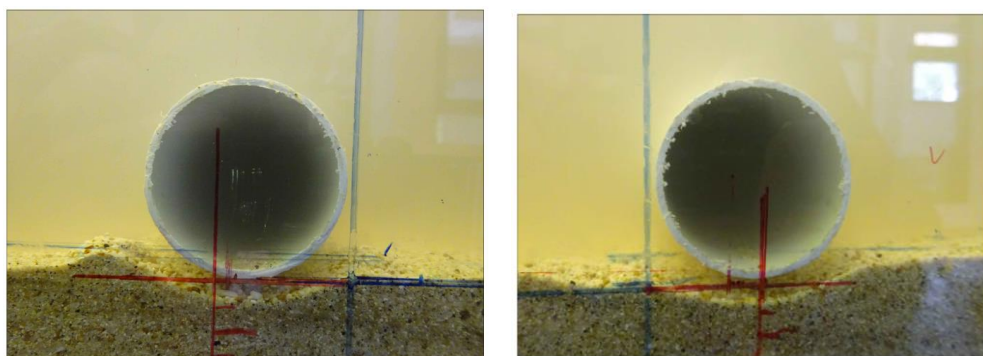
Gambar 4.25. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Setelah pengujian berlangsung selama $t = 15$ menit, dua pipa mengalami *scouring* dengan profil seperti gambar 4.26. Kedua pipa memiliki masing-masing kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi akibat gelombang regular. Kedalaman dan lebar *scouring* **0.51 cm** dan **3.82 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.45 cm** dan **3.6 cm** untuk *downstream pipe*.

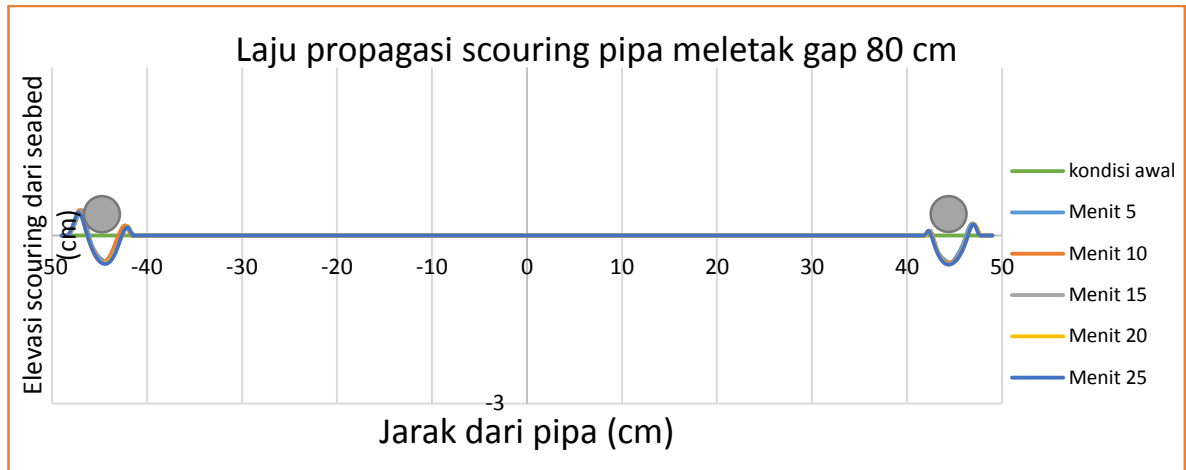


Gambar 4.26. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

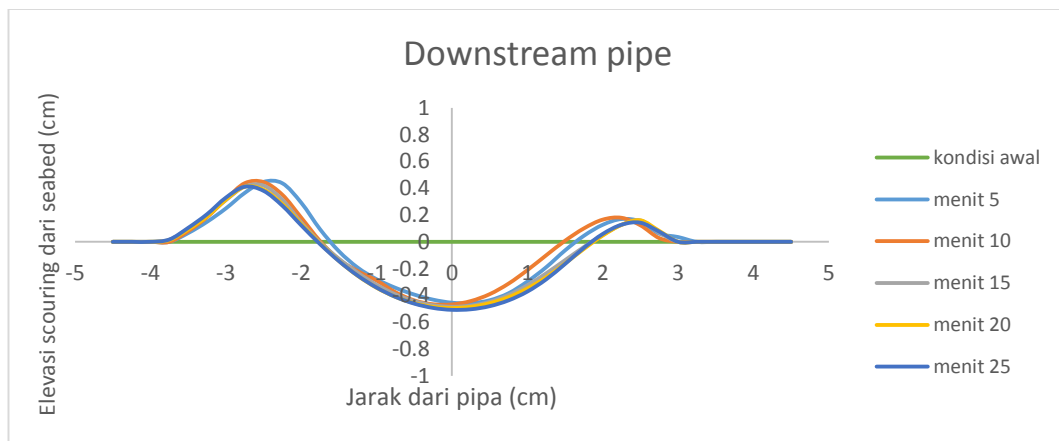
Setelah pengujian dilakukan hingga $t = 25$ menit, tidak terjadi penambahan kedalaman dan lebar *scouring* namun selang waktu $t = 15$ menit sampai $t = 20$ menit masih terjadi perubahan *scouring*. Berikut hasil profil akhir *scouring* pada gambar 4.27 dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.54 cm** dan **3.86 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.5 cm** dan **3.65 cm** untuk *downstream pipe*.



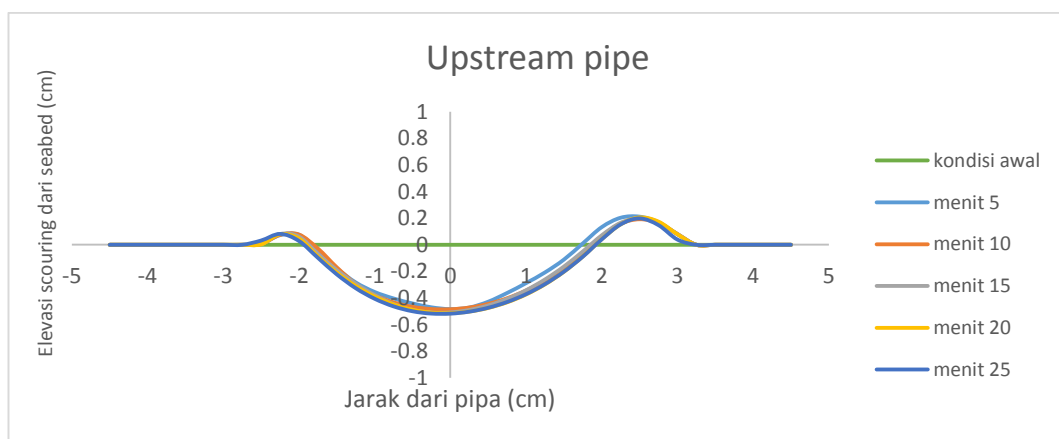
Gambar 4.27. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.28. Profil 2D *scouring* dua pipa meletak jarak 80 cm



Gambar 4.29. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 80 cm (downstream)



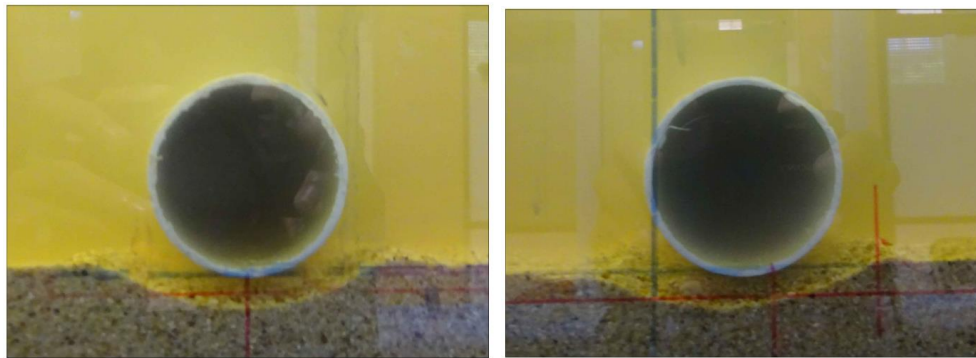
Gambar 4.30. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 80 cm, (upstream)

4.4.1.2 Kondisi Gelombang 13 cm

Pada eksperimen dengan kondisi tinggi gelombang 13 cm mempunyai bentuk profil *scouring* yang sama dengan profil *scouring* 11 cm namun mempunyai kedalaman dan lebar *scouring* yang lebih besar.

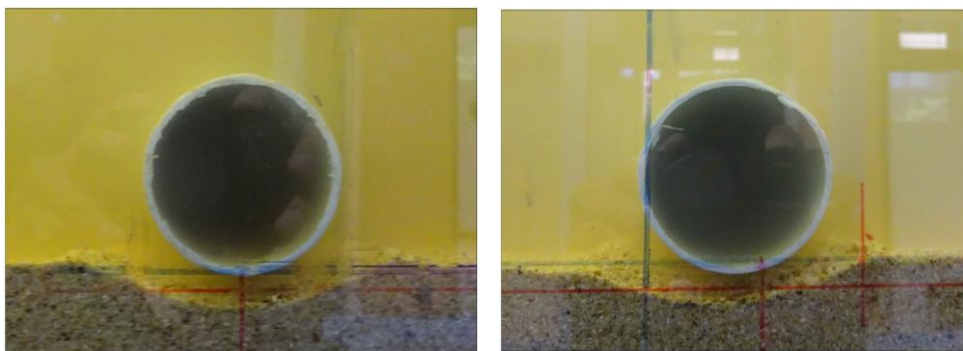
a. Jarak 40 cm

Pada gambar 4.31. untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.47 cm** dan **4.78 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.52 cm** dan **4.26 cm** untuk *downstream pipe*.



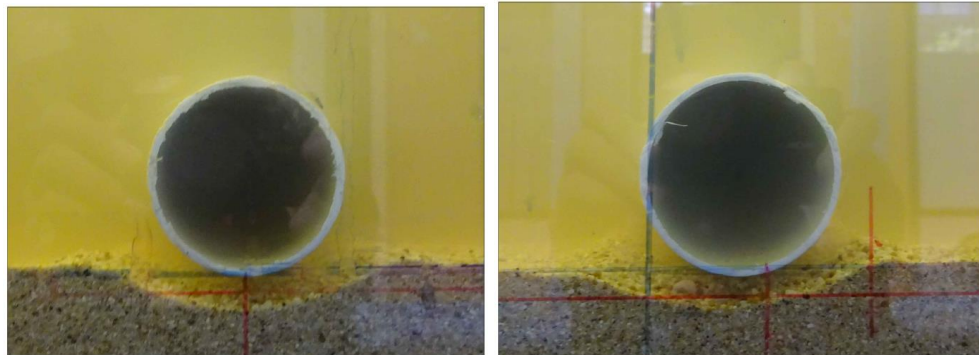
Gambar 4.31. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Pada menit ke-15, dua pipa mengalami *scouring* dengan profil seperti gambar 4.32. Kedua pipa memiliki masing masing kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi akibat gelombang regular. Kedalaman dan lebar *scouring* **0.5 cm** dan **4.91 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.57 cm** dan **4.48 cm** untuk *downstream pipe*.



Gambar 4.32. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

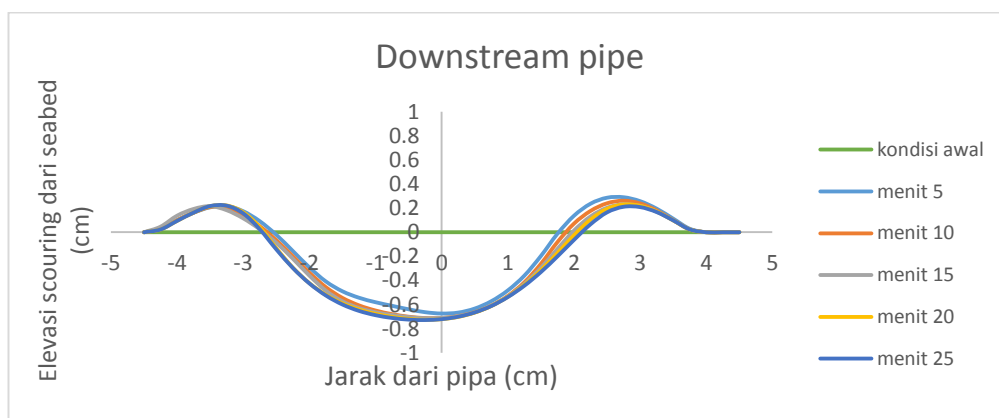
Berikut hasil profil akhir ($t = 25$ menit) *scouring* pada gambar 4.33. dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.51 cm** dan **5.04 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.58 cm** dan **4.5 cm** untuk *downstream pipe*.



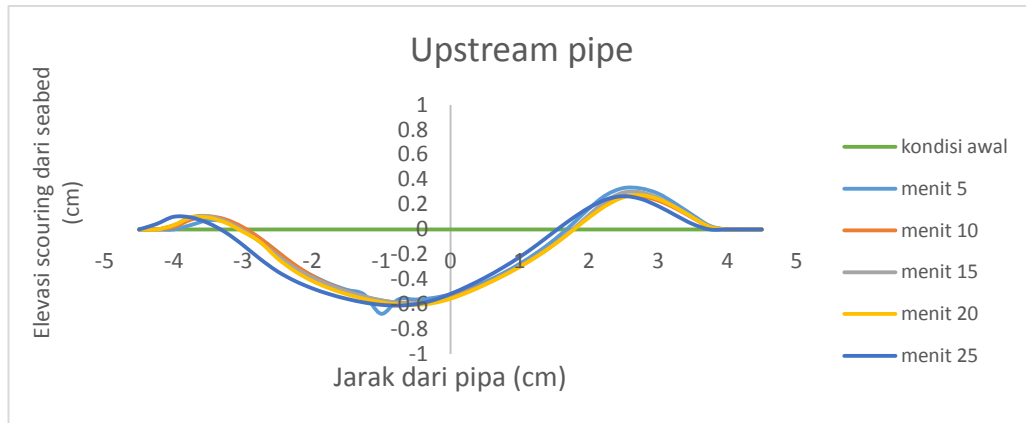
Gambar 4.33. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.34. Profil 2D *scouring* dua pipa meletak jarak 40 cm



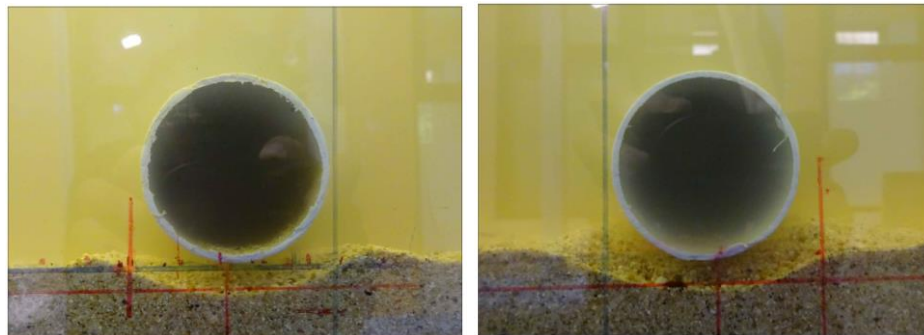
Gambar 4.35. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 40 cm (downstream)



Gambar 4.36. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 40 cm (upstream)

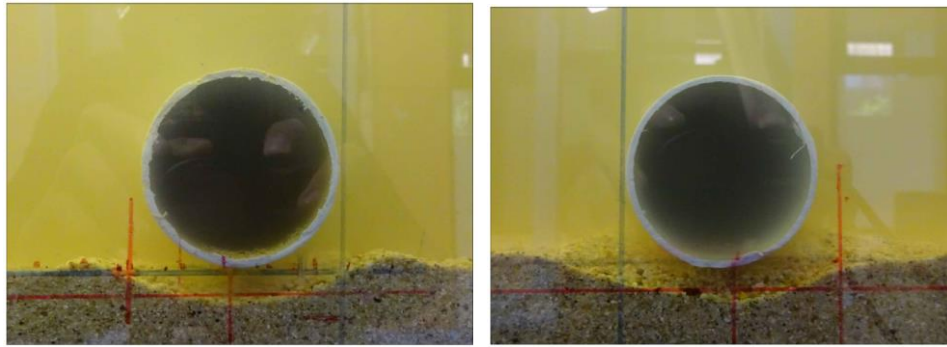
b. Jarak 60 cm

Pada gambar 4.37. untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.48 cm** dan **4.59 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.58 cm** dan **4.32 cm** untuk *downstream pipe*.



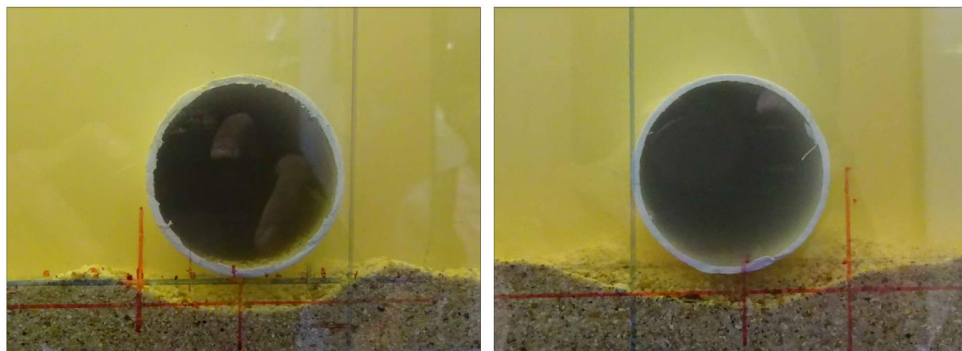
Gambar 4.37. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Pada menit ke-15, dua pipa mengalami *scouring* dengan profil seperti gambar 4.38. Kedua pipa memiliki masing masing kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi akibat gelombang regular. Kedalaman dan lebar *scouring* **0.52 cm** dan **5.09 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.61 cm** dan **4.75 cm** untuk *downstream pipe*.



Gambar 4.38. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

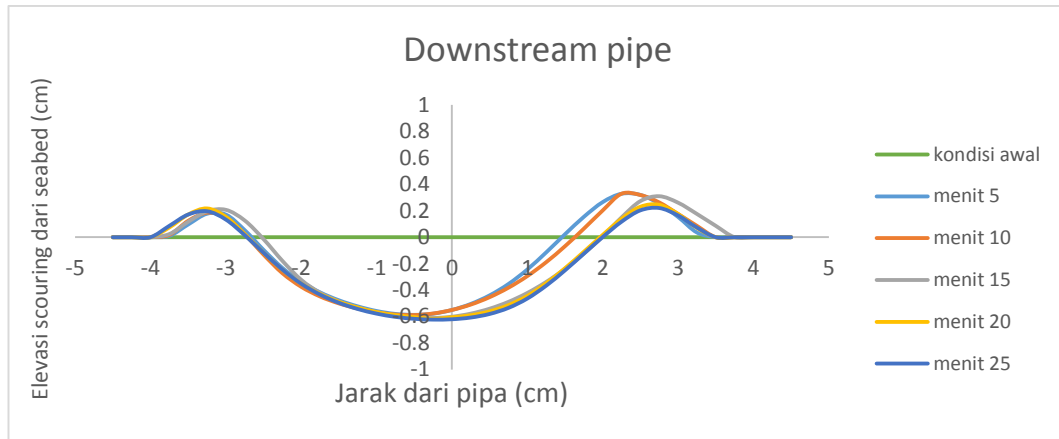
Berikut hasil profil akhir ($t = 25$ menit) *scouring* pada gambar 4.39 dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.55 cm** dan **5.2 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.66 cm** dan **4.85 cm** untuk *downstream pipe*.



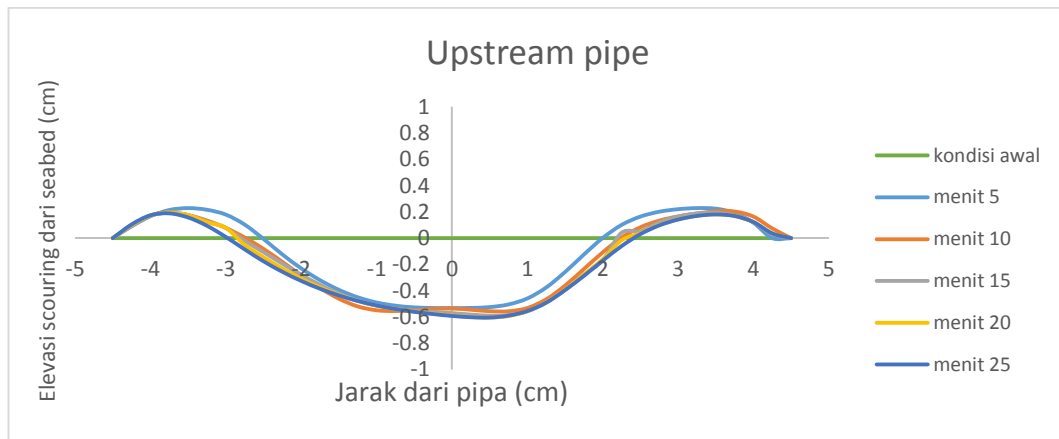
Gambar 4.39. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.40. Profil 2D *scouring* dua pipa meletak jarak 60 cm



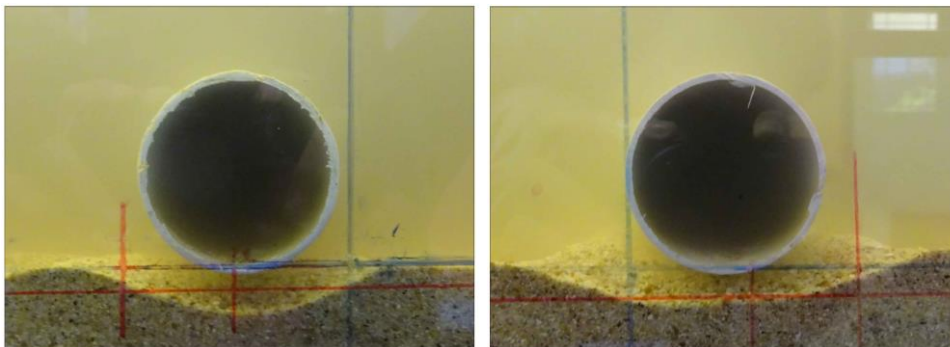
Gambar 4.41. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 60 cm (downstream)



Gambar 4.42. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 60 cm (upstream)

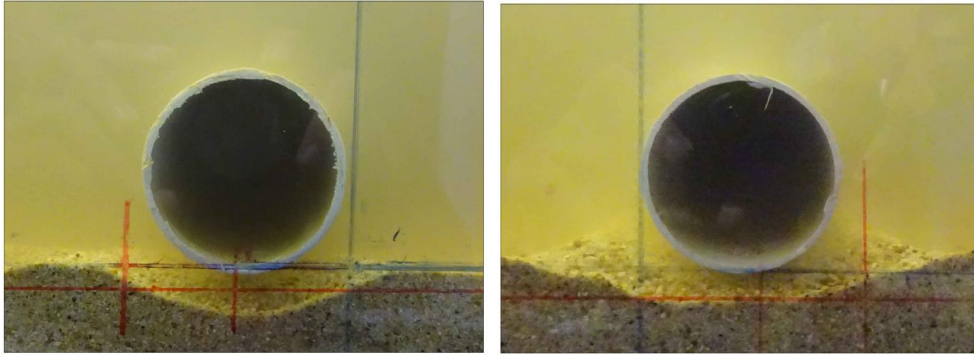
c. Jarak 80 cm

Pada gambar 4.39 untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.52 cm** dan **5.21 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.67 cm** dan **5.22 cm** untuk *downstream pipe*.



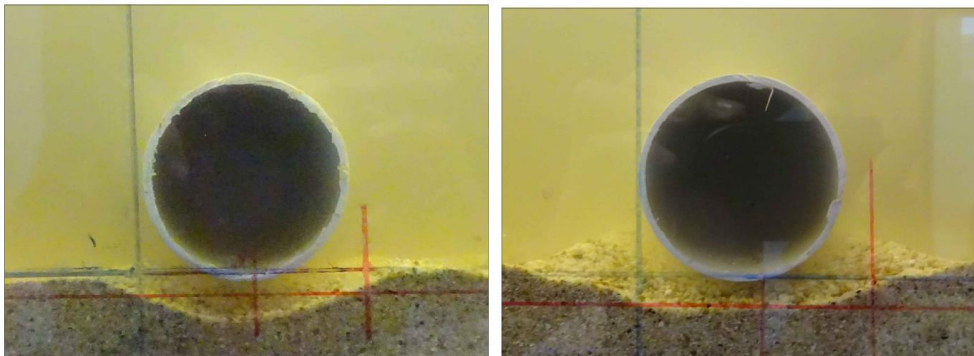
Gambar 4.43. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Pada menit ke-15, dua pipa mengalami *scouring* dengan profil seperti gambar 4.40. Kedua pipa memiliki masing masing kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi akibat gelombang regular. Kedalaman dan lebar *scouring* **0.54 cm** dan **5.49 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.7 cm** dan **5.26 cm** untuk *downstream pipe*.

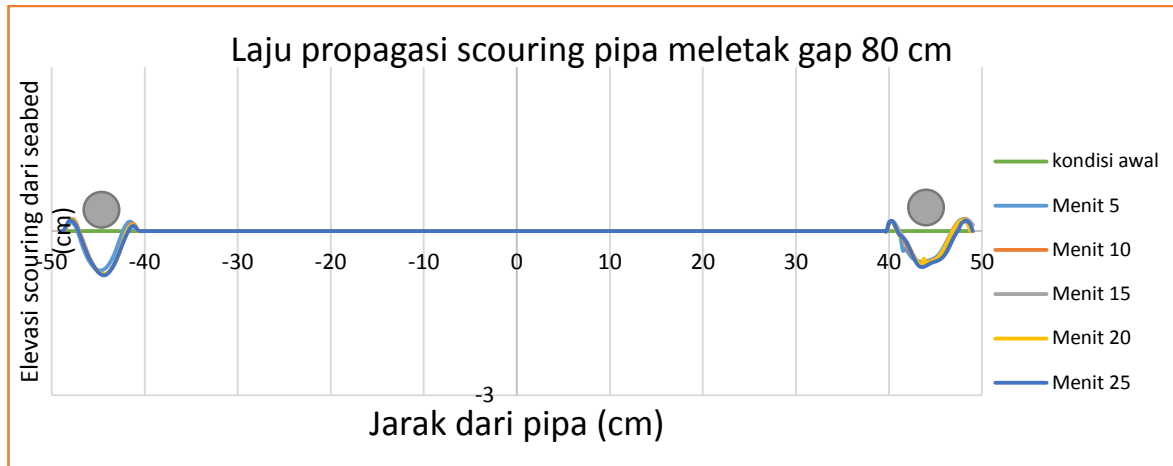


Gambar 4.44. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

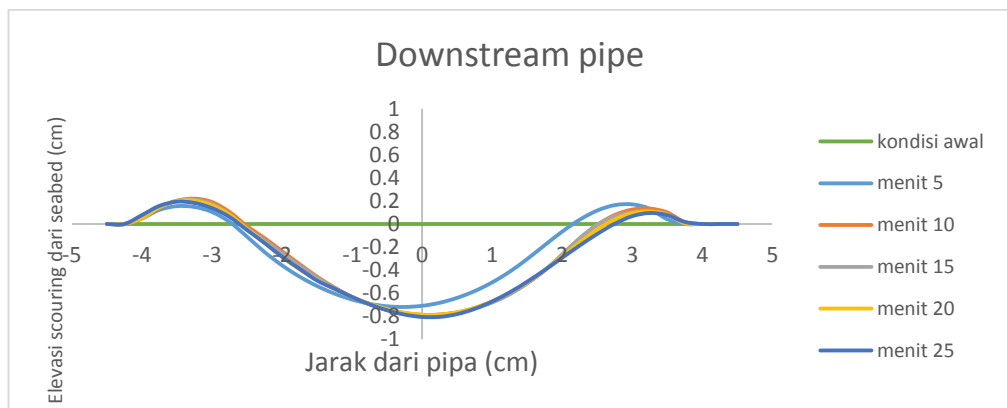
Berikut hasil profil akhir ($t = 25$ menit) *scouring* pada gambar 4.41 dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.6 cm** dan **5.85 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.72 cm** dan **5.27 cm** untuk *downstream pipe*.



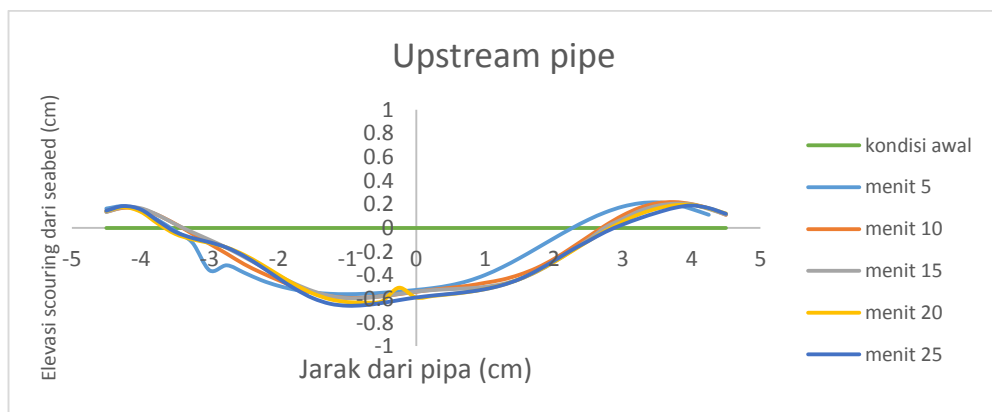
Gambar 4.45. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.46. Profil 2D *scouring* dua pipa meletak jarak 80 cm



Gambar 4.47. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 80 cm (downstream)



Gambar 4.48. Profil 2D *scouring* pipa meletak jarak 80 cm (upstream)

4.4.2 Kondisi Dua Pipa *In-Trench*

Pengujian kedua yaitu kondisi dua pipa terbenam 0.4 cm yang dilakukan dengan memvariasikan jarak yaitu 40 cm, 60 cm dan 80 cm dengan tinggi gelombang yang sama yaitu 11 cm dan 13 cm berjenis regular.

4.4.2.1 Kondisi Gelombang 11 cm

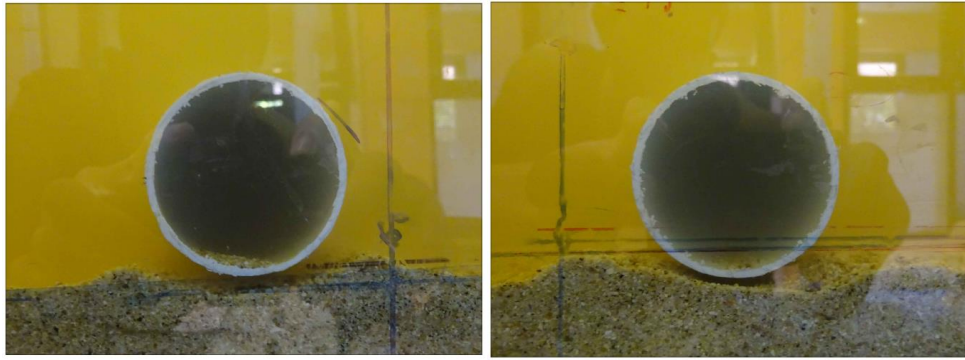
a. Jarak 40 cm

Dua pipa yang diterbenamkan 0.4 cm ($e/D = -0.1$) tetap dilakukan dengan variasi jarak 40 cm, 60 cm, dan 80 cm. Profil *scouring* yang ditunjukkan dalam kondisi *in-trench* adalah di waktu 5 menit dan 20 menit karena hanya dilakukan 4 kali pencatatan. Kondisi dua pipa *in-trench* dengan jarak 40 cm terilustrasi seperti gambar 4.49.



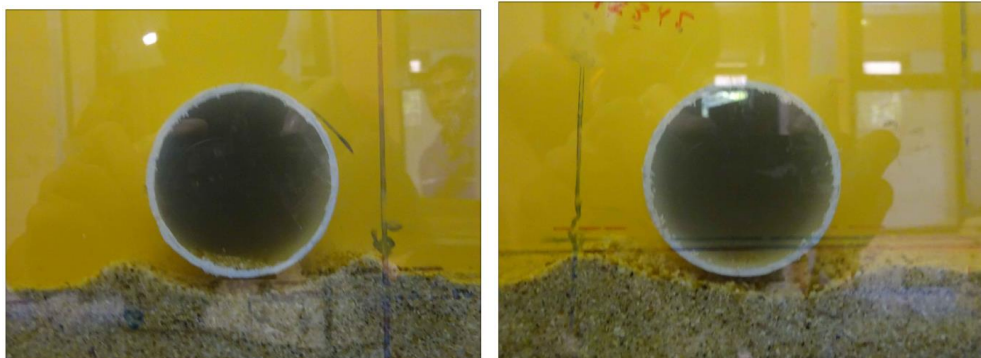
Gambar 4.49. Kondisi dua pipa *in-trench* jarak 40 cm ($H = 11$ cm)

Pada gambar 4.50 untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa mulai mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.17 cm** dan **3.87 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.18 cm** dan **3.02 cm** untuk *downstream pipe*.

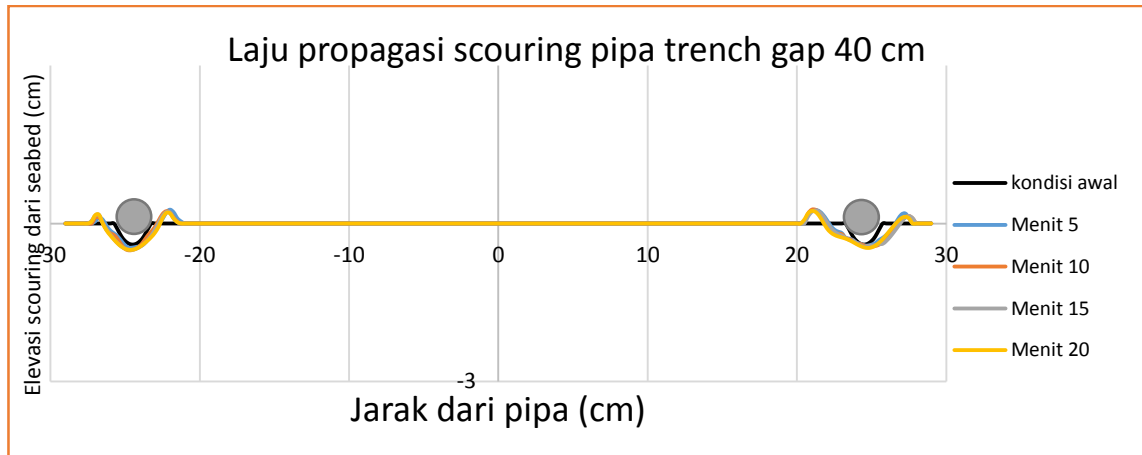


Gambar 4.50. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

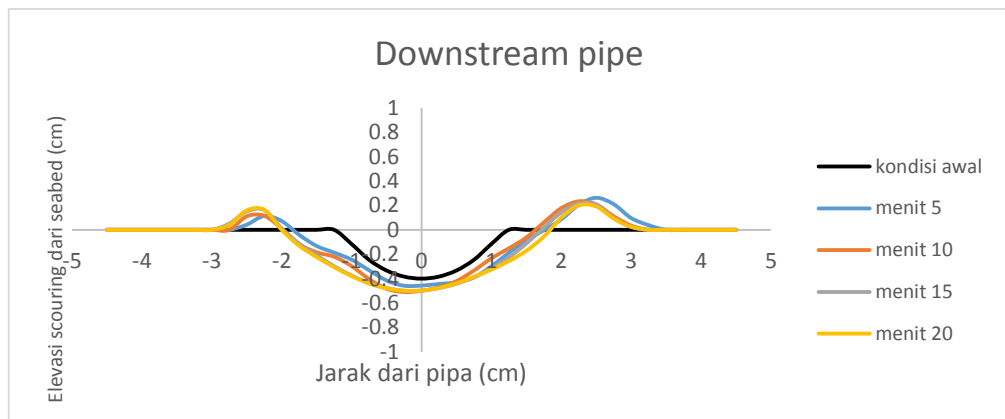
Setelah pengujian dilakukan hingga $t = 20$ menit, tidak terjadi penambahan kedalaman dan lebar *scouring* namun selang waktu $t = 10$ menit sampai $t = 15$ menit masih terjadi perubahan *scouring*. Berikut hasil profil akhir *scouring* pada gambar 4.51. dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.29 cm** dan **4.09 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.23 cm** dan **3.36 cm** untuk *downstream pipe*.



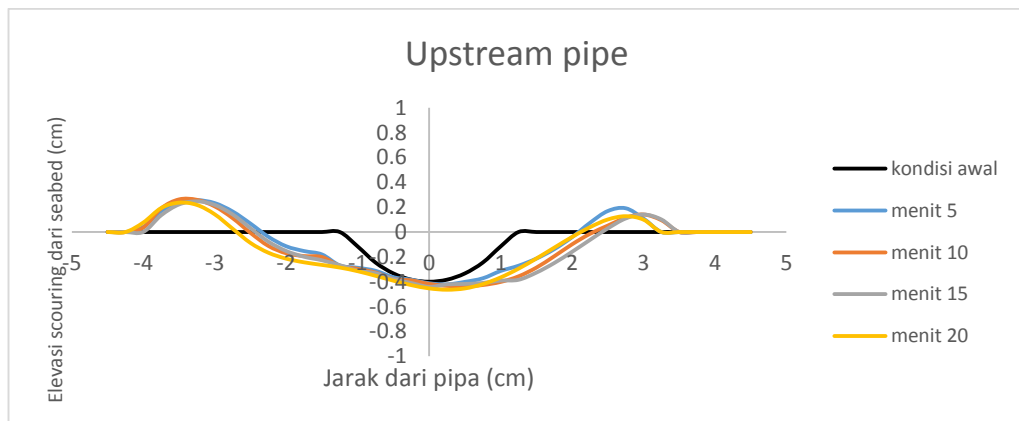
Gambar 4.51. Kondisi $t = 20$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.52. Profil 2D *scouring* dua pipa *in-trench* jarak 40 cm



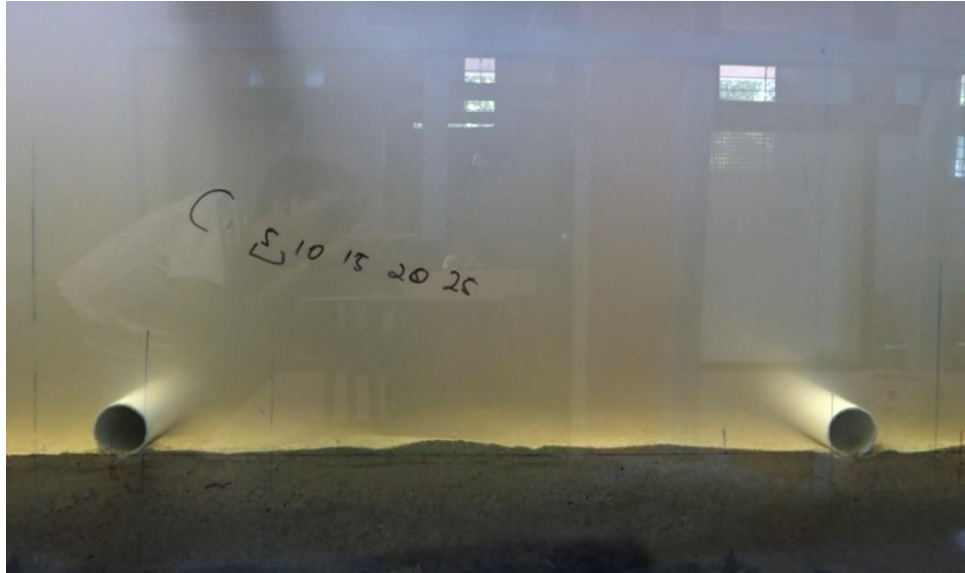
Gambar 4.53. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 40 cm (downstream)



Gambar 4.54. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 40 cm (upstream)

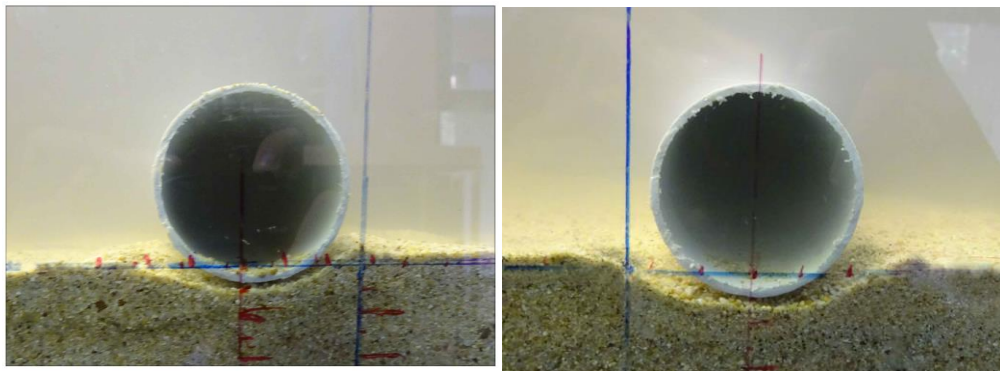
b. Jarak 60 cm

Kondisi dua pipa dengan jarak 60 cm terilustrasi seperti pada gambar 4.55. dan memiliki $e/D = -0.1$ (*in-trench*).



Gambar 4.55. Kondisi dua pipa *in-trench* jarak 60 cm

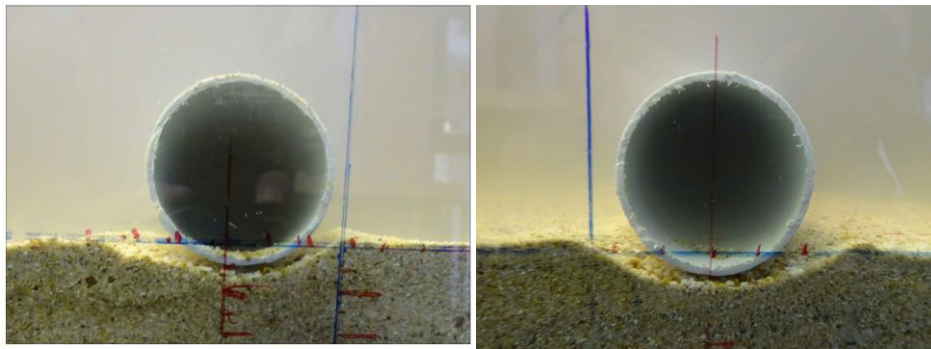
Pada gambar 4.56. untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa mulai mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.23 cm** dan **4.25 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.18 cm** dan **3.31 cm** untuk *downstream pipe*.



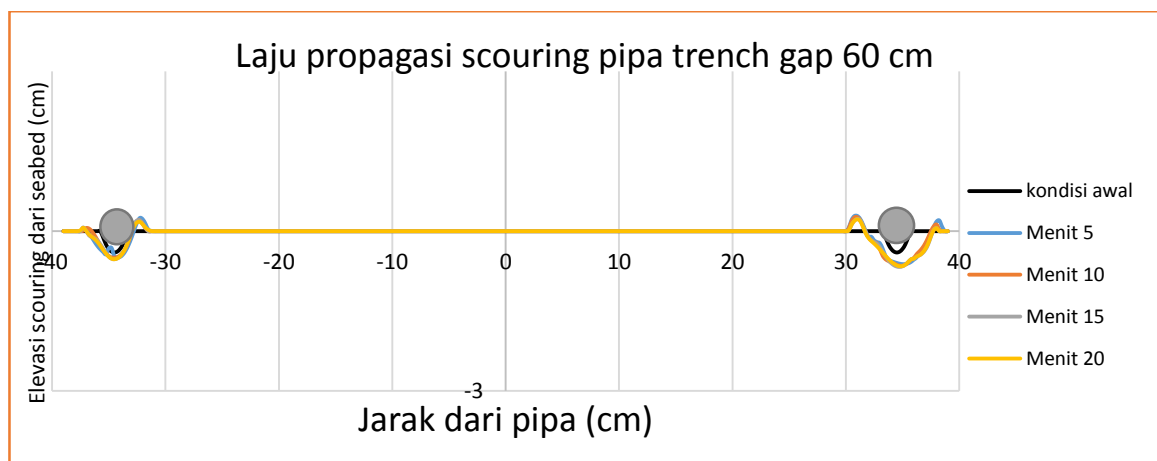
Gambar 4.56. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Setelah pengujian dilakukan hingga $t = 20$ menit, tidak terjadi penambahan kedalaman dan lebar *scouring* namun selang waktu $t = 10$ menit sampai $t = 15$

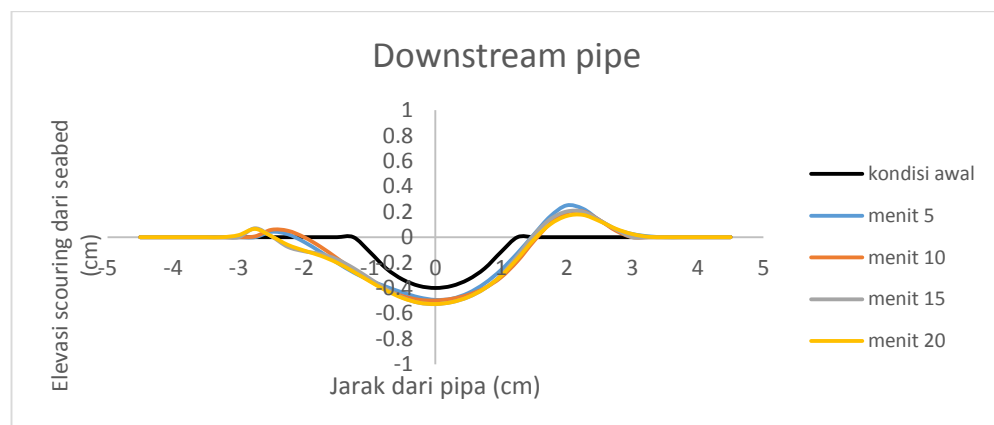
menit masih terjadi perubahan *scouring*. Berikut hasil profil akhir *scouring* pada gambar 4.57. dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.32 cm** dan **4.39 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.26 cm** dan **3.99 cm** untuk *downstream pipe*.



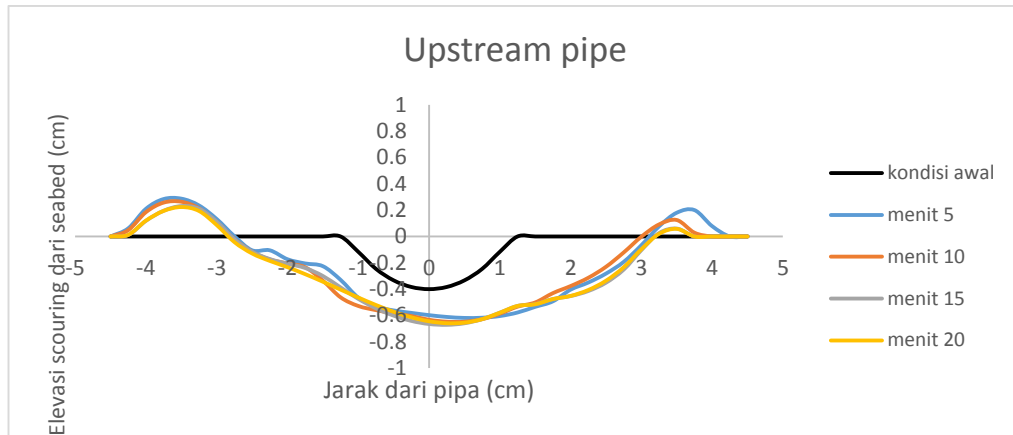
Gambar 4.57. Kondisi $t = 20$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.58. Profil 2D *scouring* dua pipa *in-trench* jarak 60 cm



Gambar 4.59. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 60 cm (downstream)



Gambar 4.60. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 60 cm (upstream)

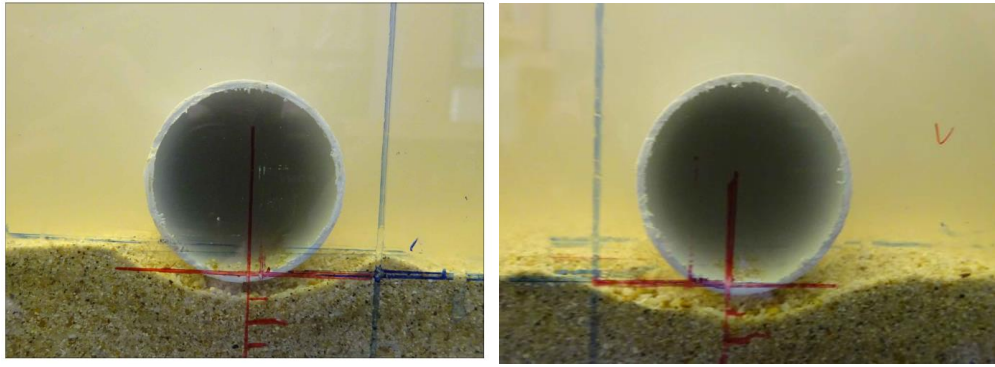
c. Jarak 80 cm

Kondisi dua pipa dengan jarak 80 cm terilustrasi seperti pada gambar 4.61. dan memiliki $e/D = -0.1$ (*in-trench*).



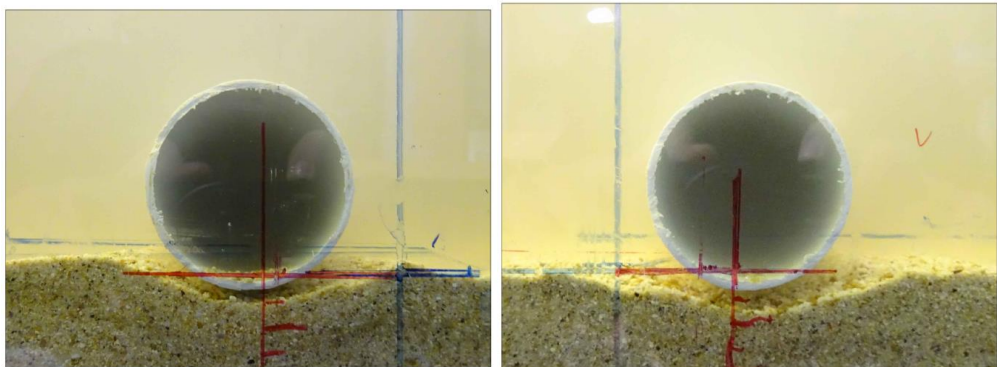
Gambar 4.61. Kondisi dua pipa *in-trench* jarak 80 cm

Pada gambar 4.62. untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) salah satu pipa mengalami *scouring* dan satunya belum terjadi dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.24 cm** dan **3.94 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.17 cm** dan **3.99 cm** untuk *downstream pipe*.

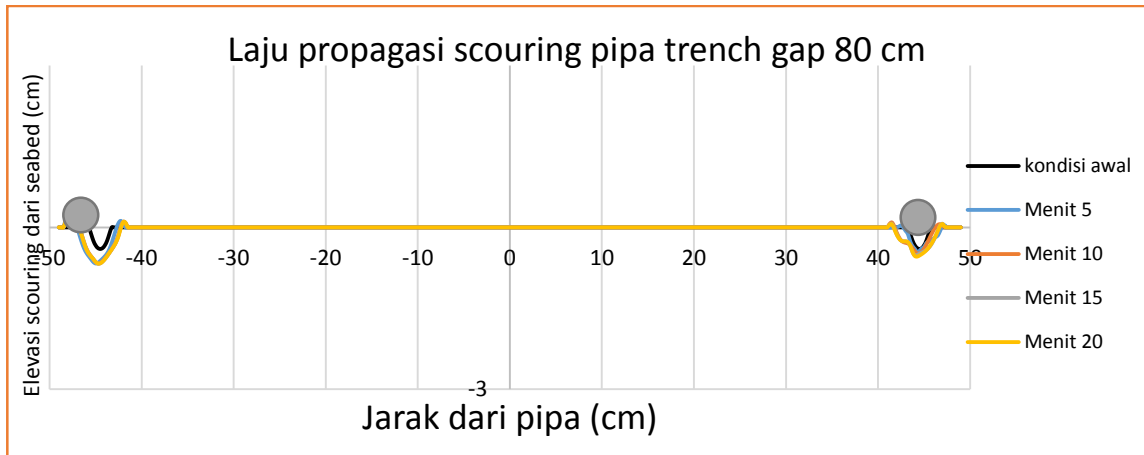


Gambar 4.62. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

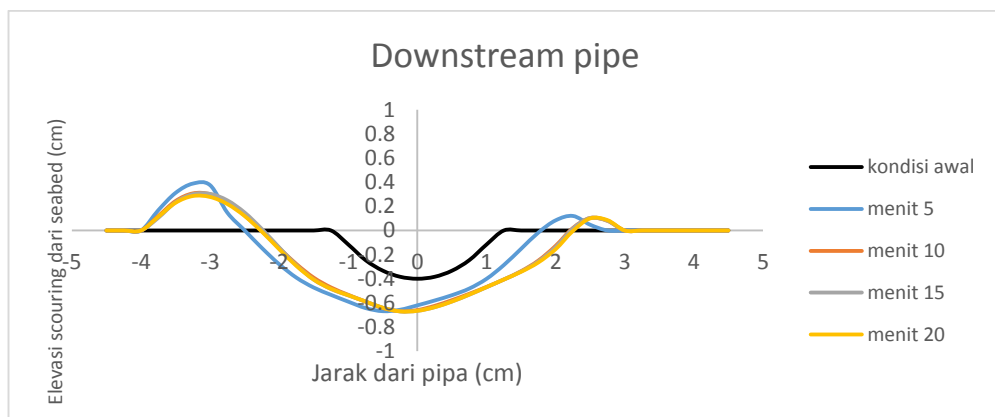
Setelah pengujian dilakukan hingga $t = 20$ menit, tidak terjadi penambahan kedalaman dan lebar *scouring* namun selang waktu $t = 10$ menit sampai $t = 15$ menit masih terjadi perubahan *scouring*. Berikut hasil profil akhir *scouring* pada gambar 4.63. dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.38 cm** dan **4.43 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.27 cm** dan **4.45 cm** untuk *downstream pipe*.



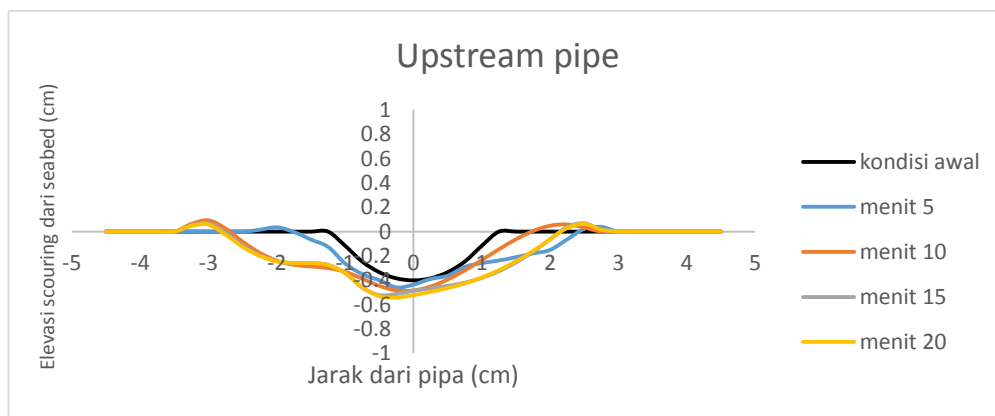
Gambar 4.63. Kondisi $t = 20$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.64. Profil 2D *scouring* dua pipa *in-trench* jarak 80 cm



Gambar 4.65. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 80 cm (downstream)



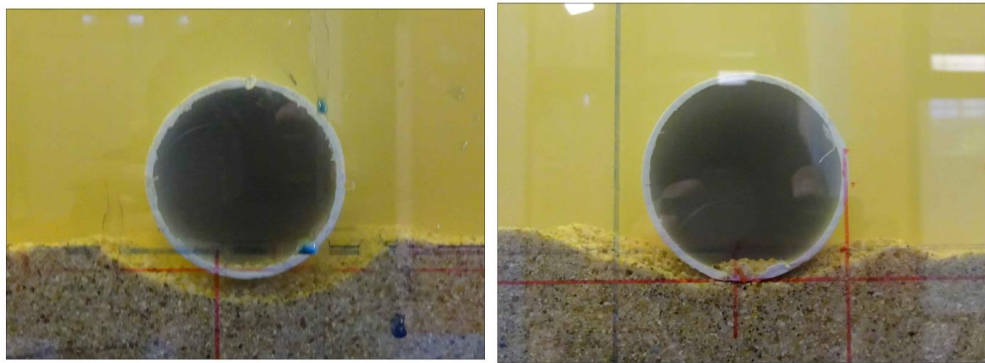
Gambar 4.66. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 80 cm (upstream)

4.4.2.2 Kondisi Gelombang 13 cm

Pada eksperimen dengan kondisi tinggi gelombang 13 cm mempunyai bentuk profil *scouring* yang sama dengan profil *scouring* 11 cm namun mempunyai kedalaman dan lebar *scouring* yang lebih besar.

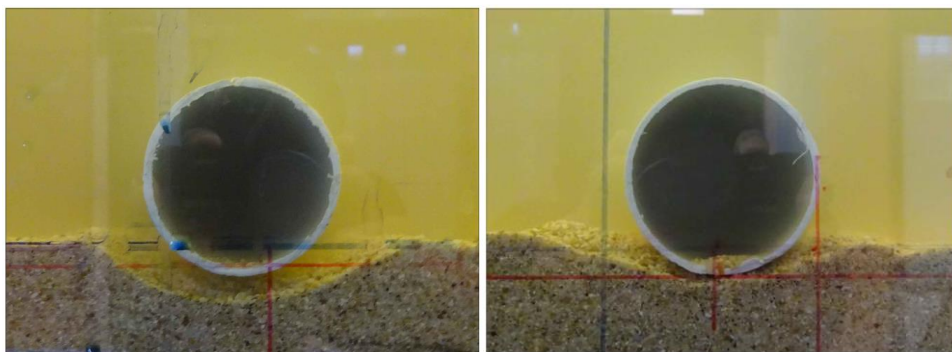
a. Jarak 40 cm

Pada gambar 4.67 untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.22 cm** dan **4.44 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.45 cm** dan **5.1 cm** untuk *downstream pipe*.



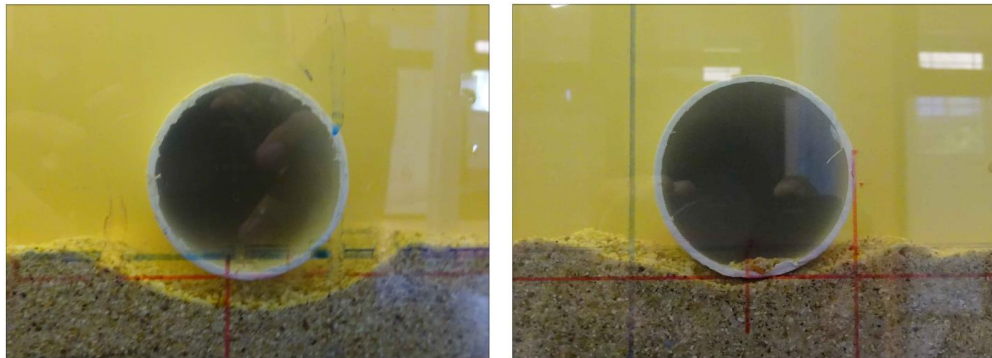
Gambar 4.67. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Pada menit ke-15, dua pipa mengalami *scouring* dengan profil seperti gambar 4.68. Kedua pipa memiliki masing masing kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi akibat gelombang regular. Kedalaman dan lebar *scouring* **0.28 cm** dan **4.93 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.52 cm** dan **5.27 cm** untuk *downstream pipe*.

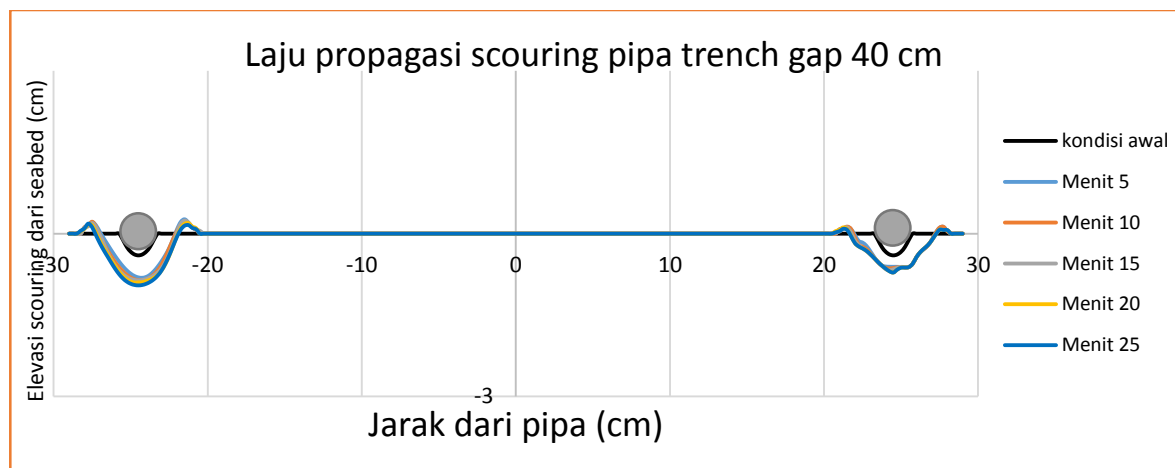


Gambar 4.68. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

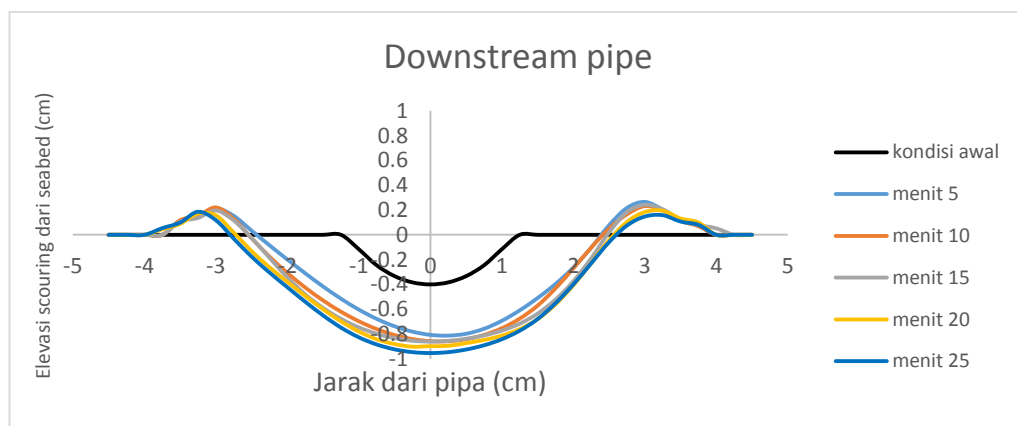
Berikut hasil profil akhir ($t = 25$ menit) *scouring* pada gambar 4.69 dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.33 cm** dan **4.96 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.56 cm** dan **5.48 cm** untuk *downstream pipe*.



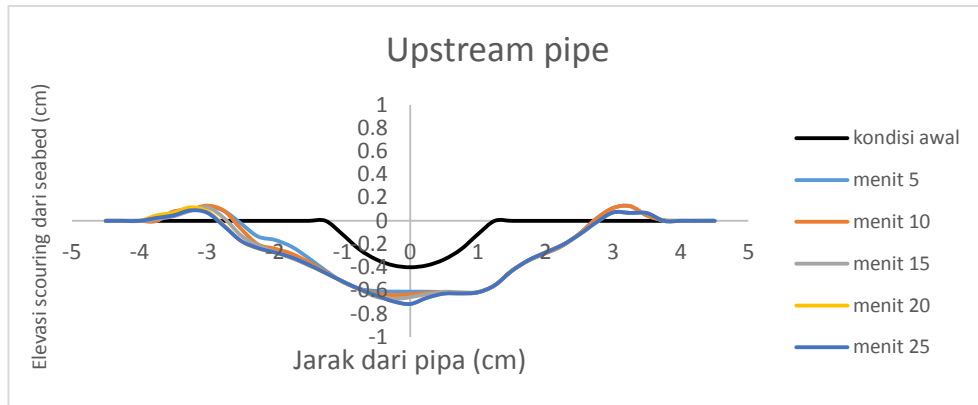
Gambar 4.69. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.70. Profil 2D *scouring* dua pipa *in-trench* jarak 40 cm



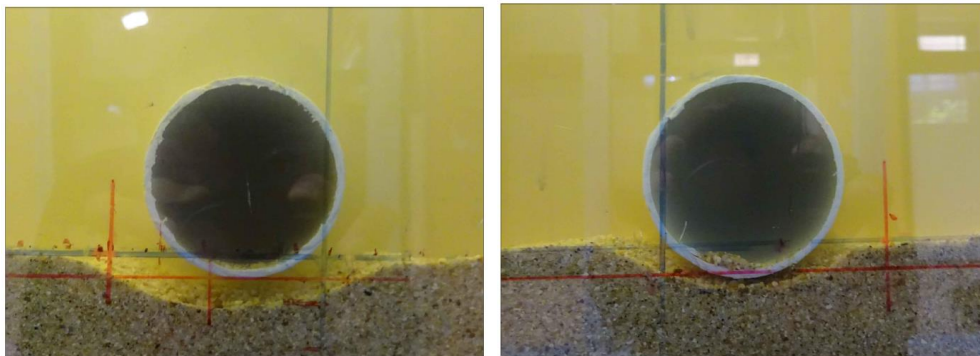
Gambar 4.71. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 40 cm (downstream)



Gambar 4.72. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 80 cm (upstream)

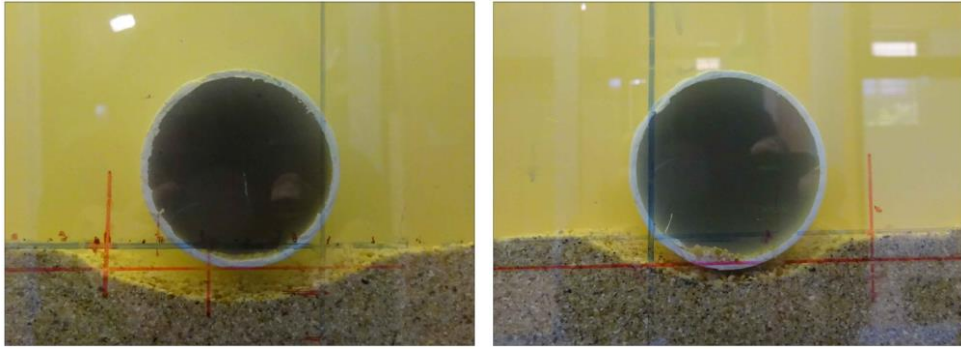
b. Jarak 60 cm

Pada gambar 4.73. untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.3 cm** dan **4.73 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.53 cm** dan **5.26 cm** untuk *downstream pipe*.



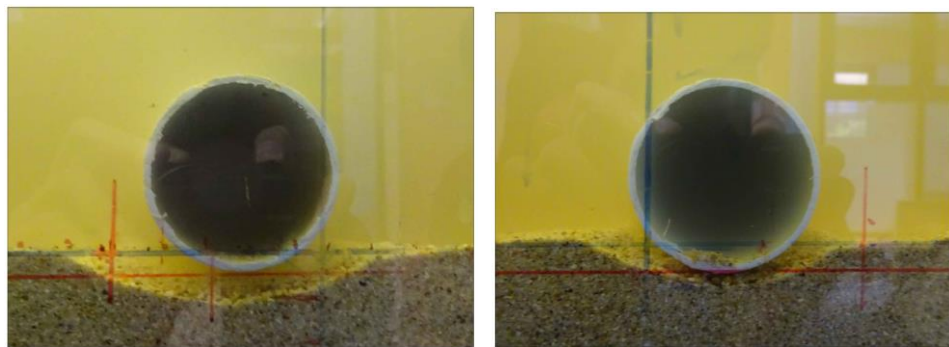
Gambar 4.73. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Pada menit ke-15, dua pipa mengalami *scouring* dengan profil seperti gambar 4.74. Kedua pipa memiliki masing masing kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi akibat gelombang regular. Kedalaman dan lebar *scouring* **0.38 cm** dan **4.91 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.63 cm** dan **6.13 cm** untuk *downstream pipe*.

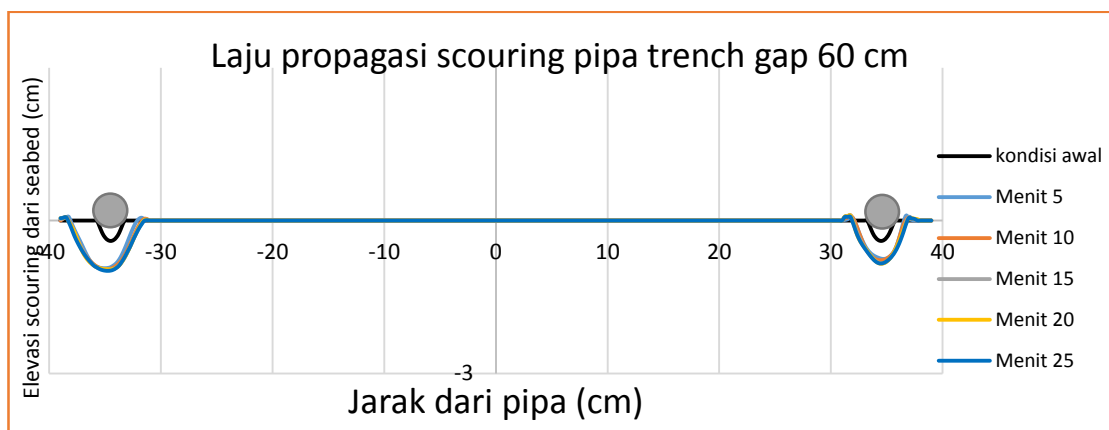


Gambar 4.74. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

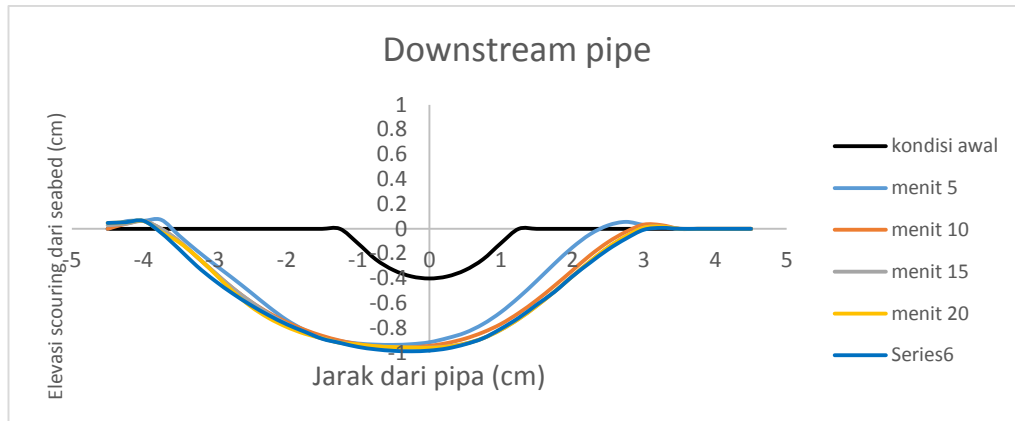
Berikut hasil profil akhir ($t = 25$ menit) *scouring* pada gambar 4.75 dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.42 cm** dan **5.12 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.63 cm** dan **6.27 cm** untuk *downstream pipe*.



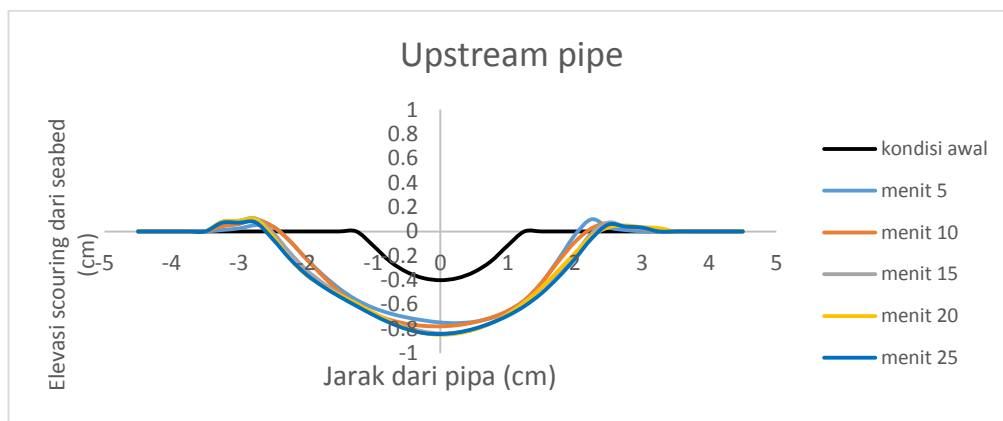
Gambar 4.75. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.76. Profil 2D *scouring* dua pipa *in-trench* jarak 60 cm



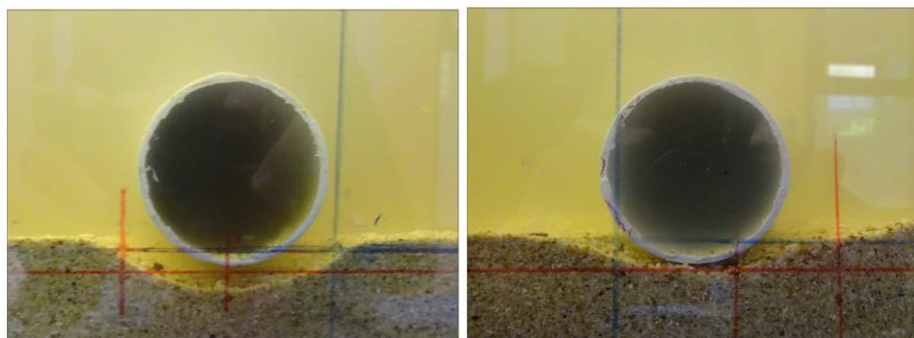
Gambar 4.77. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 60 cm (downstream)



Gambar 4.78. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 80 cm (upstream)

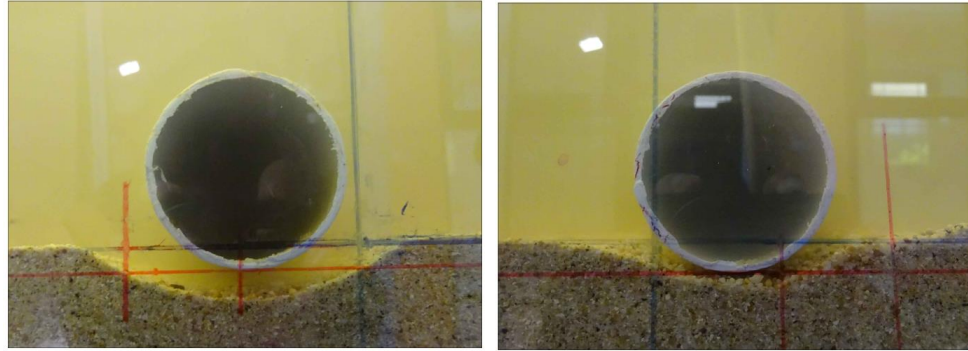
c. Jarak 80 cm

Pada gambar 4.79 untuk 5 menit pertama ($t = 5$ menit) dua pipa mengalami *scouring* dengan masing masing kedalaman dan lebar *scouring* **0.33 cm** dan **5.03 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.5 cm** dan **5.97 cm** untuk *downstream pipe*.



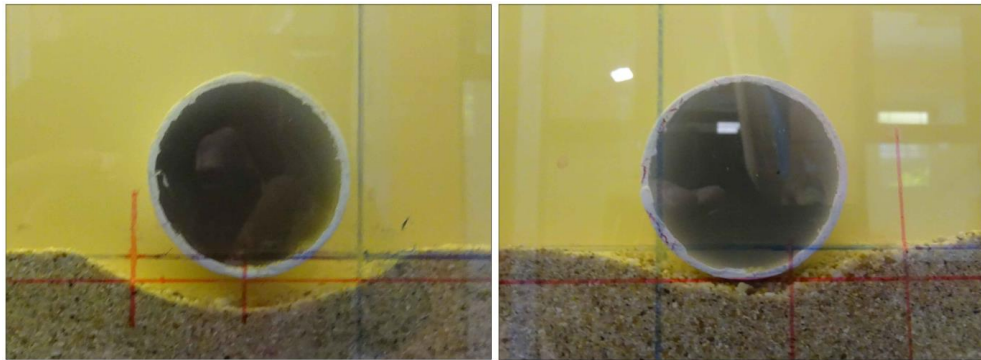
Gambar 4.79. Kondisi $t = 5$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

Pada menit ke-15, dua pipa mengalami *scouring* dengan profil seperti gambar 4.80. Kedua pipa memiliki masing masing kedalaman dan lebar *scouring* yang terjadi akibat gelombang regular. Kedalaman dan lebar *scouring* **0.39 cm** dan **5.19 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.58 cm** dan **6.32 cm** untuk *downstream pipe*.

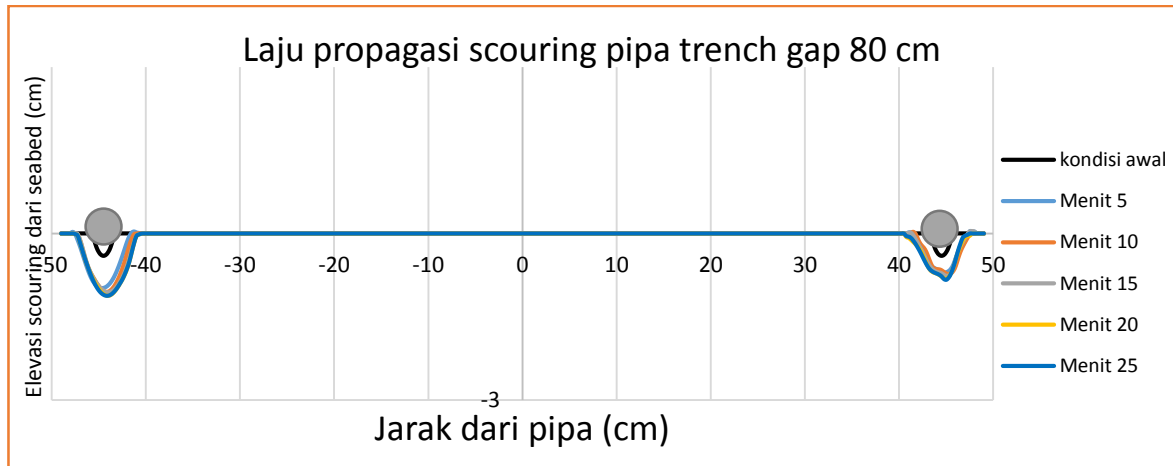


Gambar 4.80. Kondisi $t = 15$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*

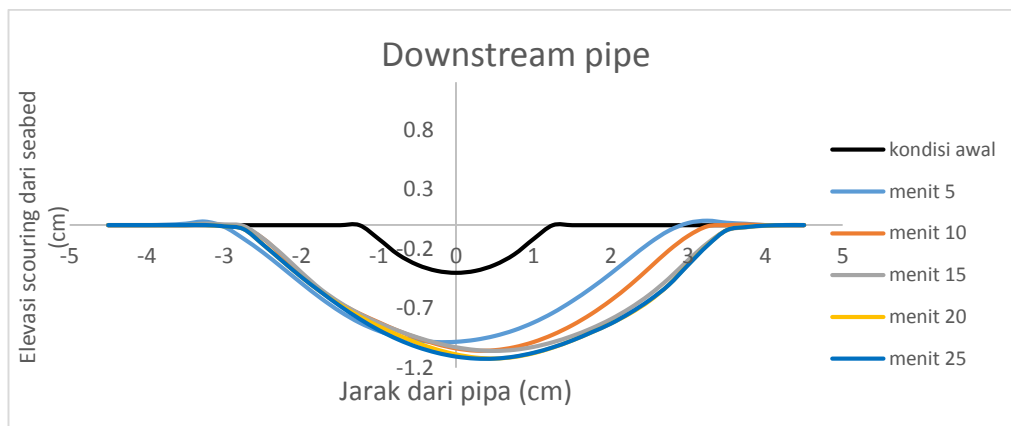
Berikut hasil profil akhir ($t = 25$ menit) *scouring* pada gambar 4.81 dengan kedalaman dan lebar *scouring* **0.44 cm** dan **5.49 cm** untuk *upstream pipe* dan **0.64 cm** dan **6.44 cm** untuk *downstream pipe*.



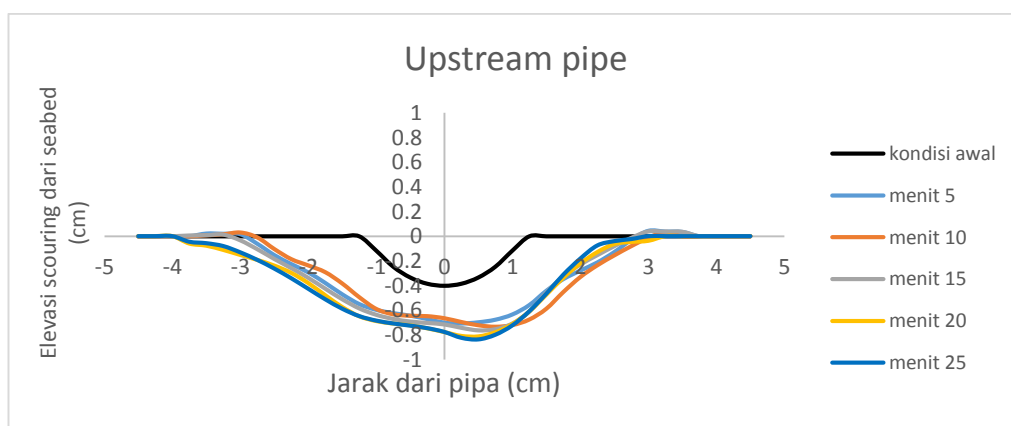
Gambar 4.81. Kondisi $t = 25$ menit untuk a) *downstream pipe* b) *upstream pipe*



Gambar 4.82. Profil 2D *scouring* dua pipa *in-trench* jarak 80 cm



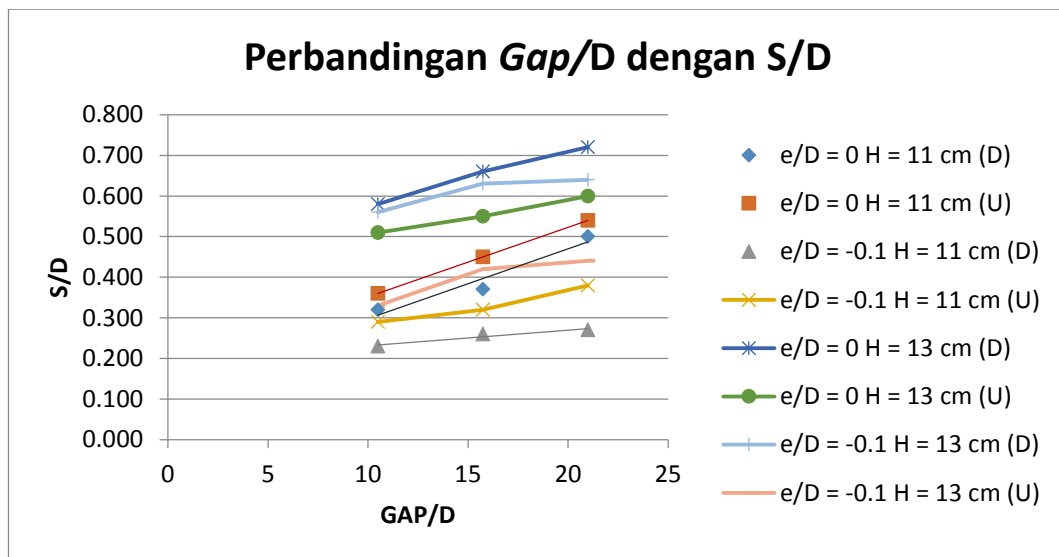
Gambar 4.83. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 80 cm (downstream)



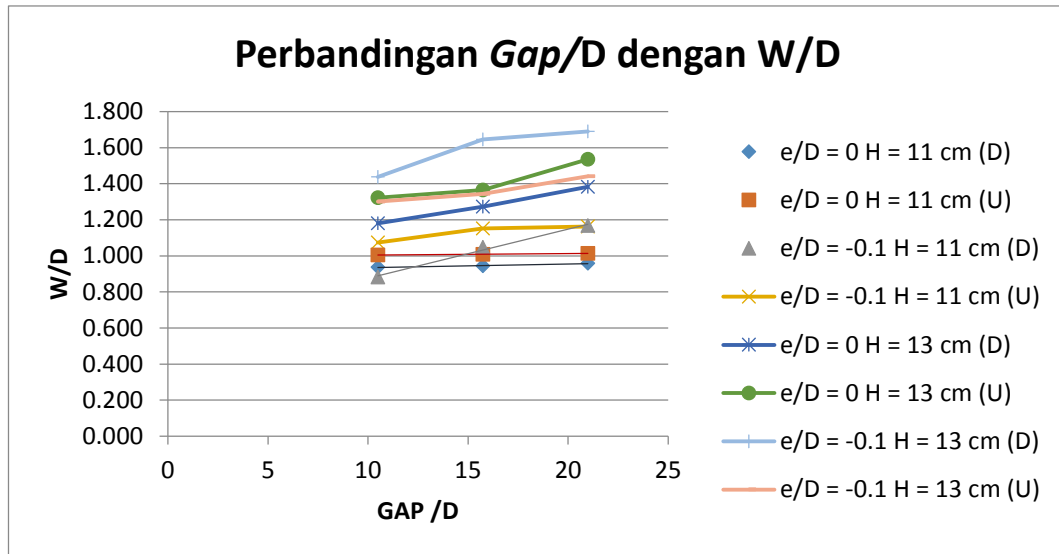
Gambar 4.84. Profil 2D *scouring* pipa *in-trench* jarak 80 cm (upstream)

4.5 Analisa Kedalaman dan Lebar Scouring

Hasil dari 12 variasi eksperimen *scouring* yang telah dilakukan, diperoleh hasil yang mempunyai pola bahwa semakin besar jarak antar dua pipa (*gap*) maka akan semakin besar *scouring* yang terjadi dalam kondisi *in-trench* maupun meletak. Tinggi gelombang juga mempengaruhi besarnya *scouring* yang terjadi. Sehingga dapat dikatakan dengan tinggi gelombang yang sama, peletakan pipa yang sama, akan tetap mempunyai pola yang sama yaitu semakin besar kedalaman dan lebar *scouring*, akibat dari jarak antar dua pipa (*gap*) yang semakin besar seperti yang ditunjukkan grafik pada gambar 4.85. dan 4.86.



Gambar 4.85. Perbandingan gap/D dengan S/D



Gambar 4.86. Perbandingan gap/D dengan w/D

Kedua grafik di atas menunjukkan kenaikan kedalaman dan lebar *scouring* setiap besarnya variasi jarak antar dua pipa (*gap*). Pada kondisi *trench*, dengan gelombang 11 cm dan 13 cm mempunyai sedikit perbedaan pola untuk nilai lebar *scouring* yaitu pada jarak 60 cm. Hal ini dikarenakan pemasangan kondisi *trench* yang belum tentu teliti dari jarak *seabed*. Akan tetapi dengan hasil keseluruhan dapat dikatakan kenaikan jarak antar pipa (*gap*), maka semakin besar *scouring* yang terjadi.

4.5.1 Kondisi Tinggi Gelombang 11 cm

Eksperimen *scouring* dengan dua pipa yang dilakukan memperoleh beberapa hasil yang ditunjukkan seperti data tabel 4.5 untuk setiap 5 menit pencatatan.

Tabel 4.5. Hasil kedalaman dan lebar scouring 6 variasi tinggi gelombang **11 cm**

No	Gap (cm)	e/D	H (cm)	Waktu t (menit)	Scouring			
					Upstream pipe		Downstream pipe	
					Kedalaman (d) cm	Lebar (w) cm	Kedalaman (d) cm	Lebar (w) cm
1	40	0 (Meletak)	11	0	0	0	0	0
				5	0.31	3.69	0.27	3.17
				10	0.31	3.73	0.29	3.2
				15	0.32	3.8	0.31	3.46
				20	0.34	3.8	0.32	3.57
				25	0.36	3.83	0.32	3.57
2	60	0 (Meletak)	11	0	0	0	0	0
				5	0.4	3.71	0.32	3.2
				10	0.42	3.75	0.32	3.31
				15	0.43	3.8	0.34	3.46
				20	0.44	3.84	0.36	3.59
				25	0.45	3.84	0.37	3.6
3	80	0 (Meletak)	11	0	0	0	0	0
				5	0.49	3.75	0.4	3.22
				10	0.51	3.76	0.4	3.32
				15	0.51	3.8	0.45	3.6
				20	0.54	3.86	0.5	3.65
				25	0.54	3.86	0.5	3.65
4	40	-0.1 (In-Trench)	11	0	0	0	0	0
				5	0.17	3.87	0.18	3.02
				10	0.21	3.9	0.2	3.14
				15	0.29	4.04	0.23	3.3
				20	0.29	4.09	0.23	3.36
				25	-	-	-	-
5	60	-0.1 (In-Trench)	11	0	0	0	0	0
				5	0.23	4.25	0.18	3.31
				10	0.25	4.28	0.23	3.61
				15	0.31	4.4	0.26	3.92
				20	0.32	4.6	0.26	3.99
				25	-	-	-	-
6	80	-0.1 (In-Trench)	11	0	0	0	0	0
				5	0.24	3.94	0.17	3.99
				10	0.28	4.13	0.23	4.21
				15	0.36	4.28	0.27	4.4
				20	0.38	4.43	0.27	4.45
				25	-	-	-	-

4.5.2 Kondisi Tinggi Gelombang 13 cm

Eksperimen *scouring* dengan dua pipa yang dilakukan memperoleh beberapa hasil yang ditunjukkan seperti data tabel 4.6 untuk setiap 5 menit pencatatan.

Tabel 4.6. Hasil kedalaman dan lebar scouring 6 variasi tinggi gelombang 13 cm

No	Gap (cm)	e/D	H (cm)	Waktu t (menit)	Scouring			
					Upstream pipe		Downstream pipe	
					Kedalaman (d) cm	Lebar (w) cm	Kedalaman (d) cm	Lebar (w) cm
1	40	0 (Meletak)	13	0	0	0	0	0
				5	0.47	4.78	0.52	4.26
				10	0.5	4.84	0.54	4.44
				15	0.5	4.91	0.57	4.48
				20	0.51	5	0.58	4.5
				25	0.51	5.04	0.58	4.5
2	60	0 (Meletak)	13	0	0	0	0	0
				5	0.48	4.59	0.58	4.32
				10	0.49	5.06	0.58	4.41
				15	0.52	5.09	0.61	4.75
				20	0.54	5.2	0.64	4.85
				25	0.55	5.2	0.66	4.85
3	80	0 (Meletak)	13	0	0	0	0	0
				5	0.52	5.21	0.67	5.22
				10	0.53	5.23	0.69	5.24
				15	0.54	5.49	0.7	5.26
				20	0.59	5.8	0.71	5.27
				25	0.6	5.85	0.72	5.27
4	40	-0.1 (In-Trench)	13	0	0	0	0	0
				5	0.22	4.44	0.45	5.1
				10	0.25	4.76	0.5	5.16
				15	0.28	4.93	0.52	5.27
				20	0.32	4.96	0.55	5.46
				25	0.33	4.96	0.56	5.48
5	60	-0.1 (In-Trench)	13	0	0	0	0	0
				5	0.3	4.73	0.53	5.26
				10	0.32	4.8	0.62	5.72
				15	0.38	4.91	0.63	6.13
				20	0.41	5	0.63	6.21
				25	0.42	5.12	0.63	6.27
6	80	-0.1 (In-Trench)	13	0	0	0	0	0
				5	0.33	5.03	0.5	5.97
				10	0.34	5.1	0.54	6.2
				15	0.39	5.19	0.58	6.32
				20	0.42	5.39	0.64	6.43
				25	0.44	5.49	0.64	6.44

4.5.3 Perhitungan Empiris Kedalaman dan Lebar Scouring

Hasil eksperimen *scouring* yang telah dilakukan akan dibandingkan dengan hasil perhitungan empiris atau manual. Dengan menghitung parameter dan dimensi yang berhubungan dengan eksperimen *scouring* akan diperoleh nilai prediksi kedalaman dan lebar *scouring*. Nilai-nilai yang dihitung dan berhubungan dengan analisa *scouring* seperti tinggi gelombang (H), kedalaman (h), periode gelombang (T), kondisi peletakan (e/D), panjang gelombang (L), Kecepatan orbital gelombang (Um), angka Keulegan-Capenter (KC), dan angka Shield Parameter (Θ). Perhitungan kedalaman (S_w) dan lebar (W_w) *scouring* secara empiris kemudian dibandingkan dengan kedalaman dan lebar dari hasil eksperimen.

Tabel 4.7 menunjukkan perhitungan empiris kedalaman dan lebar *scouring* untuk satu pipa namun tetap dapat dijadikan acuan untuk membandingkan hasil tersebut dengan hasil eksperimen karena memiliki parameter dan kondisi lingkungan yang sama (perbedaannya hanya terdapat di jarak antar dua pipa atau *gap*).

Tabel 4.7. Hasil perhitungan empiris kedalaman dan lebar *scouring*
(d = 0.5 m, T = 1 s)

No	Gap (m)	H (m)	e/D	Um	KC	Θ	S_w/D	S_w (cm)	w_w (cm)
1	0.4	0.11	0	0.0880	2.2007	0.0270	0.1561	0.5949	4.4534
2	0.6	0.11	0	0.0880	2.2007	0.0270	0.1561	0.5949	4.4534
3	0.8	0.11	0	0.0880	2.2007	0.0270	0.1561	0.5949	4.4534
4	0.4	0.11	-0.1	0.0880	2.2007	0.0270	0.1413	0.5383	4.4534
5	0.6	0.11	-0.1	0.0880	2.2007	0.0270	0.1413	0.5383	4.4534
6	0.8	0.11	-0.1	0.0880	2.2007	0.0270	0.1413	0.5383	4.4534
7	0.4	0.13	0	0.1040	2.6009	0.0346	0.1698	0.6470	4.9642
8	0.6	0.13	0	0.1040	2.6009	0.0346	0.1698	0.6470	4.9642
9	0.8	0.13	0	0.1040	2.6009	0.0346	0.1698	0.6470	4.9642
10	0.4	0.13	-0.1	0.1040	2.6009	0.0346	0.1537	0.5855	4.9642
11	0.6	0.13	-0.1	0.1040	2.6009	0.0346	0.1537	0.5855	4.9642
12	0.8	0.13	-0.1	0.1040	2.6009	0.0346	0.1537	0.5855	4.9642

Hasil eksperimen nilai kedalaman dan lebar *scouring* setiap 12 variasi untuk dua pipa ditunjukkan pada tabel 4.8

Tabel 4.8. Hasil eksperimen kedalaman dan lebar *scouring*

No	Gap (cm)	H (cm)	e/D	S eksperimen (cm)		W eksperimen (cm)	
				Down	Up	Down	Up
1	40	11	0.0	0.320	0.360	3.570	3.830
2	60	11	0.0	0.370	0.450	3.600	3.840
3	80	11	0.0	0.500	0.540	3.650	3.860
4	40	11	-0.1	0.230	0.290	3.360	4.090
5	60	11	-0.1	0.260	0.320	3.990	4.390
6	80	11	-0.1	0.270	0.380	4.450	4.430
7	40	13	0.0	0.580	0.510	4.500	5.040
8	60	13	0.0	0.660	0.550	4.850	5.200
9	80	13	0.0	0.720	0.600	5.270	5.850
10	40	13	-0.1	0.560	0.330	5.480	4.960
11	60	13	-0.1	0.630	0.420	6.270	5.120
12	80	13	-0.1	0.640	0.440	6.440	5.490

Kedua hasil tersebut akan dibandingkan seperti pada tabel 4.9 dengan perbandingan kedalaman per diameter pipa (S/D) dan lebar per pipa (W/D) antara hasil empiris dan eksperimen

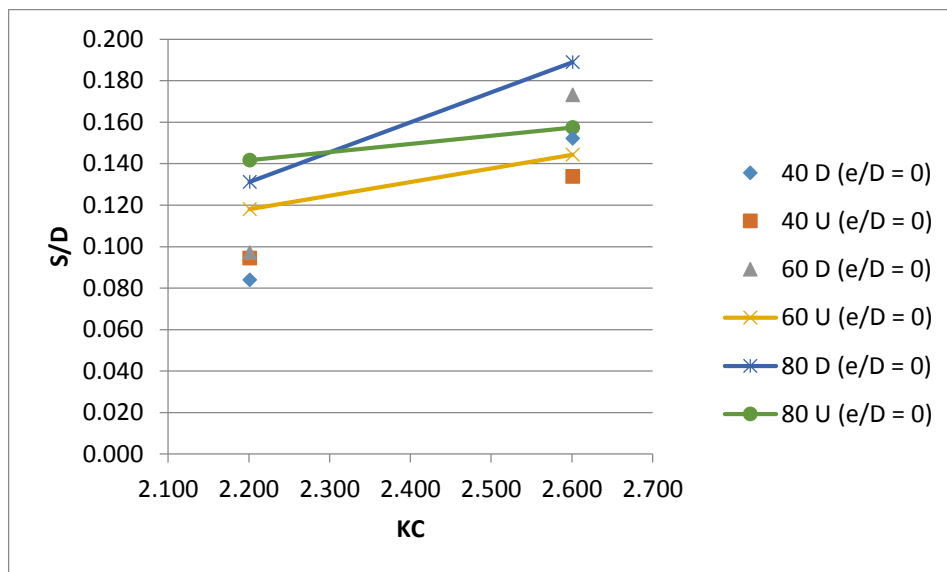
Tabel 4.9. Perbandingan hasil eksperimen dan empiris kedalaman dan lebar *scouring*

No	Gap (cm)	H (cm)	e/D	Sempiris/D	Seksperimen/D		Wempiris/D	Weksperimen/D	
					Down	Up		Down	Up
1	40	11	0.0	0.156	0.084	0.094	1.169	0.937	1.005
2	60	11	0.0	0.156	0.097	0.118	1.169	0.945	1.008
3	80	11	0.0	0.156	0.131	0.142	1.169	0.958	1.013
4	40	11	-0.1	0.141	0.060	0.076	1.169	0.882	1.073
5	60	11	-0.1	0.141	0.068	0.084	1.169	1.047	1.152
6	80	11	-0.1	0.141	0.071	0.100	1.169	1.168	1.163
7	40	13	0.0	0.170	0.152	0.134	1.303	1.181	1.323
8	60	13	0.0	0.170	0.173	0.144	1.303	1.273	1.365
9	80	13	0.0	0.170	0.189	0.157	1.303	1.383	1.535
10	40	13	-0.1	0.154	0.147	0.087	1.303	1.438	1.302
11	60	13	-0.1	0.154	0.165	0.110	1.303	1.646	1.344
12	80	13	-0.1	0.154	0.168	0.115	1.303	1.690	1.441

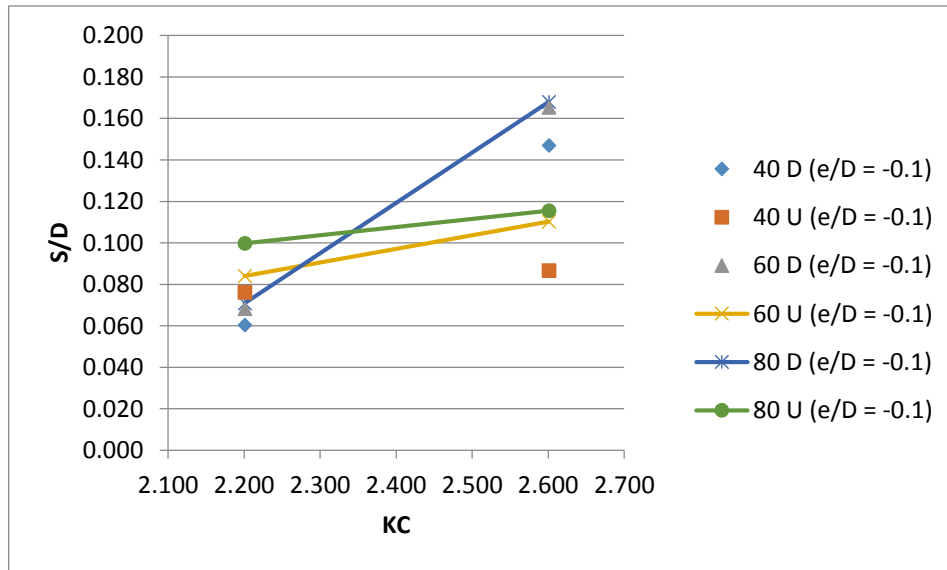
4.6 Analisa Hubungan *Scouring* dengan Parameter Tak Berdimensi

Analisa hubungan *scouring* dengan parameter tak berdimensi bertujuan untuk mempresentasikan data hasil kedalaman dan lebar eksperimen *scouring*. Data hasil *scouring* akan dihubungkan dengan parameter-parameter tak berdimensi untuk mengetahui besar kecilnya pengaruh parameter tersebut terhadap bilangan non dimensional kedalaman (S/D) dan lebar (w/D) *scouring*. Parameter tak berdimensi yang digunakan yaitu KC (*Keulegan-Carpenter number*), Shield Parameter (Θ), *Burial Depth-Diameter ratio* (e/D), dan tinggi gelombang relatif (H/gT^2). Dengan S adalah kedalaman *scouring*, w adalah lebar *scouring* dan D adalah diameter pipa. Pada beberapa grafik akan tunjukkan hubungan parameter tak berdimensi dengan kedalaman dan lebar *scouring*. Kondisi dua pipa ditunjukkan dengan pipa belakang jarak 40 cm (40 D) dan pipa depan jarak 40 cm (40 U).

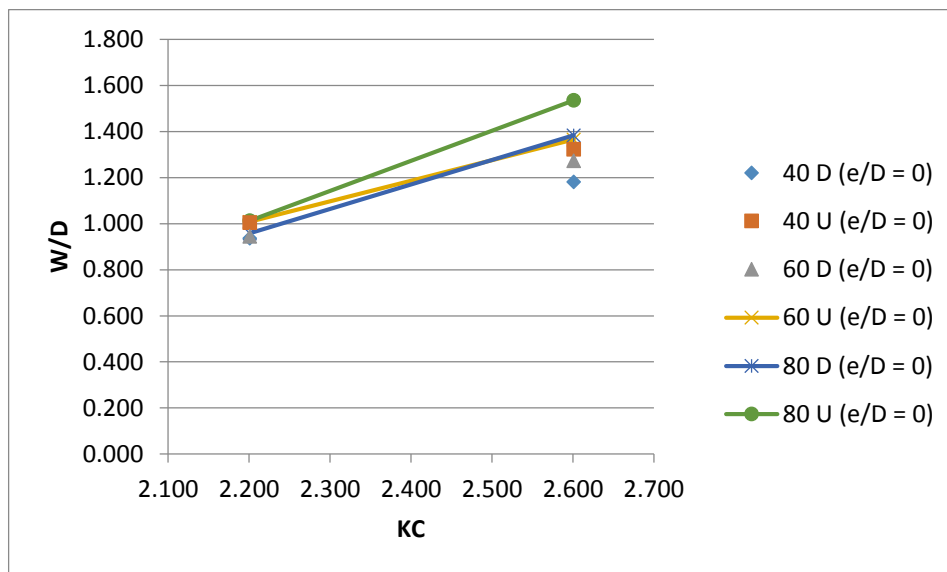
- *Keulagen-Carpenter* (KC)



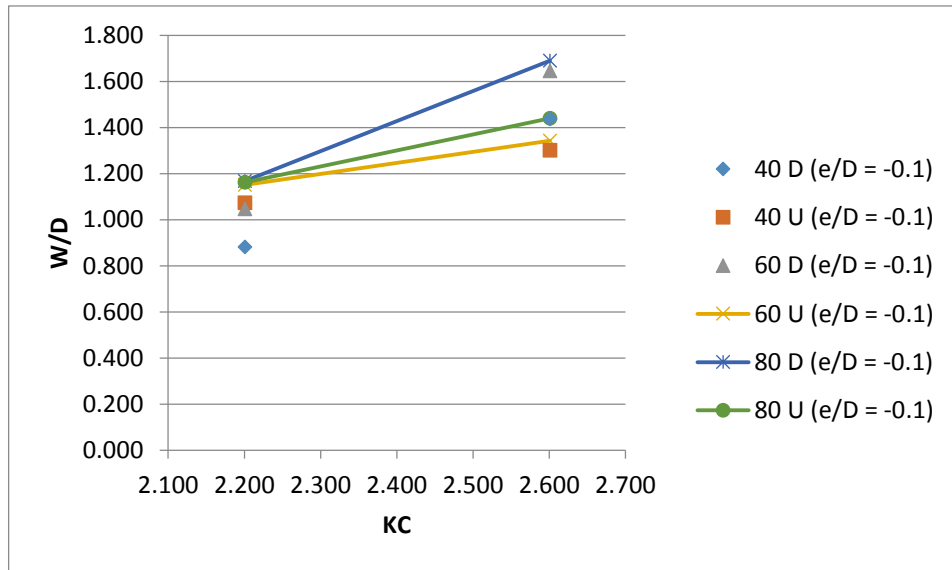
Gambar 4.87. Grafik hubungan KC dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D) kondisi meletak



Gambar 4.88. Grafik hubungan KC dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D) kondisi *in-trench*



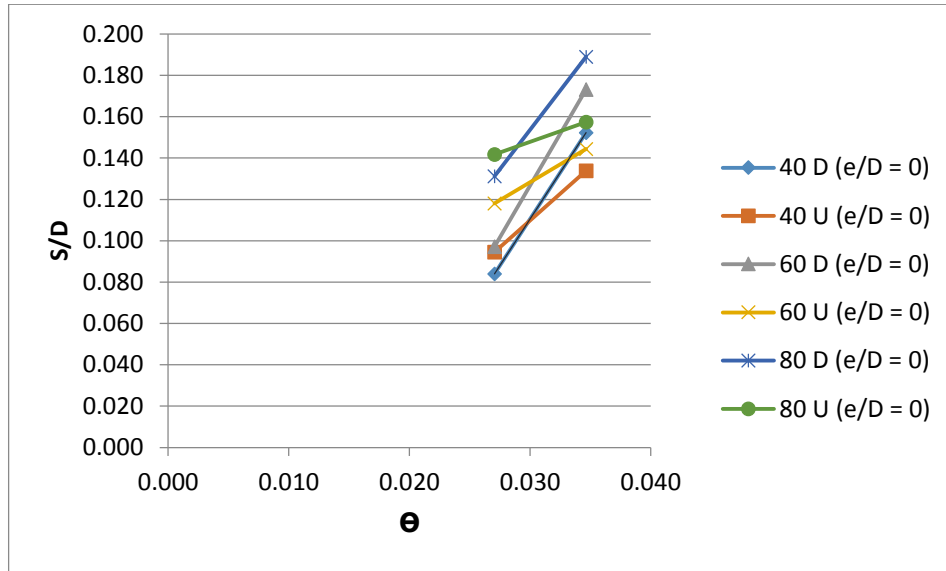
Gambar 4.89. Grafik hubungan KC dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D) kondisi meletak



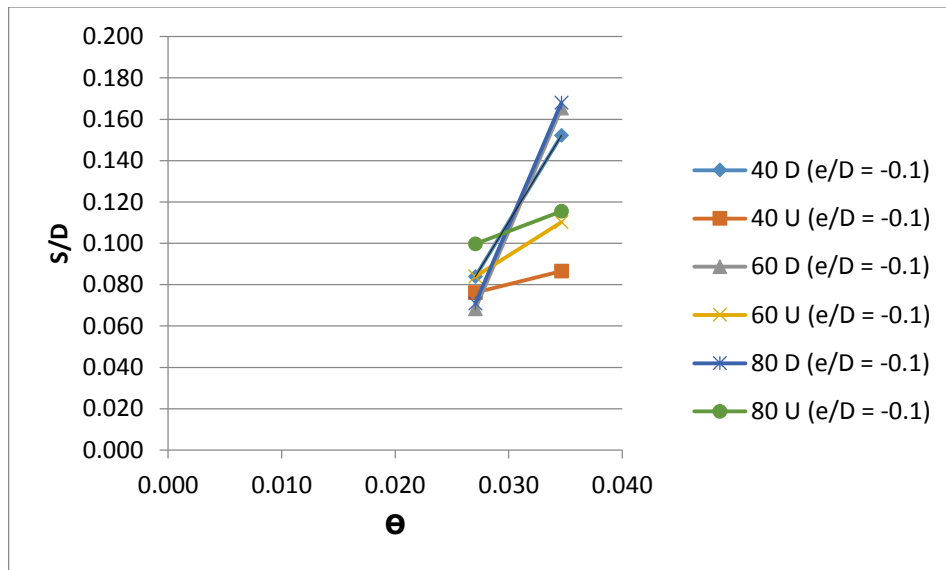
Gambar 4.90. Grafik hubungan KC dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D) kondisi *in-trench*

Pada gambar 4.13 ditunjukkan grafik hubungan antara KC dengan kedalaman (S/D) dan (w/D) lebar *scouring* kondisi meletak dan *trench* untuk masing-masing jarak (*gap*). Berdasarkan grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai KC maka kedalaman dan lebar *scouring* juga semakin besar. Nilai KC berbanding lurus dengan kecepatan orbital (U_m), sehingga semakin besar kecepatan orbital maka semakin besar penggerusan (*scouring*) yang terjadi.

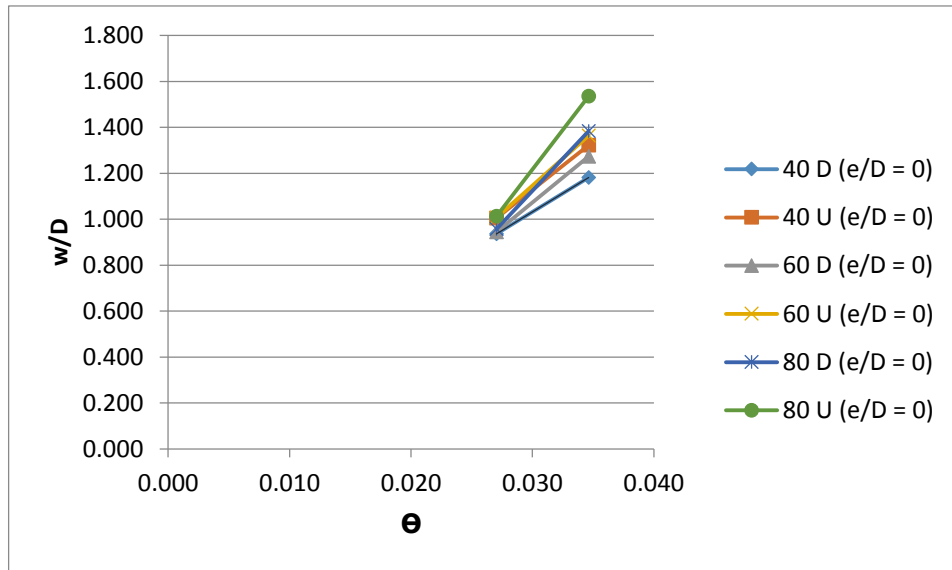
- *Shield Parameter Number (Θ)*



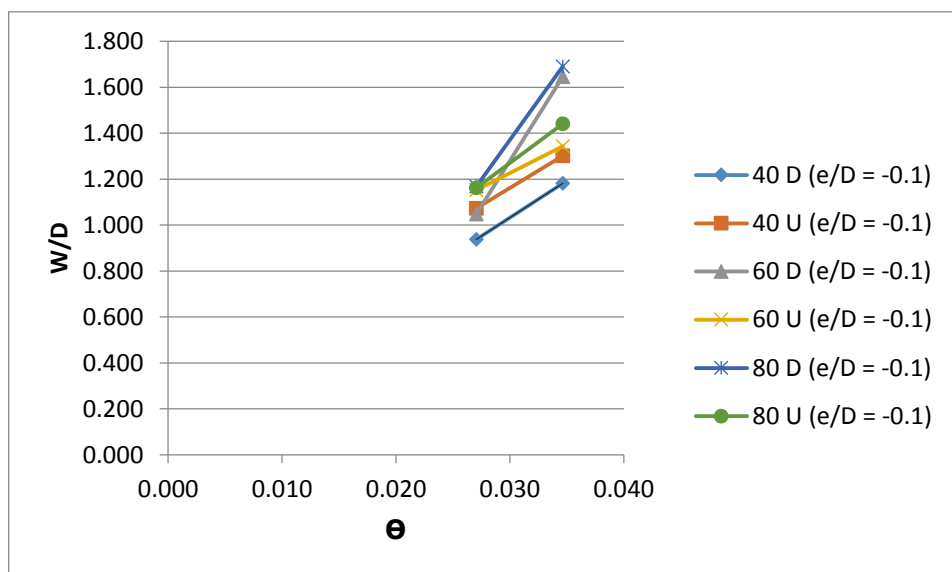
Gambar 4.91. Grafik hubungan Θ dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D) kondisi meletak



Gambar 4.92. Grafik hubungan Θ dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D) kondisi *in-trench*



Gambar 4.93. Grafik hubungan Θ dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D) kondisi meletak

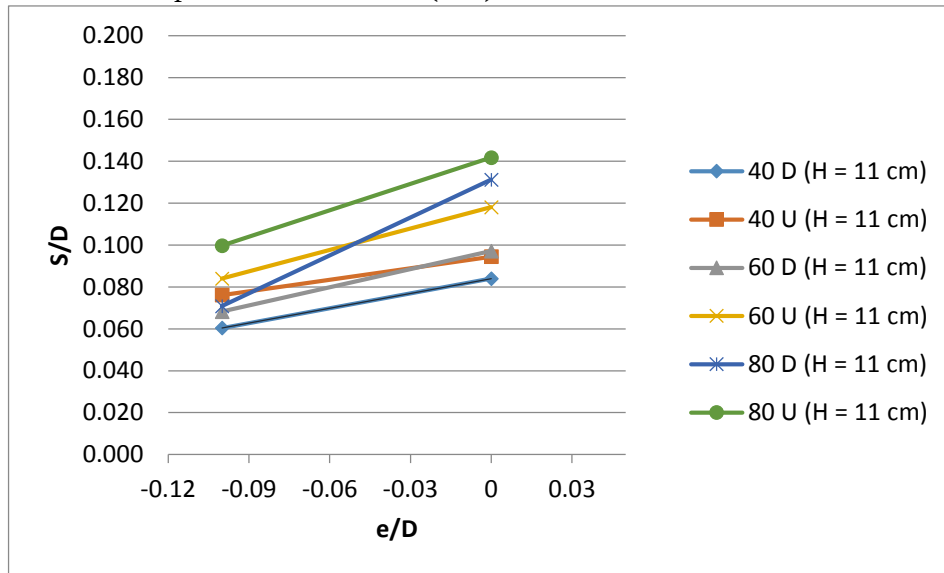


Gambar 4.94. Grafik hubungan Θ dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D) kondisi *in-trench*

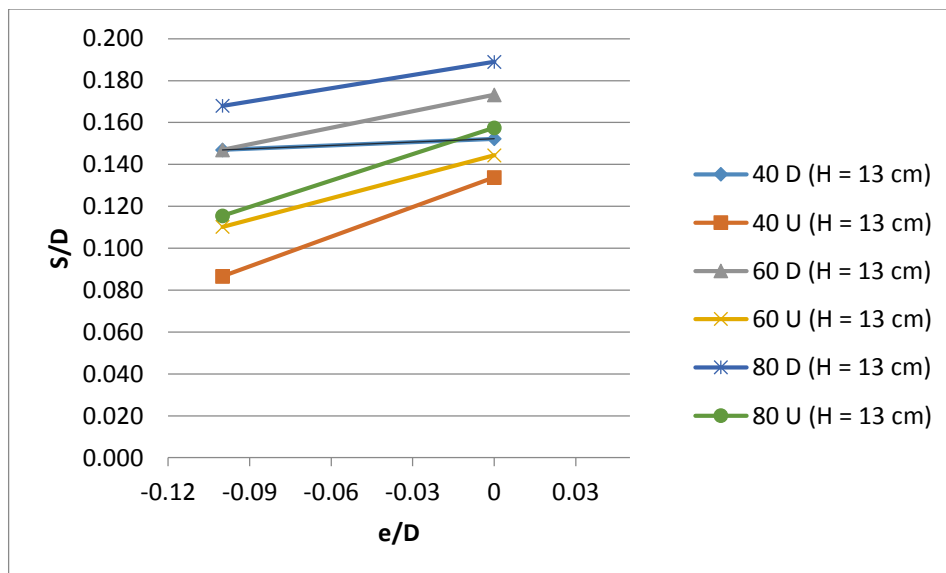
Pada hubungan nilai *shield parameter* (Θ) dengan S/D dan w/D menunjukkan inisiasi gerakan sedimen dalam aliran fluida. Berdasarkan grafik di atas dapat dikatakan nilai Θ memengaruhi besar kedalaman dan lebar *scouring*. Nilai Θ dipengaruhi oleh kecepatan orbital dan ukuran diameter tanah (d_{50}), sehingga jika kecepatan orbital semakin besar maka besar pula lubang *scouring* yang terjadi dalam kondisi

meletak maupun *in-trench*. Ukuran diameter tanah (d_{50}) berbanding terbalik dengan nilai *shield parameter* (Θ), karena jika ukuran tanah semakin besar maka akan semakin sulit untuk tersedimen dan terjadi *scouring* pada pipa

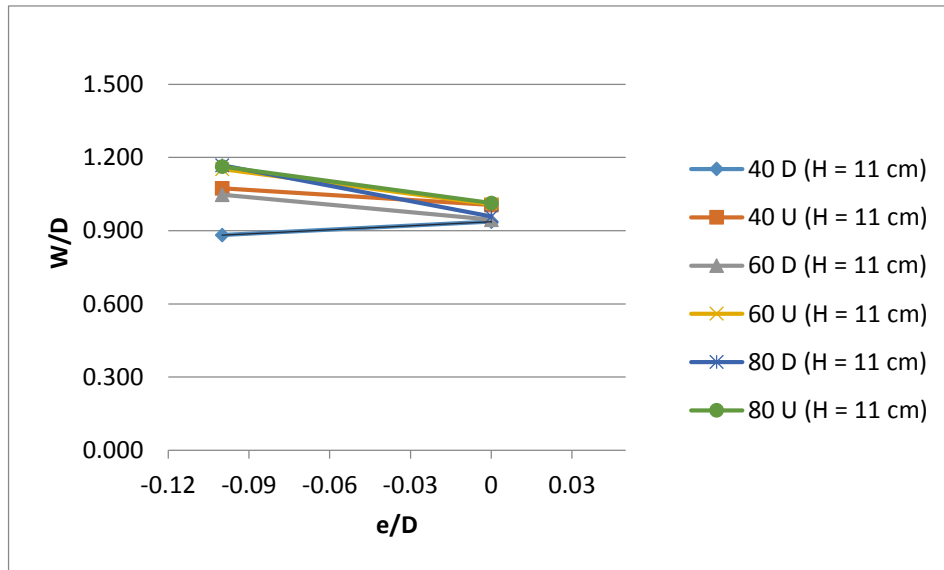
- *Burial Depth-Diameter ratio* (e/D)



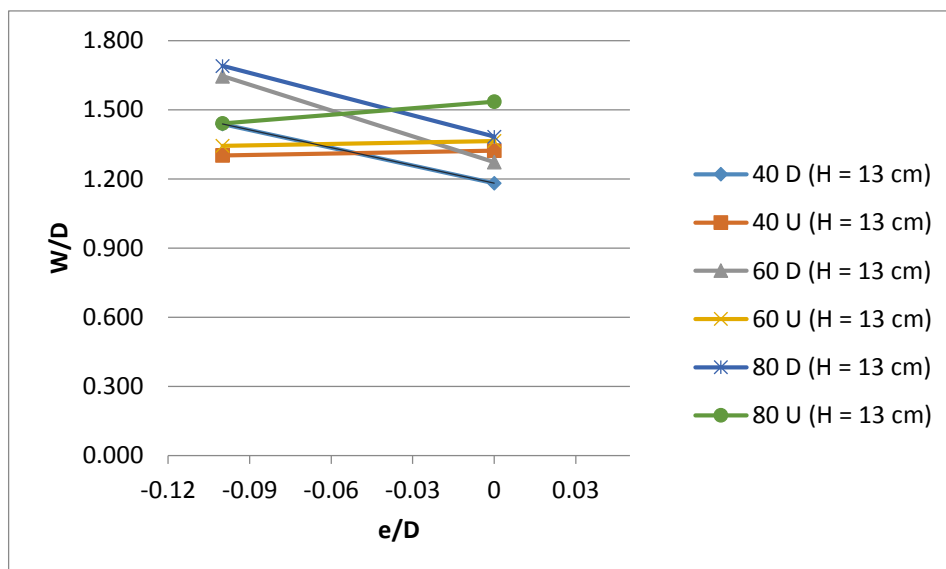
Gambar 4.95. Grafik hubungan e/D dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D) dengan $H = 11$ cm



Gambar 4.96. Grafik hubungan e/D dengan bilangan tak berdimensi kedalaman *scouring* (S/D) dengan $H = 13$ cm



Gambar 4.97. Grafik hubungan e/D dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D) dengan $H = 11$ cm

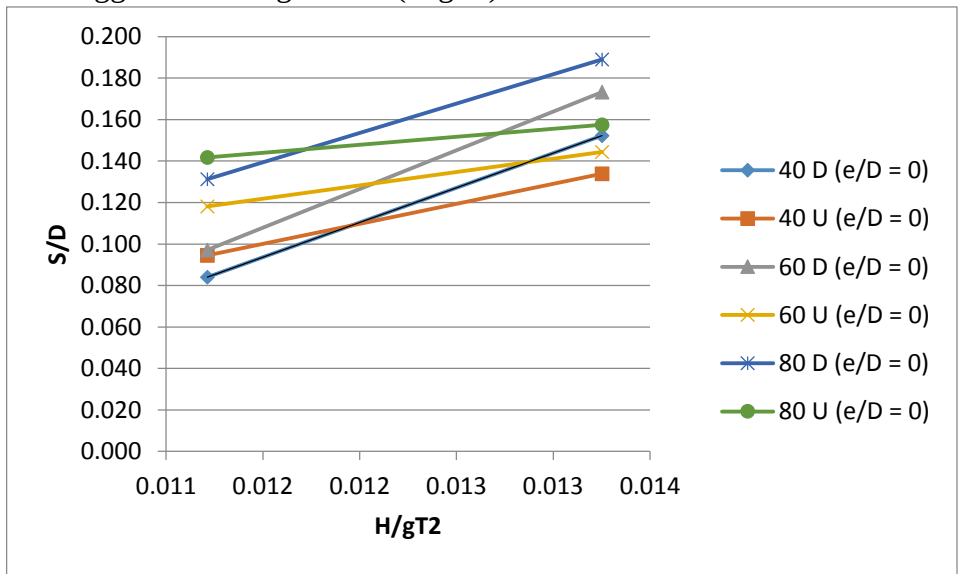


Gambar 4.98. Grafik hubungan e/D dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D) dengan $H = 13$ cm

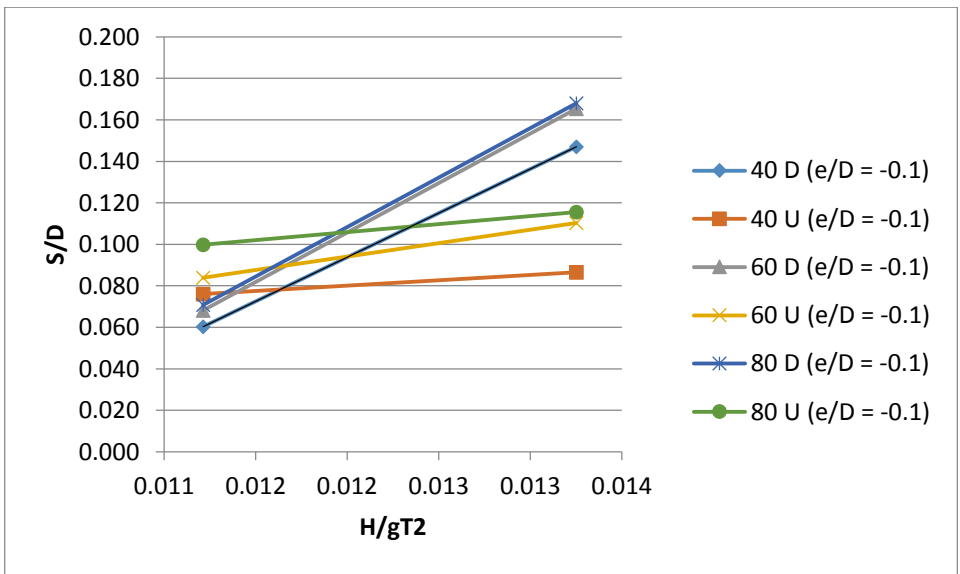
Dari grafik di atas dapat dikatakan bahwa kedalaman *scouring* terendah terdapat di $e/D = -0.1$ pada *gap* 40 cm, baik untuk gelombang 11 cm maupun 13 cm sehingga semakin pipa terendam ke dalam tanah maka semakin kecil *scouring* yang terjadi. Untuk lebar *scouring*, terjadi di jarak 40 cm dengan $e/D = -0.1$ sehingga dapat dikatakan sama dengan pola kedalaman *scouring*. Namun pada kondisi tertentu, nilai lebar *scouring* hasil eksperimen pada (H

= 11 cm untuk kedua pipa) menunjukkan lebih besar pada saat kondisi *in-trench*, sama dengan pada eksperimen ($H = 13$ cm untuk pipa belakang). Dapat dikatakan bahwa gelombang yang mengenai pipa yang terbenam sulit untuk membentuk lubang kedalam *scouring*, tetapi memperbesar lebar *scouring* pada pipa.

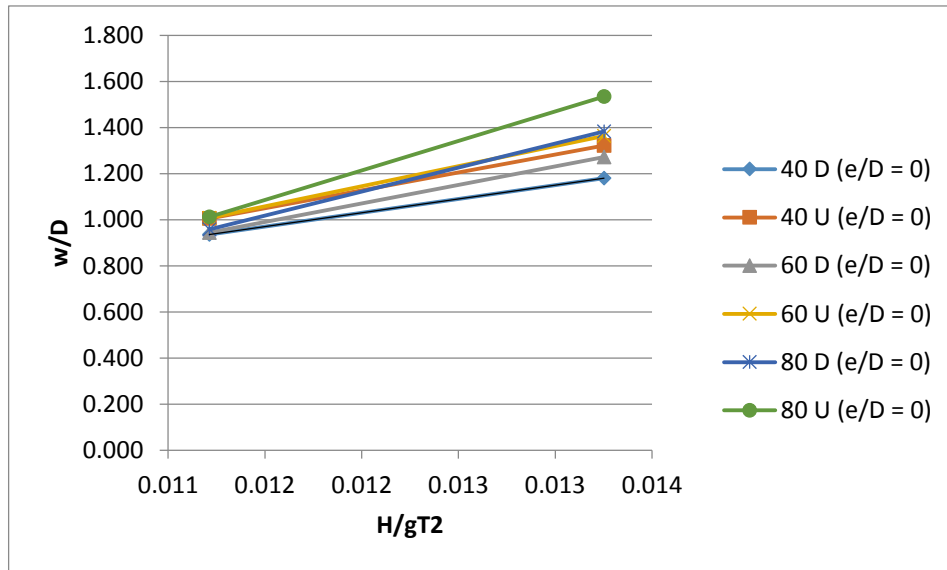
- Tinggi Gelombang Relatif (H/gT^2)



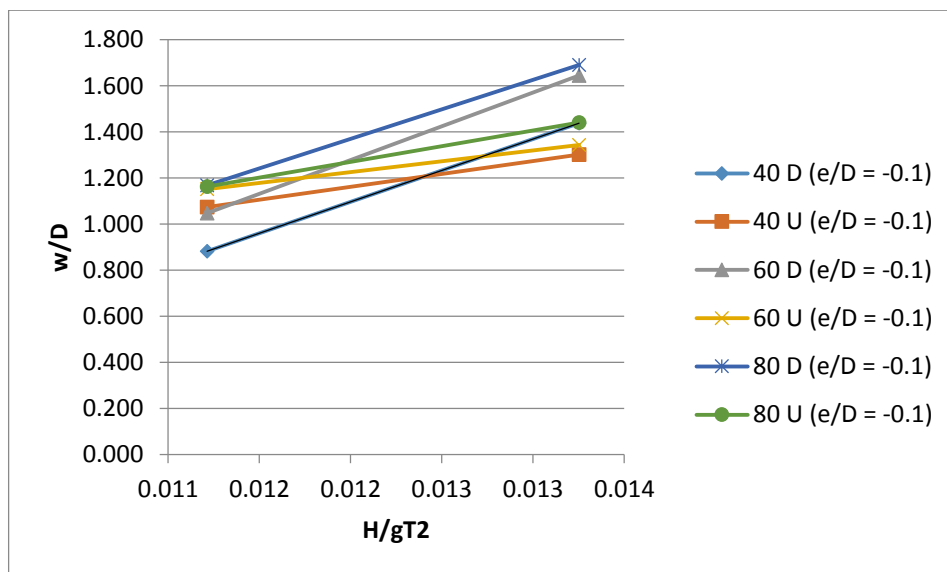
Gambar 4.99. Grafik hubungan H/gT^2 dengan bilangan tak berdimensi kedalam *scouring* (S/D) kondisi meletak



Gambar 4.100. Grafik hubungan H/gT^2 dengan bilangan tak berdimensi kedalam *scouring* (S/D) kondisi *in-trench*



Gambar 4.101. Grafik hubungan H/gT^2 dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D) kondisi meletak



Gambar 4.102. Grafik hubungan H/gT^2 dengan bilangan tak berdimensi lebar *scouring* (w/D) kondisi meletak

Berdasarkan grafik di atas dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi gelombang, maka semakin besar nilai S/D dan w/D pada setiap kondisi pipa dan kenaikan variasi *gap*. Hal sama dengan hubungan nilai KC terhadap besarnya *scouring*, karena nilai KC dipengaruhi oleh ketinggian gelombang (H) dan kemudian akan berpengaruh pada kedalaman dan lebar *scouring*.

4.7 Laju Propagasi *Scouring* terhadap Waktu

Laju propagasi *scouring* merupakan proses terjadinya *scouring* dalam waktu tertentu. Laju propagasi digunakan untuk menunjukkan kedalaman *scouring* maksimum dengan interval 5 menit untuk setiap variasi 25 menit. Laju propagasi *scouring* juga dibandingkan dengan perhitungan empiris saat *scouring* mencapai maksimum. Pada perhitungan empiris laju propagasi, pertama dilakukan perhitungan untuk nilai shield parameter (Θ) dan pengaruh waktu yang digunakan ($T^* = \text{time scale gelombang}$). Tabel 4.10 menunjukkan kondisi kesetimbangan sampai menit ke 30 pada perhitungan empiris.

Tabel 4.10. Kondisi kedalaman *scouring* mencapai kesetimbangan (empiris)

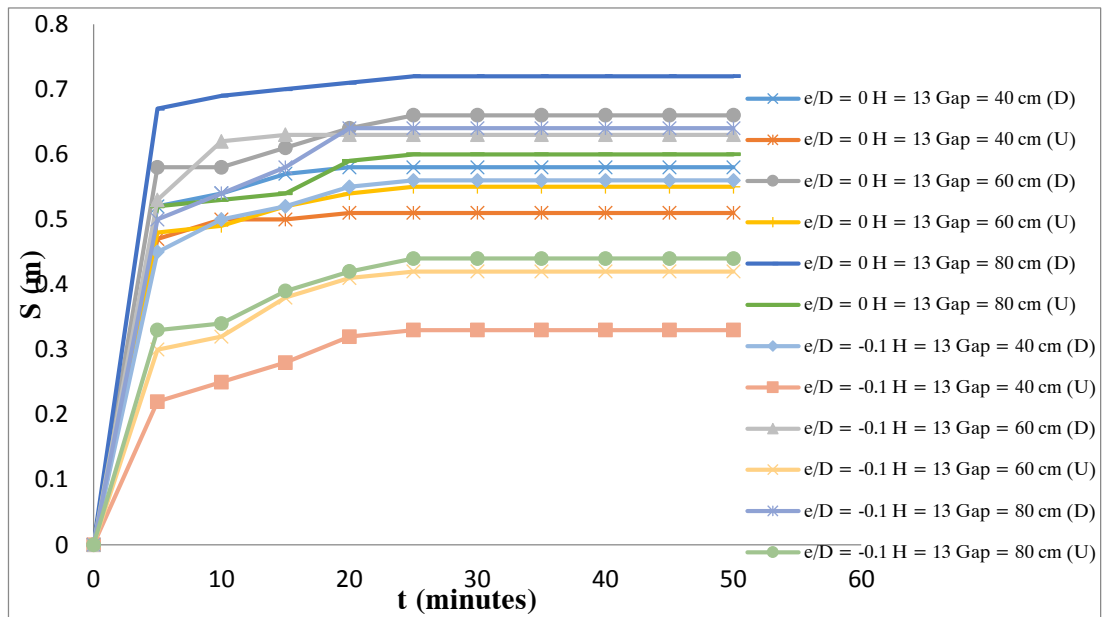
No	Gap (cm)	e/D	H (m)	T^*	T(m)	S (akhir)	St (menit)						
							0	5	10	15	20	25	30
1	40	0	0.11	7.732	4.107	0.595	0	0.419	0.543	0.579	0.590	0.594	0.594
2	60	0	0.11	7.732	4.107	0.595	0	0.419	0.543	0.579	0.590	0.594	0.594
3	80	0	0.11	7.732	4.107	0.595	0	0.419	0.543	0.579	0.590	0.594	0.594
4	40	-0.1	0.11	7.732	4.107	0.538	0	0.379	0.491	0.524	0.534	0.537	0.538
5	60	-0.1	0.11	7.732	4.107	0.538	0	0.379	0.491	0.524	0.534	0.537	0.538
6	80	-0.1	0.11	7.732	4.107	0.538	0	0.379	0.491	0.524	0.534	0.537	0.538
7	40	0	0.13	5.121	2.720	0.647	0	0.544	0.631	0.644	0.647	0.647	0.647
8	60	0	0.13	5.121	2.720	0.647	0	0.544	0.631	0.644	0.647	0.647	0.647
9	80	0	0.13	5.121	2.720	0.647	0	0.544	0.631	0.644	0.647	0.647	0.647
10	40	-0.1	0.13	5.121	2.720	0.585	0	0.492	0.571	0.583	0.585	0.585	0.585
11	60	-0.1	0.13	5.121	2.720	0.585	0	0.492	0.571	0.583	0.585	0.585	0.585
12	80	-0.1	0.13	5.121	2.720	0.585	0	0.492	0.571	0.583	0.585	0.585	0.585

Berdasarkan tabel empiris di atas, kedalaman *scouring* mencapai maksimum pada menit 30 sehingga pada menit selanjutnya. Pada tabel 4.11 ditunjukkan kedalaman *scouring* untuk hasil eksperimen tiap interval 5 menit.

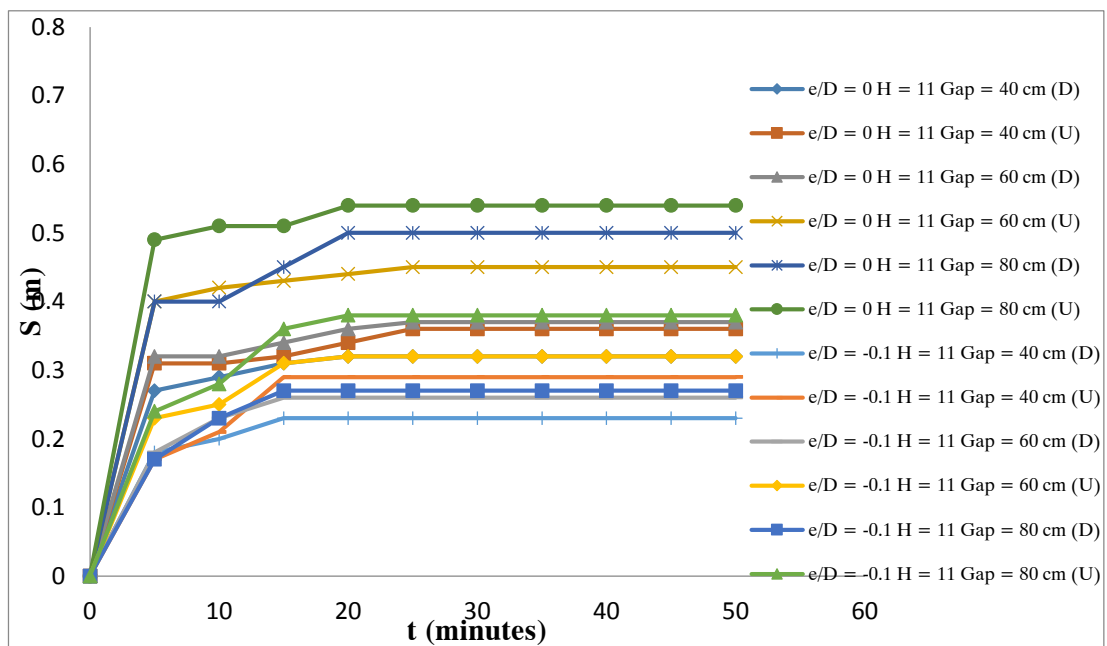
Tabel 4.11. Kondisi kedalaman *scouring* mencapai kesetimbangan (eksperimen)

No	Gap (cm)	e/D	H (m)	Poisisi	St (menit)										
					0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	40	0	0.11	Down	0	0.27	0.29	0.31	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
				Up	0	0.31	0.31	0.32	0.34	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
2	60	0	0.11	Down	0	0.32	0.32	0.34	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
				Up	0	0.4	0.42	0.43	0.44	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
3	80	0	0.11	Down	0	0.4	0.4	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
				Up	0	0.49	0.51	0.51	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
4	40	-0.1	0.11	Down	0	0.18	0.2	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
				Up	0	0.17	0.21	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
5	60	-0.1	0.11	Down	0	0.18	0.23	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
				Up	0	0.23	0.25	0.31	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
6	80	-0.1	0.11	Down	0	0.17	0.23	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
				Up	0	0	0.28	0.36	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
7	40	0	0.13	Down	0	0.52	0.54	0.57	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
				Up	0	0.47	0.5	0.5	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
8	60	0	0.13	Down	0	0.58	0.58	0.61	0.64	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
				Up	0	0.48	0.49	0.52	0.54	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
9	80	0	0.13	Down	0	0.67	0.69	0.7	0.71	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
				Up	0	0.52	0.53	0.54	0.59	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
10	40	-0.1	0.13	Down	0	0.45	0.5	0.52	0.55	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
				Up	0	0.22	0.25	0.28	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
11	60	-0.1	0.13	Down	0	0.53	0.62	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
				Up	0	0.3	0.32	0.38	0.41	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
12	80	-0.1	0.13	Down	0	0.5	0.54	0.58	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
				Up	0	0.33	0.34	0.39	0.42	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44

Berdasarkan tabel hasil eksperimen di atas untuk dua pipa dengan 12 variasi, kondisi setimbang terletak pada menit 25. Perubahan nilai kedalaman *scouring* pada menit 20 - 25 hanya mengalami perbedaan sedikit. Pada perhitungan empiris, letak kesetimbangan akhir berada pada menit ke 30, sehingga pada 25-30 menit mempunyai selisih yang sedikit. Dapat disimpulkan bahwa eksperimen memiliki waktu yang lebih cepat untuk terjadi *scouring* dan mengalami fase kesetimbangan. Laju *scouring* dari hasil eksperimen 12 variasi ditunjukkan dalam grafik seperti gambar 4.103 dan 4.104



Gambar 4.103. Laju propagasi *scouring* hingga kondisi setimbang dua pipa kondisi $H = 13$ cm



Gambar 4.104. Laju propagasi *scouring* hingga kondisi setimbang dua pipa kondisi $H = 11$ cm

4.8 Perbandingan Dengan Penelitian Lain

Pada perbandingan dengan penelitian lain ditunjukkan hasil dari eksperimen dan dari penelitian Westesthorstman yaitu dengan memvariasikan jarak antar dua pipa saja. Perbandingan ini hanya untuk menunjukkan bahwa setiap besarnya kenaikan jarak antar dua pipa, maka akan mempunyai nilai *scouring* yang besar. Dalam penelitian Westesthorstman, menggunakan kombinasi pembangkit arus saja, dan kombinasi arus gelombang. Pada tabel 4.12 ditunjukkan hasil kedalaman *scouring* dari setiap eksperimen dengan memvariasikan jarak antar pipa (gap) dan kedua hasil tersebut dibandingkan dalam grafik non-dimensioanal antara gap/D dan S/D untuk penelitian tersebut seperti pada gambar 4.105

Tabel 4.12. Kondisi kedalaman *scouring* mencapai kesetimbangan (eksperimen)

No	Gap (cm)	D (cm)	Gap/D	Hasil Penelitian			Kombinasi Pembangkit Gelombang dan/atau Arus
				S/D (Eksperimen)		S/D (Westesthorstman)	
				Downstream	Upstream		
1	40	3.81	10	0.084	0.094	-	Gelombang (Regular)
	80	3.81	20	0.131	0.142	-	
2	1.5	3	0.5	-	-	0.467	Gelombang dan Arus
	3	3	1	-	-	0.717	
3	1.5	3	0.5	-	-	0.581	Arus
	3	3	1	-	-	0.801	

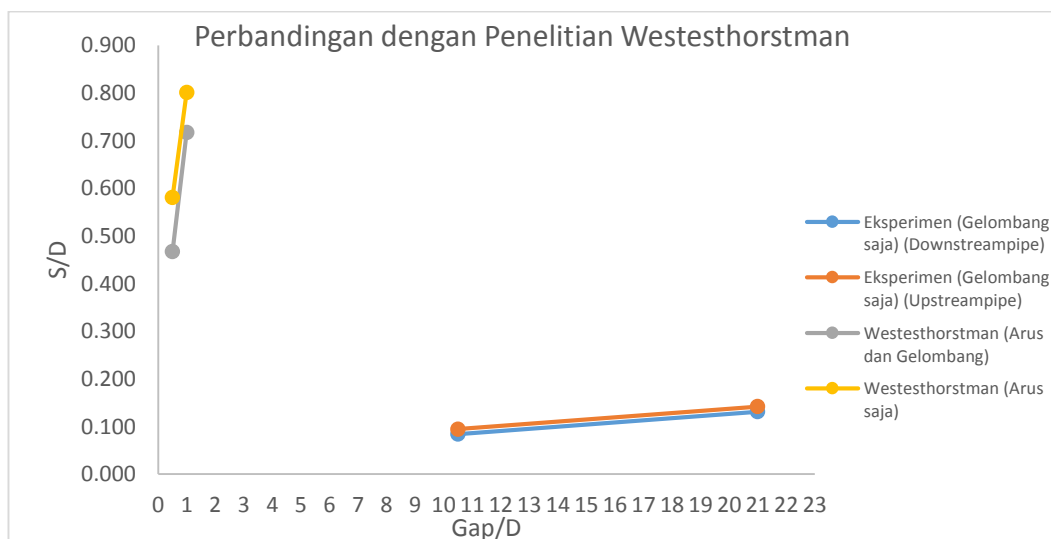
Keterangan

(Kondisi H = 13 cm, T= 1 s)

: Eksperimen

(Kondisi H= 6 cm, T=1.2 s, L=1 m, U=0.37 m/s)

: Penelitian Westesthorstman



Gambar 4.105. Perbandingan S/D dengan penelitian lain

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan eksperimen *scouring* pada dua pipa kondisi *in-trench* dan meletak akibat gelombang regular dengan variasi jarak antar pipa (*gap*) dapat disimpulkan:

1. Nilai kedalaman dan lebar *scouring* semakin besar dengan bertambahnya jarak antar dua pipa (*gap*), kondisi terbesar terjadi pada variasi dengan tinggi gelombang 13 cm, kondisi meletak ($e/D = 0$), jarak antar pipa 80 cm. Kedalaman *scouring* mencapai 0.64 cm dan lebar *scouring* mencapai 6.44 cm.
2. Berdasarkan analisa hubungan *scouring* dengan parameter tak berdimensi, *Keulegan Carpenter (KC)*, *Shield Parameter (Θ)*, *Burial Depth Diameter Ratio (e/D)*, *wave steepness (H/gT^2)*, dapat disimpulkan bahwa:
 - Semakin besar nilai KC, maka semakin besar kedalaman dan lebar *scouring* yang terbentuk.
 - Pengaruh posisi pipa (e/D) terhadap terjadinya proses *scouring*, yaitu semakin dalam pipa dibenamkan, semakin kecil kedalaman *scouring* namun semakin besar lebar *scouring* yang terjadi.
 - Semakin tinggi gelombang H/gT^2 yang mengenai pipa, maka semakin besar pula kedalaman dan lebar *scouring*
3. Berdasarkan laju propagasi *scouring* hasil eksperimen, kondisi *scouring* maksimum yang terjadi pada menit ke -25. Pada 5 menit pertama proses penggerusan pada pipa terjadi lebih besar.

5.2 Saran

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

1. Melakukan penelitian dengan penambahan variasi jarak antar pipa (*gap*), diameter butiran tanah dan setiap peninjauan perbedaan menggunakan 3 variasi untuk mendapatkan titik yang konstan.
2. Mencari literatur yang menunjang teori lebih banyak dan lengkap untuk materi *scouring* pada dua pipa.
3. Melakukan pemodelan *scouring* dengan software untuk 2D atau 3D.

DAFTAR PUSTAKA

- Budiarti, Listiea. 2016. *Pemodelan Numerik Profil 2d Scouring Pada Pipa Bawah Laut Dengan Variasi Jarak Clearance Terhadap Dasar Laut*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.
- CER, 1984. *Shore Protection Manual Volume I*. US Army Coastal Engineering Research Center. Washington DC.
- Cheng, L., Yeow, K., Zang, Z., Li, F. 2014. "3D Scour below Pipelines under Waves and Combined Waves and Currents." *Coastal Engineering*. (83): 137-149.
- Det Norske Veritas. 2000. *DNV-OS-F109 : Submarine Pipeline System*. Norway : Det Norske Veritas.
- Etemad-Shahidi, A., Yasa, R., Kazeminezhad, M. H. 2011. "Prediction of Wave-Induced Scour Depth under Submarine Pipelines Using Machine Learning Approach." *Applied Ocean Research*. 33(1), 54-59.
- Gao, F.P., Gu, X.Y., Jeng, D.S., Teo, H.T. 2014. "An experimental study for wave-induced instability of pipelines: the breakout of pipelines." *Applied Ocean Research*. (24): 84-90.
- Guo, B. dan J. Chacko. 2005. *Offshore Pipelines*. Elsevier Ocean Engineering Book Series. USA.
- Hughes, S.A. *Physical Models And Laboratory Techniques In Coastal Engineering*. Coastal Engineering Research Center Waterways Experiment Station. USA.
- Kinsman, B. 1965. *Windwave*. Dove Publication. Inc, New York.
- Law, Averill M. dan W. David Kelton. 1991. *Simulation Modeling & Analysis, 2nd ed.*, McGraw-Hill. New York.
- Mouselli, A. H. 1981. *Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods*. Oklahoma. PenWell Books.
- Rahayu, N.D. 2017. *Studi Eksperimen Scouring pada Pipa Meletak dan In-Trench Akibat Gelombang Reguler*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.

- Pebriantina, Minati. 2016. *Analisa Scouring Pipa Bawah Laut Kondisi In-Trench dan Pengembangan Perangkat Lunak untuk Pemodelan Matematis dengan Variasi Diameter Pipa*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.
- Ramadhan, Dimas. 2017. *Studi Eksperimen Scouring Pada Pipa Akibat Gelombang Iregular Dengan Kondisi Meletak Dan in-Trench*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.
- Soegiono. 2004. *Pipa Bawah Laut*. Airlangga University Press, Surabaya.
- Soulsby, R. 1997. *Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications*. Thomas Telford.
- Sudarto, D.W. 2007. *Pengujian Koefisien Transmisi Pada Model Pemecah Gelombang Tenggelam Dari Struktur Akresi Mineral*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITB. Bandung
- Sumer, B.M. dan J. Fredsøe. 2002. *The Mechanical of Scour in the Marine Environment*. Denmark : World Scientific.
- Sumer, B.M., Truelsen, C., Sichmann, T., Fredsøe, J., 2001. "Onset of scour below pipelines and self-burial". *Coastal Eng.* 42 (4), 213–235.
- Suntoyo, Mustain. M., Ikhwan, H., dan Wisudawan, A. 2016. *Applikasi Pemodelan Turbulent Boundary Layer untuk Pengembangan Model Scouring pada Marine Pipeline di Perairan Indonesia dan Penanggulangannya*. Usulan PUPT ITS. Surabaya.
- Jia, S. dan Feng, Q. 2011. "Identifying Minimum Safe Distance between Adjacent Parallel Pipelines". ASCE.
- Triatmodjo, Bambang. 1999. *Teknik Pantai*. Beta Offset, Yogyakarta.
- Westerhorstmann, J.H. 1988. *The Effect of Pipe Spacing on Marine Pipeline Scour*. Thesis. Master of Science Ocean Engineering. Texas A&M University.
- Westerhorstmann, J.H., Machemehl, J.L., Jo, C.H., 1992. "Effect of Pipe Spacing On Marine Pipeline Scour". *Proceeding Of The 2nd International Offshore And Polar Engineering Conference*. San Francisco, June 14–19.

Yuwono, Nur. Ir.Dipl.HE. 1982. *Teknik Pantai Volume 1*. Biro Penerbit KMTS Fak. Teknik UGM. Yogyakarta.

Zakaria, A. 2012. *Rekayasa Pantai dan Pelabuhan*. Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung. Lampung.

Zhao, M., Vaidya, S., Zhang, Q., Cheng L. 2015. "Local Scour Around Two Pipelines In Tandem In Steady Current". *Coastal Engineering*. (98) : 1-15.

Oil States Industries. 1942. *Subsea Pipeline Systems*.

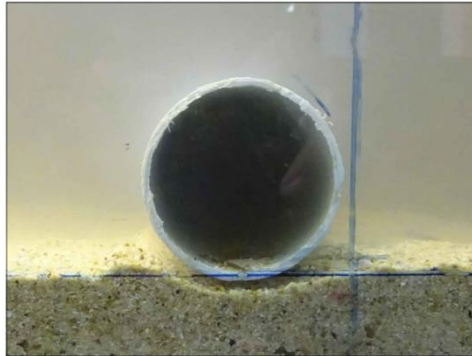
<http://oilstates.com/subsea-pipeline-systems/deepwater/> Diakses pada 8 Februari 2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

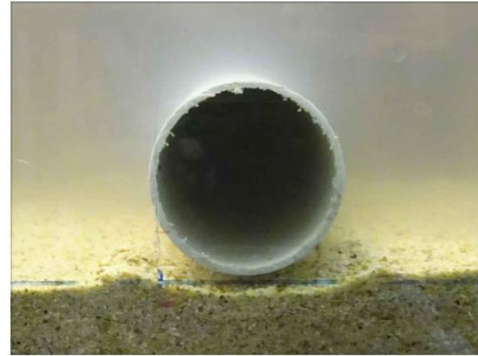
LAMPIRAN A
HASIL PROFIL 2D SCOURING SETIAP PENCATATAN 5 MENIT

1. Kondisi $e/D = 0$, $H = 11$ cm, gap = 40 cm

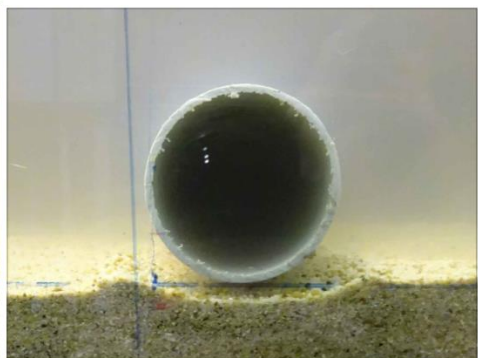
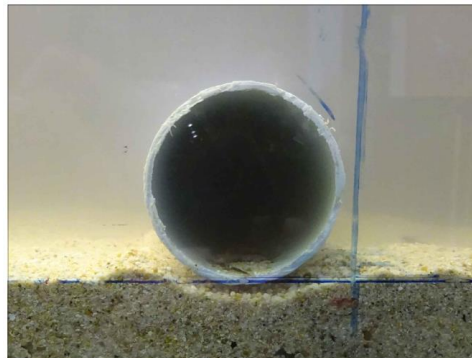
Downstream Pipe



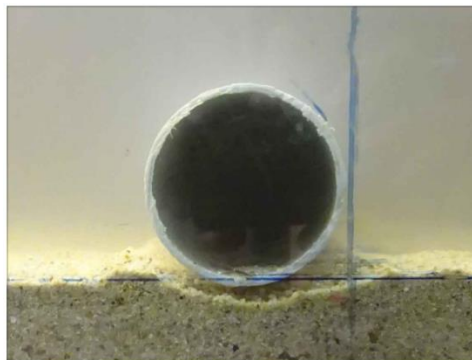
Upstream Pipe



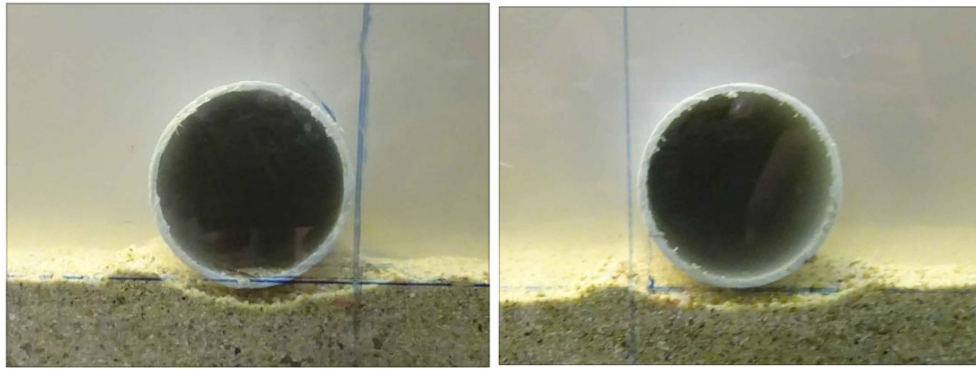
t = 5 menit



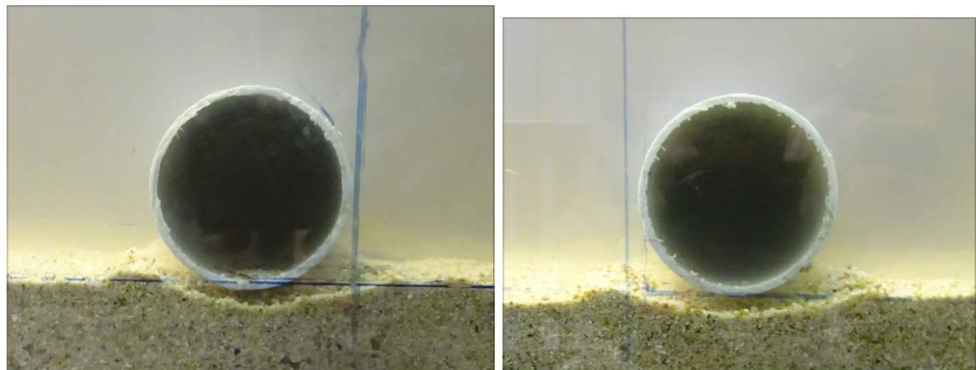
t = 10 menit



t = 15 menit



t = 20 menit

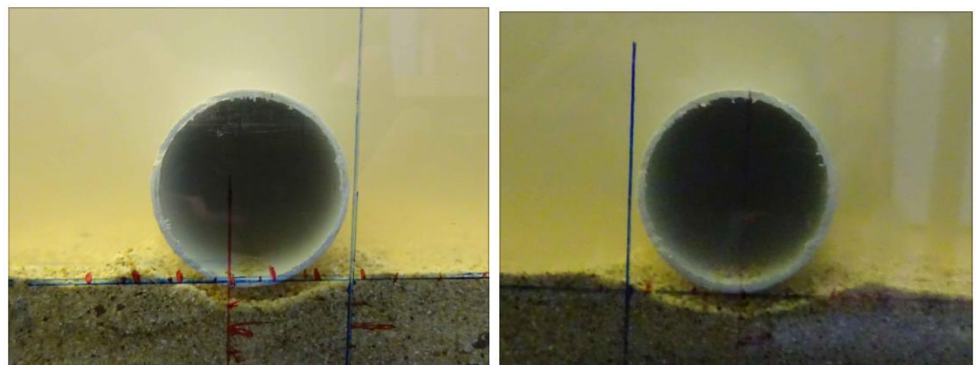


t = 25 menit

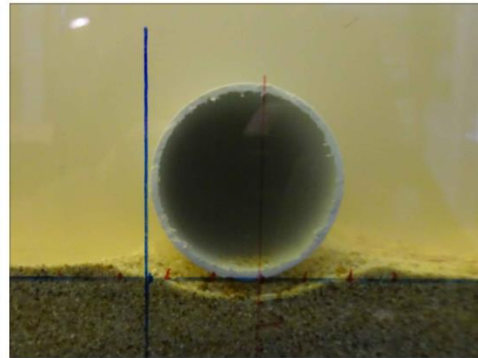
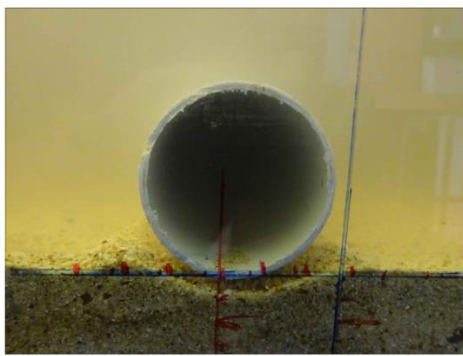
2. Kondisi $e/D = 0$, $H = 11$ cm, gap = 60 cm

Downstream Pipe

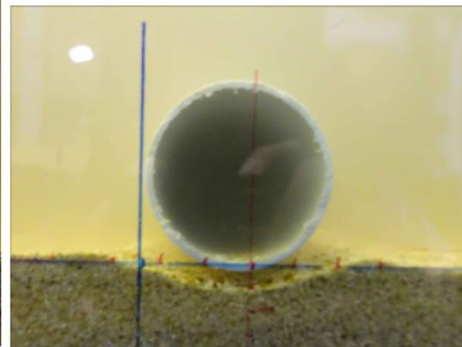
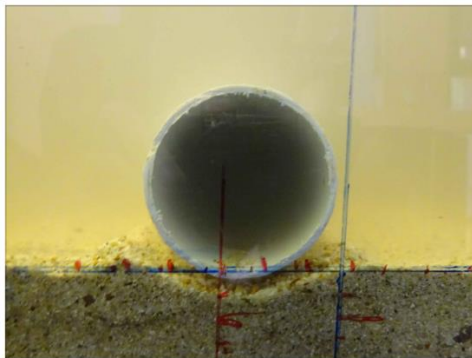
Upstream Pipe



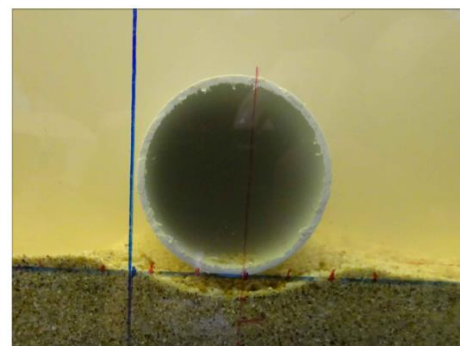
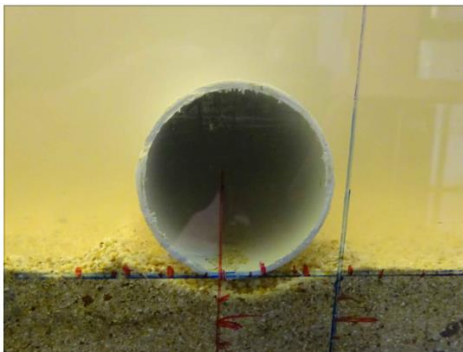
t = 5 menit



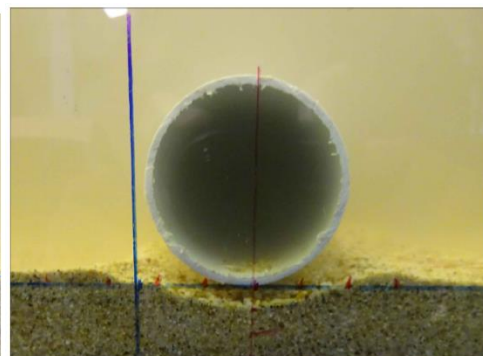
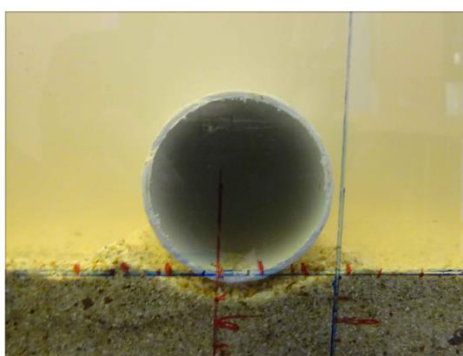
t = 10 menit



t = 15 menit



t = 20 menit

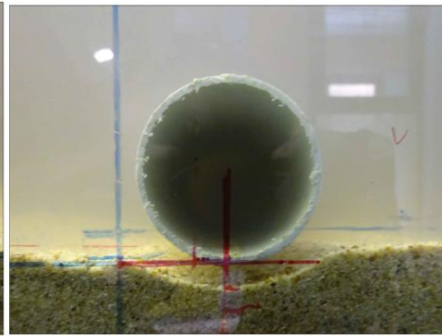
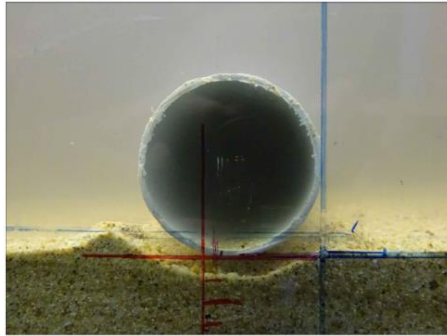


t = 25 menit

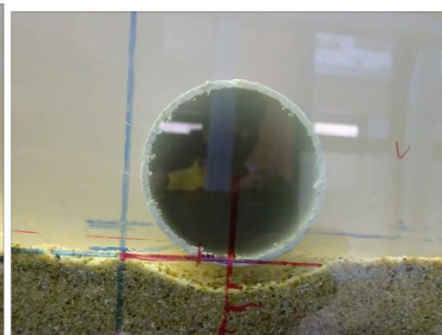
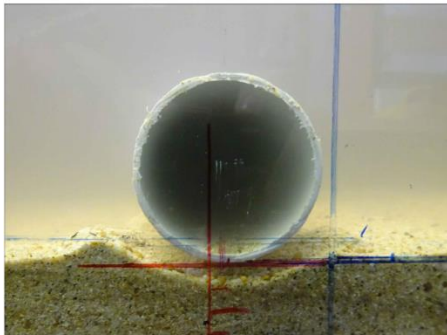
3. Kondisi $e/D = 0$, $H = 11$ cm, gap = 80 cm

Downstream Pipe

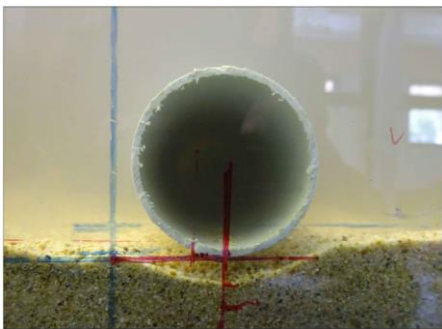
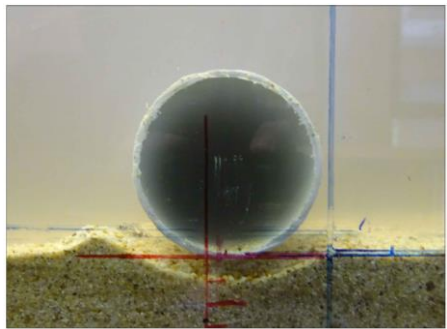
Upstream Pipe



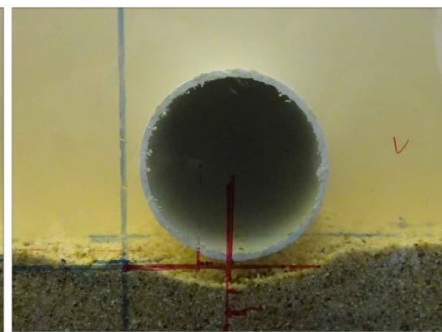
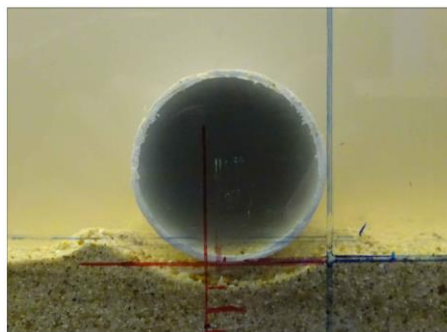
$t = 5$ menit



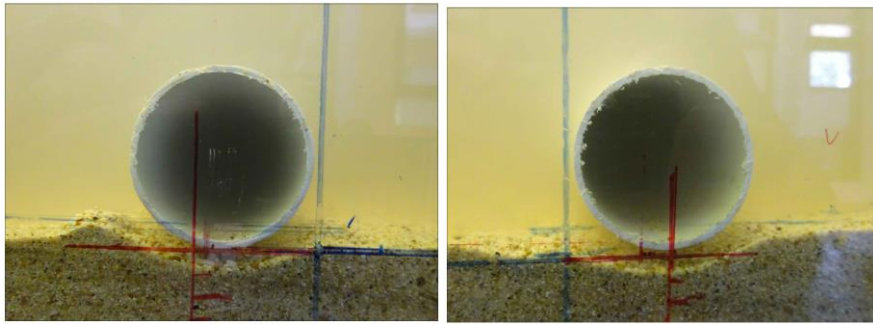
$t = 10$ menit



$t = 15$ menit



$t = 20$ menit

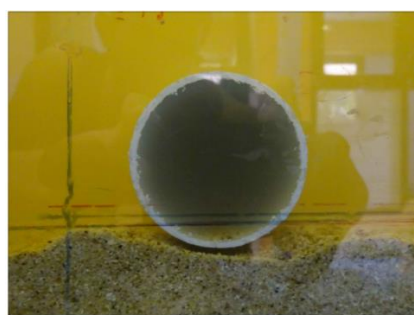
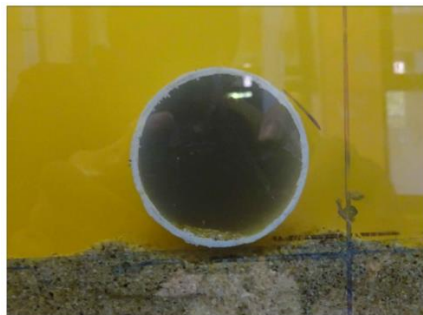


t = 25 menit

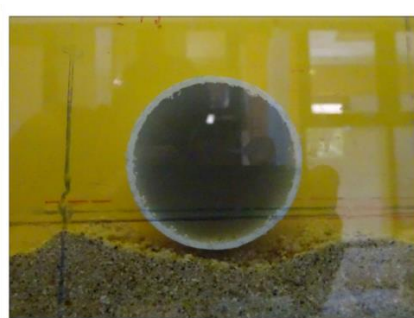
4. Kondisi $e/D = -0.1$, $H = 11$ cm, gap = 40 cm

Downstream Pipe

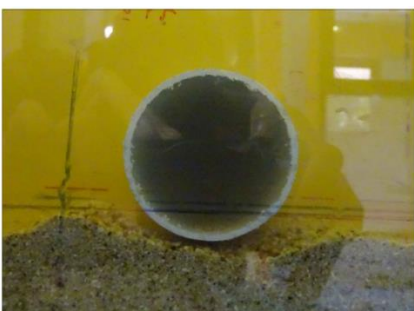
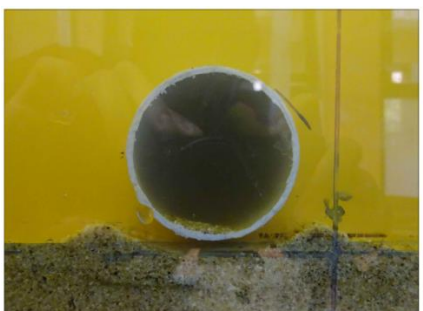
Upstream Pipe



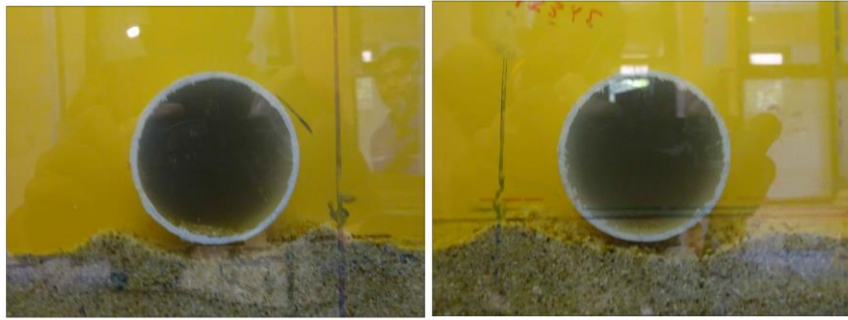
t = 5 menit



t = 10 menit



t = 15 menit

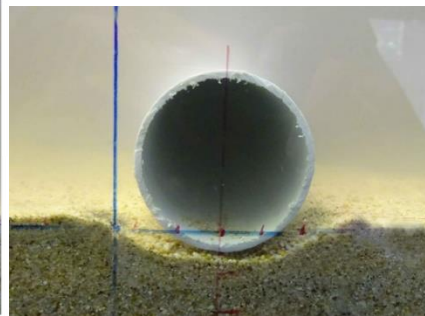
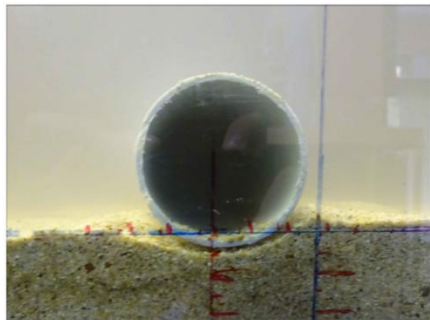


t = 20 menit

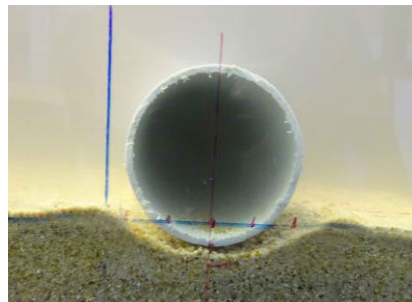
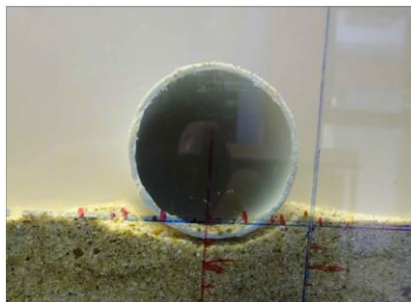
5. Kondisi $e/D = -0.1$, $H = 11$ cm, gap = 60 cm

Downstream Pipe

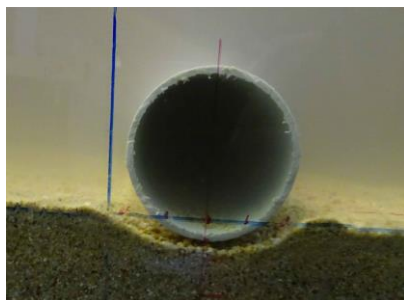
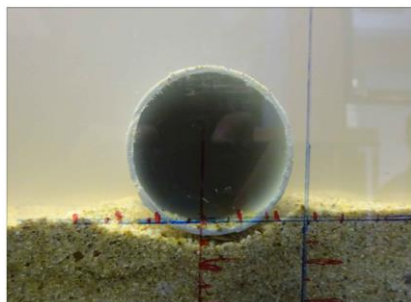
Upstream Pipe



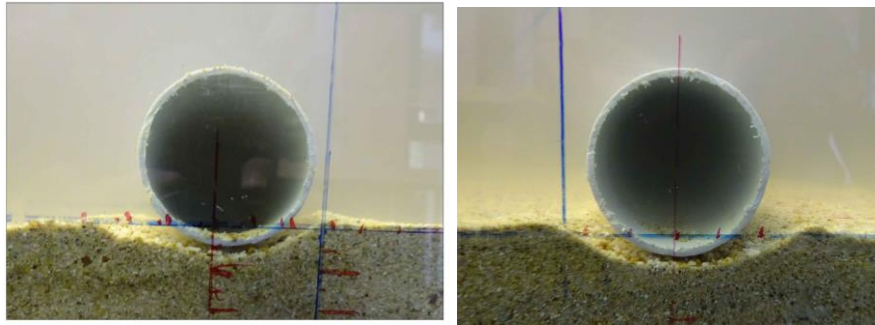
t = 5 menit



t = 10 menit



t = 15 menit

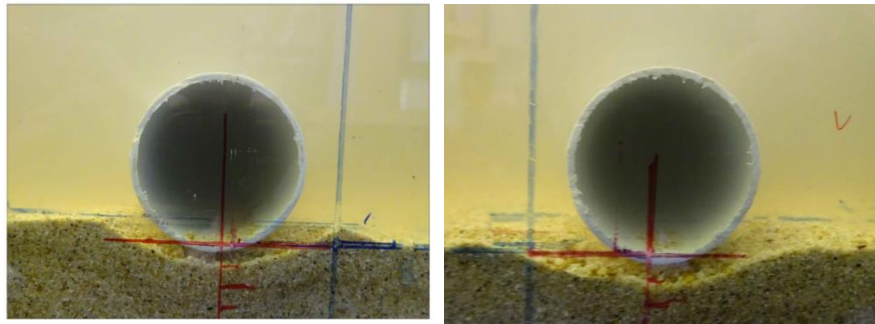


t = 20 menit

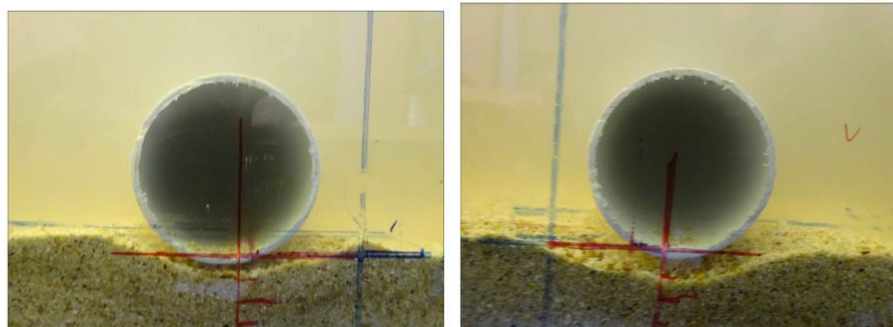
6. Kondisi $e/D = -0.1$, H 11 cm, gap = 80 cm

Downstream Pipe

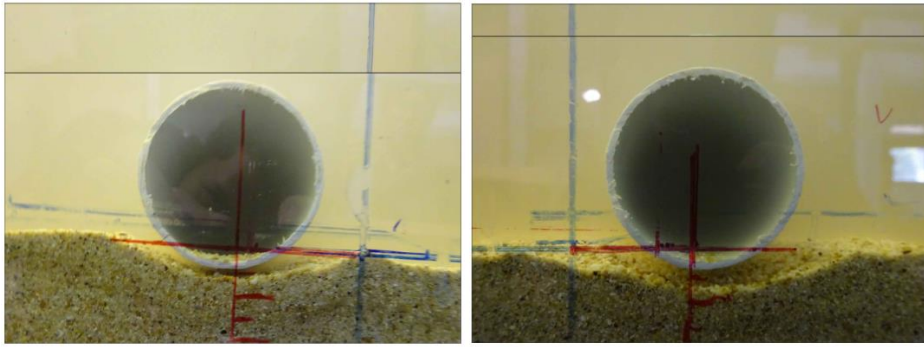
Upstream Pipe



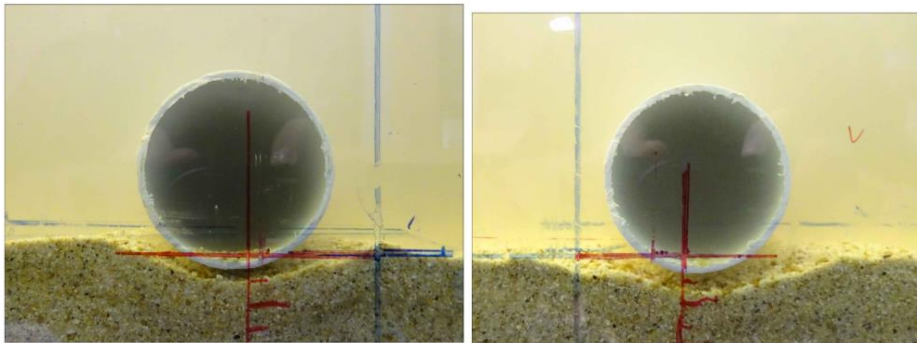
t = 5 menit



t = 10 menit



t = 15 menit

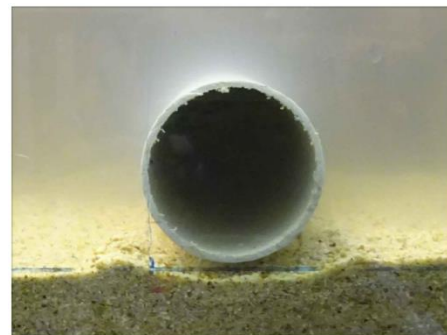
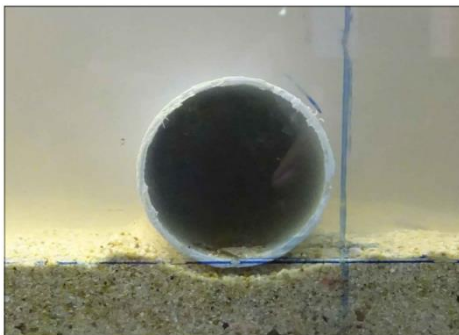


t = 20 menit

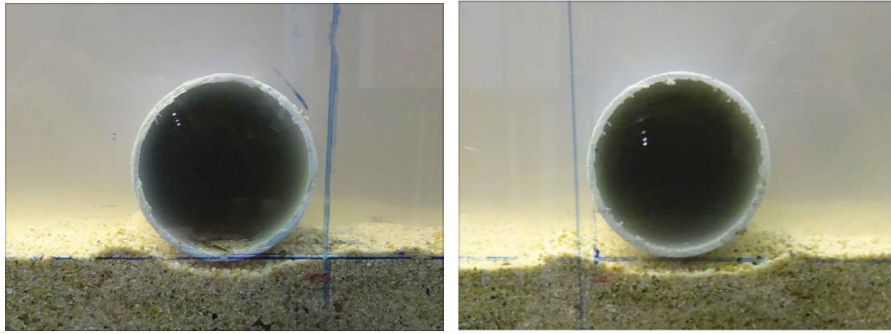
7. Kondisi $e/D = 0$, $H = 13$ cm, gap = 40 cm

Downstream Pipe

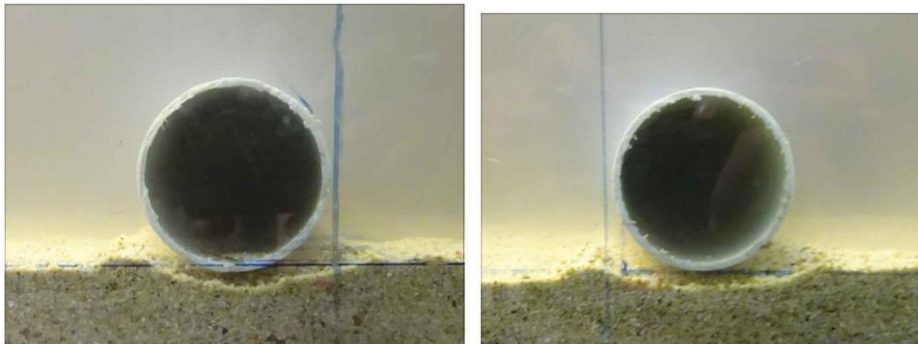
Upstream Pipe



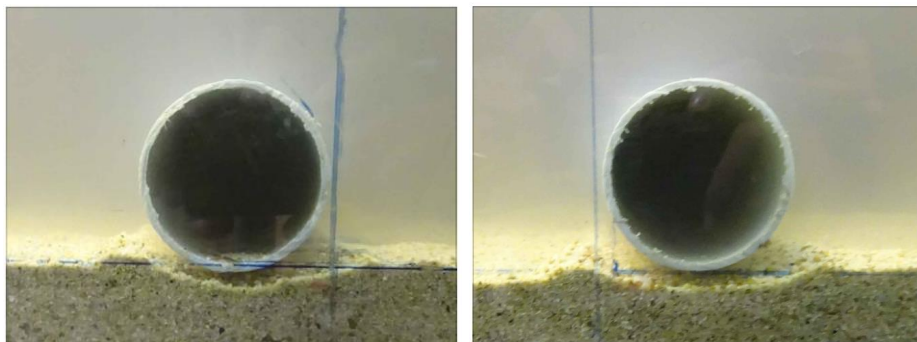
t = 5 menit



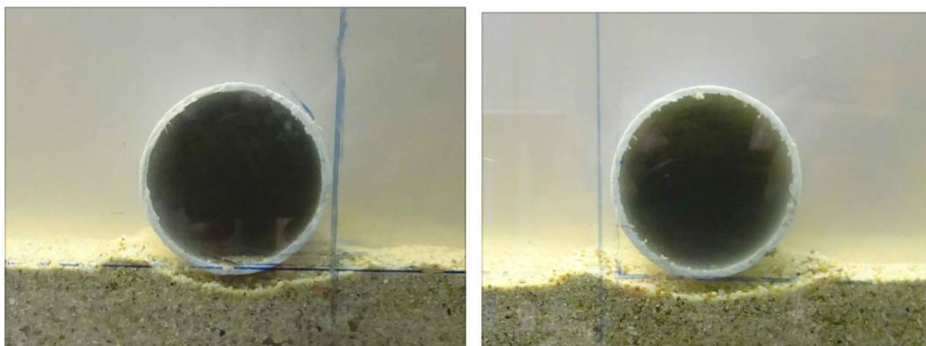
t = 10 menit



t = 15 menit



t = 20 menit

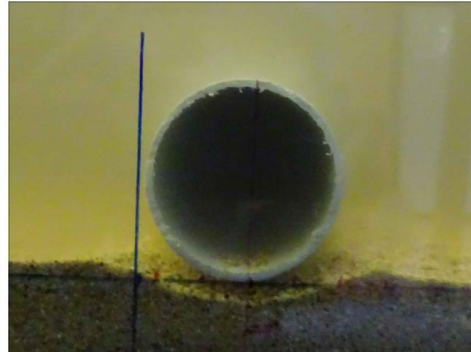
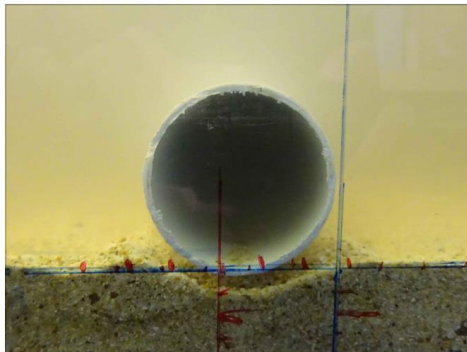


t = 25 menit

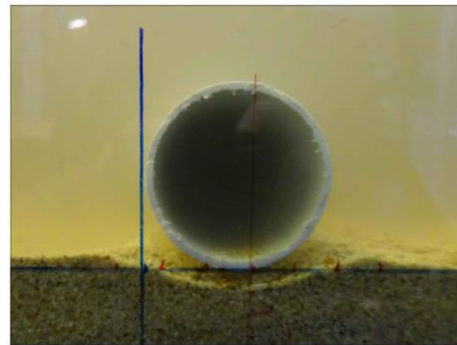
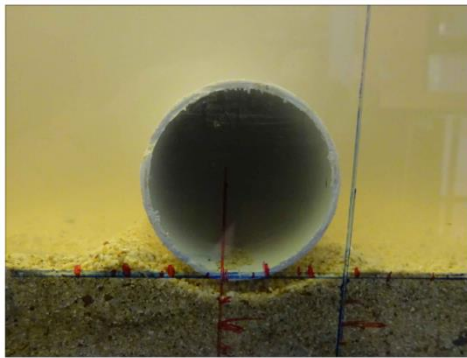
8. Kondisi $e/D = 0$, $H = 13$ cm, gap = 60 cm

Downstream Pipe

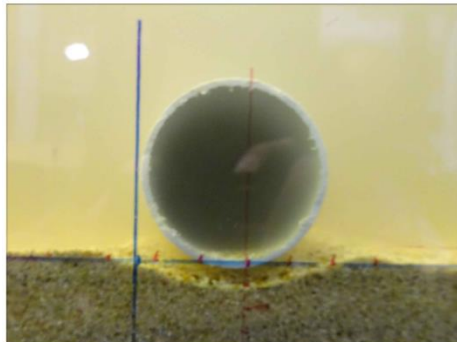
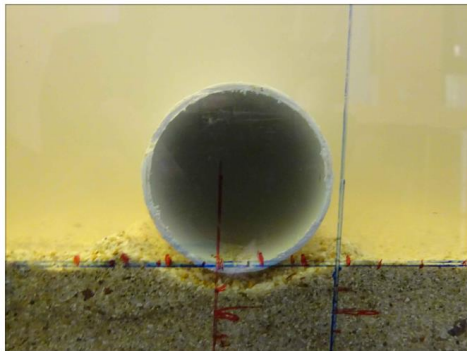
Upstream Pipe



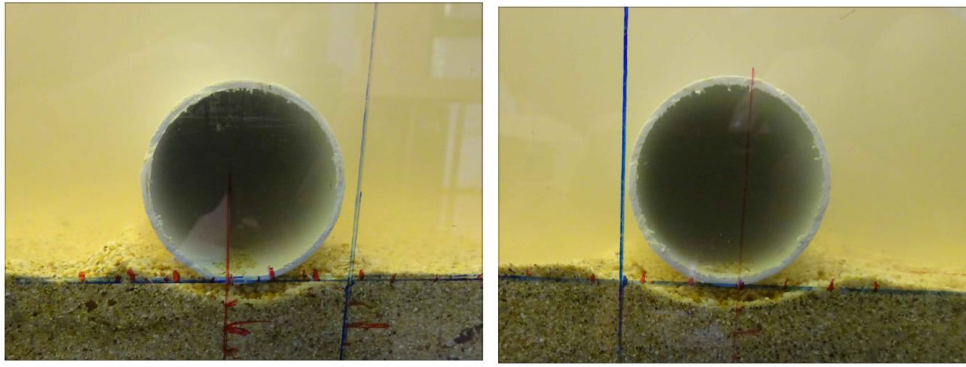
t = 5 menit



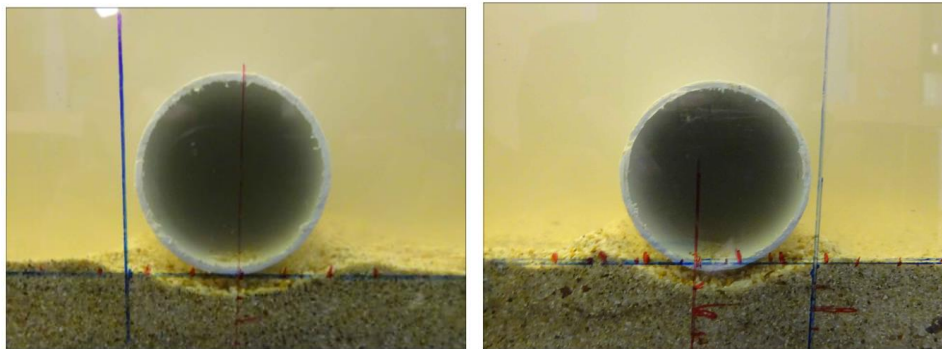
t = 10 menit



t = 15 menit



t = 20 menit

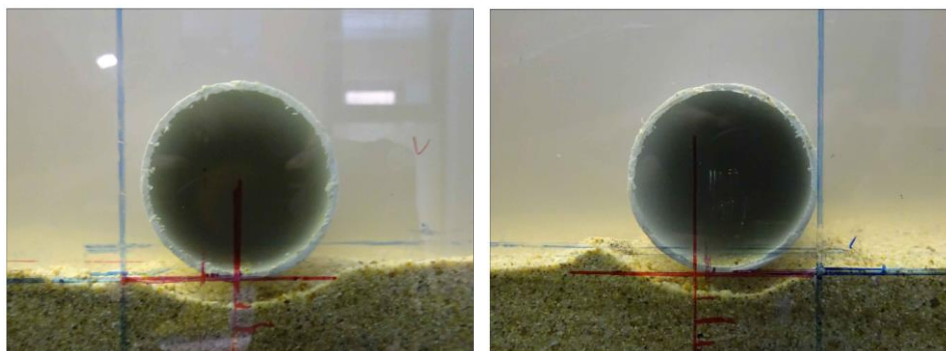


t = 25 menit

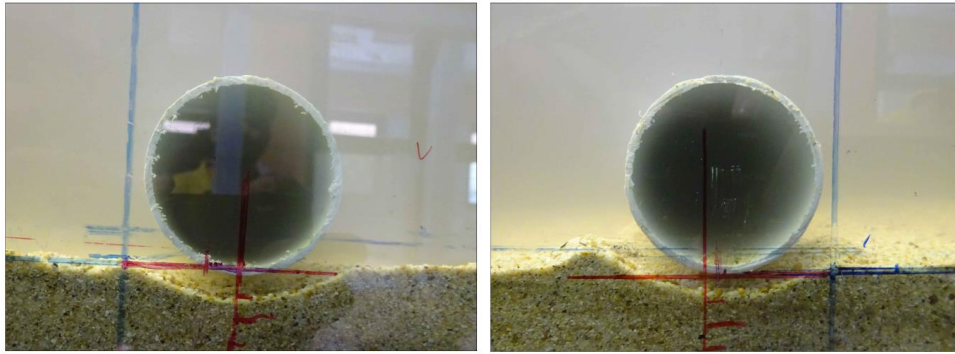
9. Kondisi $e/D = 0$, $H = 13$ cm, gap = 80 cm

Downstream Pipe

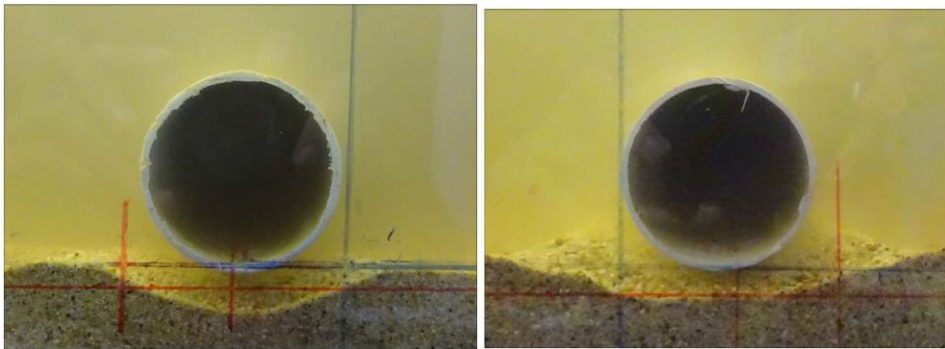
Upstream Pipe



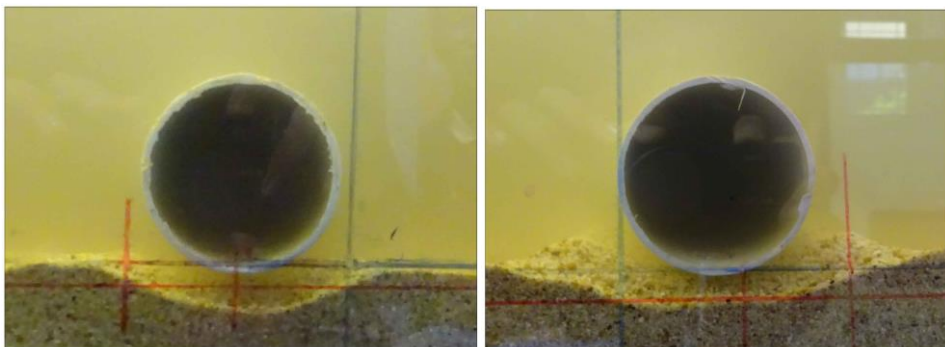
t = 5 menit



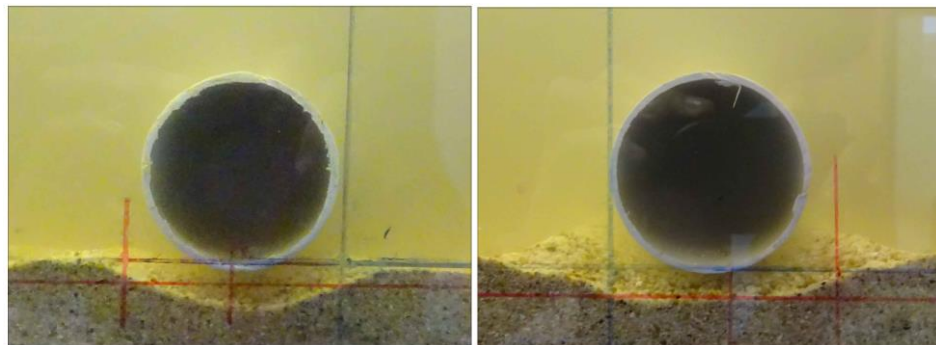
t = 10 menit



t = 15 menit



t = 20 menit

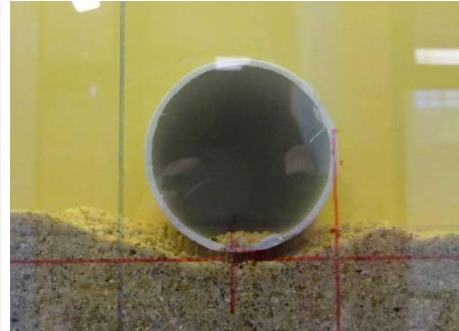
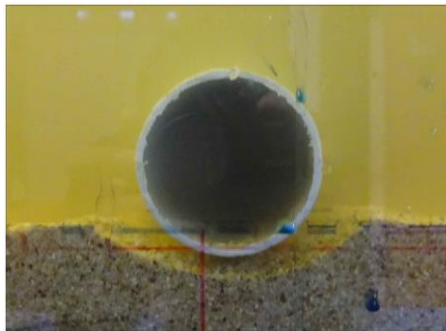


t = 25 menit

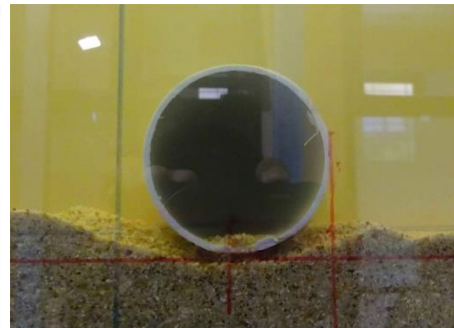
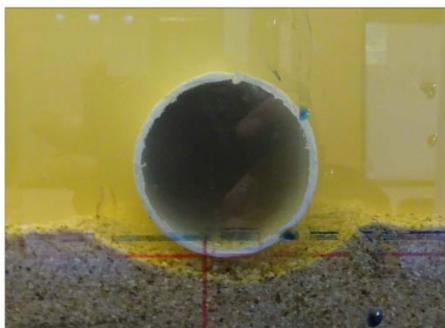
10. Kondisi $e/D = -0.1$, $H = 13$ cm, gap = 40 cm

Downstream Pipe

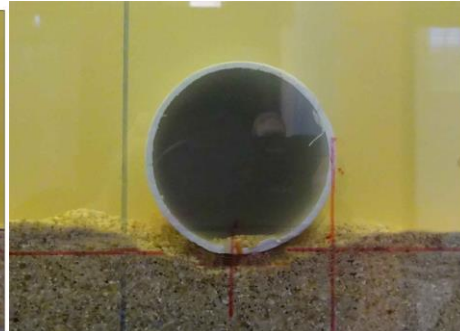
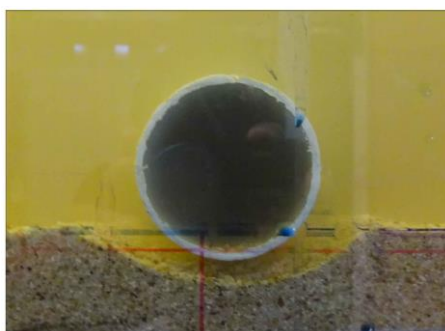
Upstream Pipe



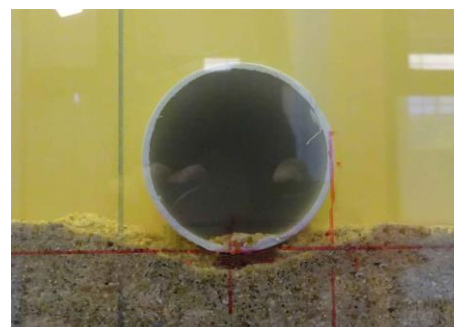
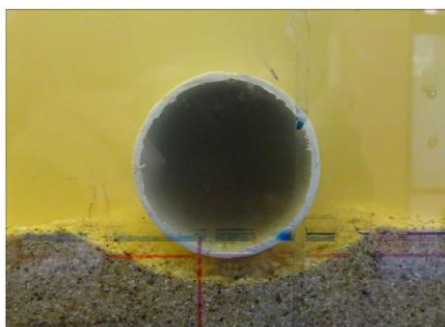
t = 5 menit



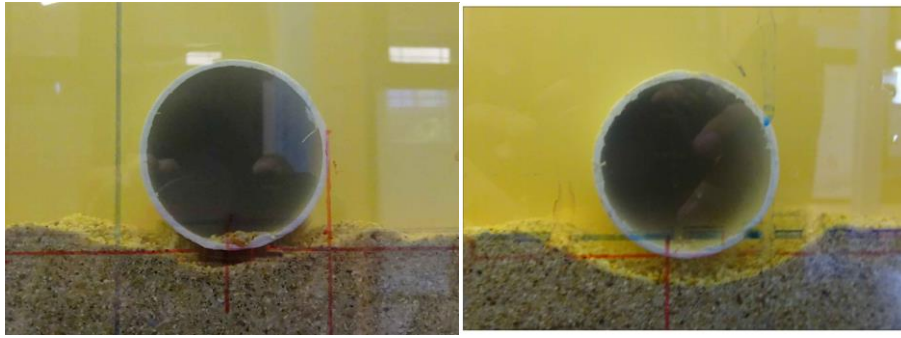
t = 10 menit



t = 15 menit



t = 20 menit

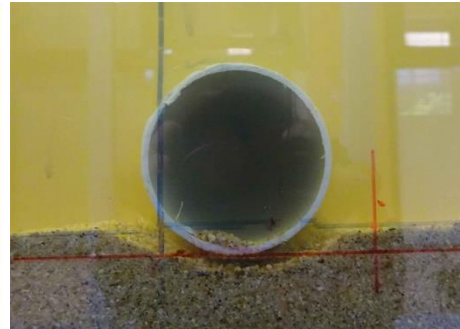
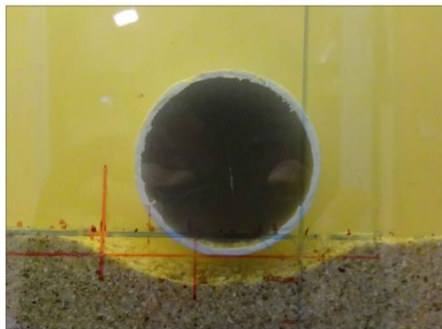


t = 25 menit

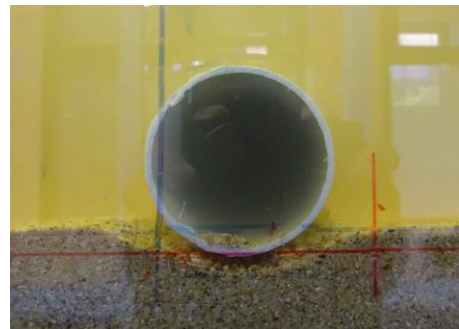
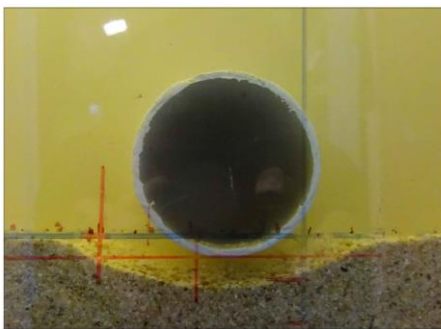
11. Kondisi $e/D = -0.1$, $H = 13$ cm, gap = 60 cm

Downstream Pipe

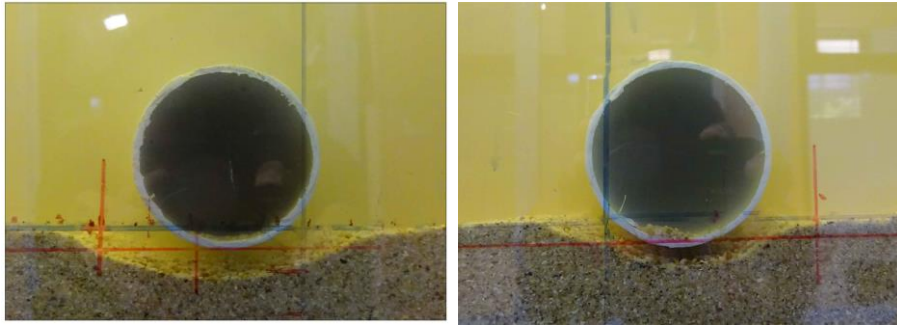
Upstream Pipe



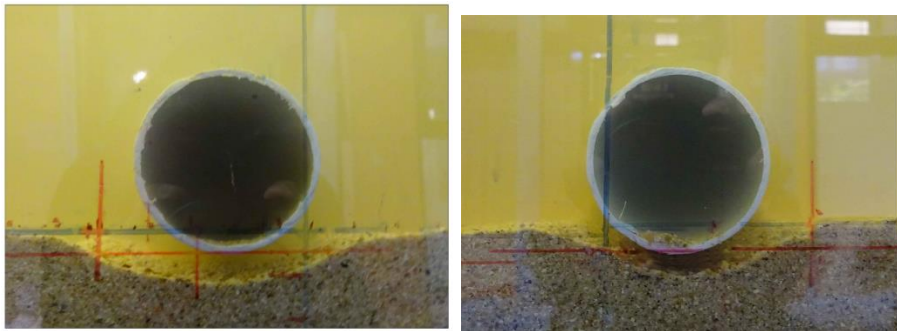
t = 5 menit



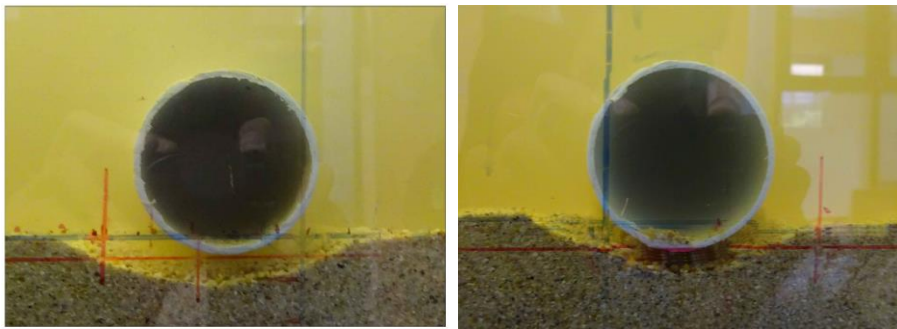
t = 10 menit



t = 15 menit



t = 20 menit

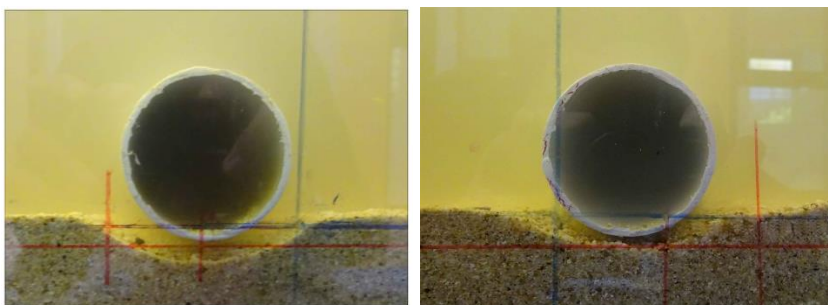


t = 25 menit

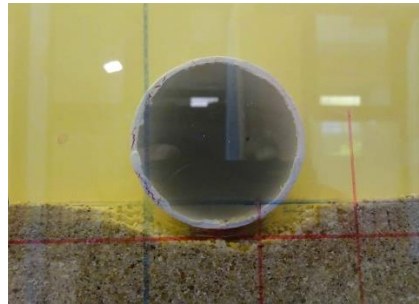
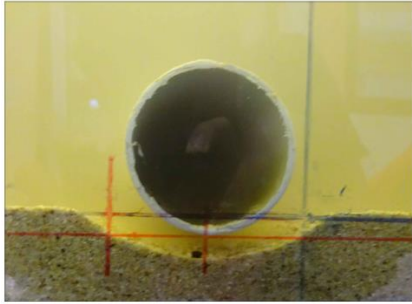
12. Kondisi $e/D = -0.1$, $H = 13$ cm, gap = 80 cm

Downstream Pipe

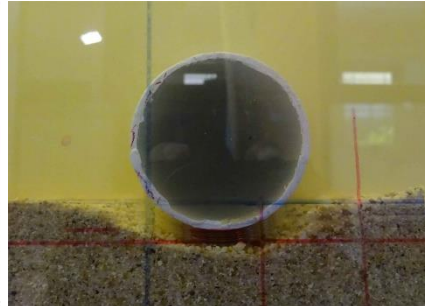
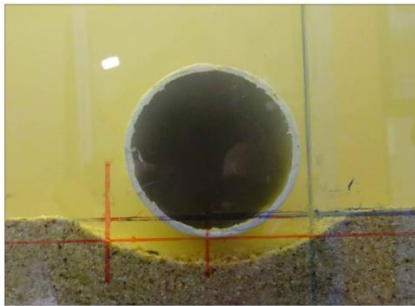
Upstream Pipe



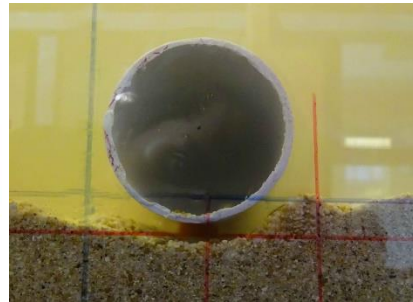
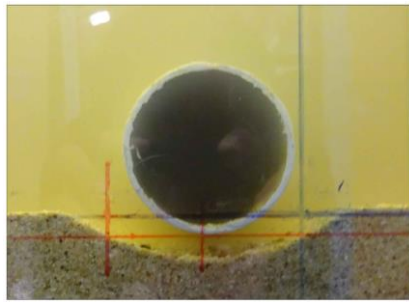
t = 5 menit



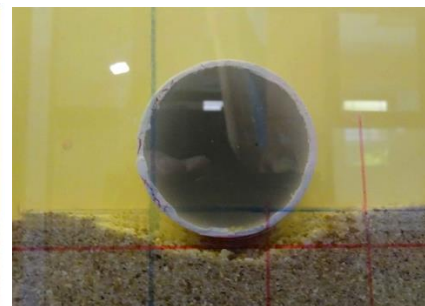
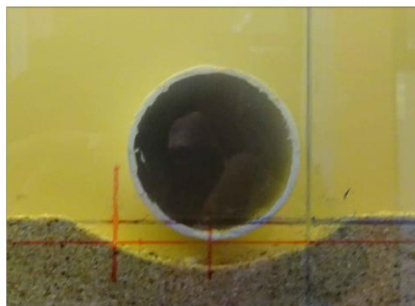
t = 10 menit



t = 15 menit



t = 20 menit



t = 25 menit

LAMPIRAN B

TABEL PERHITUNGAN EMPIRIS

1. Perhitungan mencari nilai kedalaman (S) dan lebar (w), untuk satu pipa

No	Gap (m)	H (m)	e/D	g	Lo	h/LO	sinh (kh)	tanh (kh)	L
1	0.4	0.11	0	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
2	0.6	0.11	0	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
3	0.8	0.11	0	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
4	0.4	0.11	-0.1	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
5	0.6	0.11	-0.1	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
6	0.8	0.11	-0.1	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
7	0.4	0.13	0	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
8	0.6	0.13	0	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
9	0.8	0.13	0	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
10	0.4	0.13	-0.1	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
11	0.6	0.13	-0.1	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909
12	0.8	0.13	-0.1	9.81	1.56131	0.320244	3.9196	0.9690	1.512909

k	ω^2	g k tanh (kh)	Error (%)	a	Um	KC
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.01401	0.08803	2.200743
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.01401	0.08803	2.200743
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.01401	0.08803	2.200743
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.01401	0.08803	2.200743
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.01401	0.08803	2.200743
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.01401	0.08803	2.200743
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.016558	0.104035	2.600879
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.016558	0.104035	2.600879
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.016558	0.104035	2.600879
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.016558	0.104035	2.600879
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.016558	0.104035	2.600879
4.15304	39.4784	39.4806	0.00552	0.016558	0.104035	2.600879

d50	A	Zo	fw	Ufm2	Θ	S/D	S (cm)	w	w (cm)
0.00057	0.01402	0.00005	0.0722	0.00028	0.0270	0.15614	0.59	0.0223	4.45
0.00057	0.01402	0.00005	0.0722	0.00028	0.0270	0.15614	0.59	0.0223	4.45
0.00057	0.01402	0.00005	0.0722	0.00028	0.0270	0.15614	0.59	0.0223	4.45
0.00057	0.01402	0.00005	0.0722	0.00028	0.0270	0.14128	0.54	0.0223	4.45
0.00057	0.01402	0.00005	0.0722	0.00028	0.0270	0.14128	0.54	0.0223	4.45
0.00057	0.01402	0.00005	0.0722	0.00028	0.0270	0.14128	0.54	0.0223	4.45
0.00057	0.01657	0.00005	0.0662	0.00036	0.0346	0.16982	0.65	0.0248	4.96
0.00057	0.01657	0.00005	0.0662	0.00036	0.0346	0.16982	0.65	0.0248	4.96
0.00057	0.01657	0.00005	0.0662	0.00036	0.0346	0.16982	0.65	0.0248	4.96
0.00057	0.01657	0.00005	0.0662	0.00036	0.0346	0.15366	0.59	0.0248	4.96
0.00057	0.01657	0.00005	0.0662	0.00036	0.0346	0.15366	0.59	0.0248	4.96
0.00057	0.01657	0.00005	0.0662	0.00036	0.0346	0.15366	0.59	0.0248	4.96

2. Perhitungan mencari nilai kedalaman (S) maksimum pada waktu tertentu (t)

No	Gap (cm)	H (m)	e/D	Um	ks	Zo	A	fw	Θ	T*	T (s)	T(m)
1	40	0.11	0	0.088	0.00142	0.000048	0.014	0.072	0.028	7.732	246.42	4.107
2	60	0.11	0	0.088	0.00142	0.000048	0.014	0.072	0.028	7.732	246.42	4.107
3	80	0.11	0	0.088	0.00142	0.000048	0.014	0.072	0.028	7.732	246.42	4.107
4	40	0.11	-0.1	0.088	0.00142	0.000048	0.014	0.072	0.028	7.732	246.42	4.107
5	60	0.11	-0.1	0.088	0.00142	0.000048	0.014	0.072	0.028	7.732	246.42	4.107
6	80	0.11	-0.1	0.088	0.00142	0.000048	0.014	0.072	0.028	7.732	246.42	4.107
7	40	0.13	0	0.104	0.00142	0.000048	0.017	0.066	0.036	5.121	163.20	2.720
8	60	0.13	0	0.104	0.00142	0.000048	0.017	0.066	0.036	5.121	163.20	2.720
9	80	0.13	0	0.104	0.00142	0.000048	0.017	0.066	0.036	5.121	163.20	2.720
10	40	0.13	-0.1	0.104	0.00142	0.000048	0.017	0.066	0.036	5.121	163.20	2.720
11	60	0.13	-0.1	0.104	0.00142	0.000048	0.017	0.066	0.036	5.121	163.20	2.720
12	80	0.13	-0.1	0.104	0.00142	0.000048	0.017	0.066	0.036	5.121	163.20	2.720

LAMPIRAN C

TABEL PERBANDINGAN SCOURING DENGAN PARAMETER TAK BERDIMENSI

1. *Keulegan Carpenter*

Perbandingan KC dengan S/D dan w/D								
No	Gap (cm)	e/D	H	KC	S _{exp} /D		W _{exp} /D	
					Down	Up	Down	Up
1	40 D (e/D = 0)	0	11	2.2	0.084	0.094	0.937	1.005
2	40 U (e/D = 0)	0	13	2.6	0.152	0.134	1.181	1.323
3	60 D (e/D = 0)	0	11	2.2	0.097	0.118	0.945	1.008
4	60 U (e/D = 0)	0	13	2.6	0.173	0.144	1.273	1.365
5	80 D (e/D = 0)	0	11	2.2	0.131	0.142	0.958	1.013
6	80 U (e/D = 0)	0	13	2.6	0.189	0.157	1.383	1.535
7	40 D (e/D = -0.1)	-0.1	11	2.2	0.060	0.076	0.882	1.073
8	40 U (e/D = -0.1)	-0.1	13	2.6	0.147	0.087	1.438	1.302
9	60 D (e/D = -0.1)	-0.1	11	2.2	0.068	0.084	1.047	1.152
10	60 U (e/D = -0.1)	-0.1	13	2.6	0.165	0.110	1.646	1.344
11	80 D (e/D = -0.1)	-0.1	11	2.2	0.071	0.100	1.168	1.163
12	80 U (e/D = -0.1)	-0.1	13	2.6	0.168	0.115	1.690	1.441

2. *Shield Parameter Number*

Perbandingan Θ dengan S/D dan w/D								
No	Gap (cm)	e/D	H	Θ	S _{exp} /D		W _{exp} /D	
					Down	Up	Down	Up
1	40 D (e/D = 0)	0	11	0.027	0.084	0.094	0.937	1.005
2	40 U (e/D = 0)	0	13	0.035	0.152	0.134	1.181	1.323
3	60 D (e/D = 0)	0	11	0.027	0.097	0.118	0.945	1.008
4	60 U (e/D = 0)	0	13	0.035	0.173	0.144	1.273	1.365
5	80 D (e/D = 0)	0	11	0.027	0.131	0.142	0.958	1.013
6	80 U (e/D = 0)	0	13	0.035	0.189	0.157	1.383	1.535
7	40 D (e/D = -0.1)	-0.1	11	0.027	0.060	0.076	0.882	1.073
8	40 U (e/D = -0.1)	-0.1	13	0.035	0.147	0.087	1.438	1.302
9	60 D (e/D = -0.1)	-0.1	11	0.027	0.068	0.084	1.047	1.152
10	60 U (e/D = -0.1)	-0.1	13	0.035	0.165	0.110	1.646	1.344
11	80 D (e/D = -0.1)	-0.1	11	0.027	0.071	0.100	1.168	1.163
12	80 U (e/D = -0.1)	-0.1	13	0.035	0.168	0.115	1.690	1.441

3. Burial Depth Diameter Ratio

Perbandingan e/D dengan S/D dan w/D								
No	Gap (cm)	e/D	H	KC	S_{exp}/D		W_{exp}/D	
					Down	Up	Down	Up
1	40 D (H = 11 cm)	0	11	2.201	0.084	0.094	0.937	1.005
2	40 U (H = 11 cm)	-0.1	11	2.201	0.060	0.076	0.882	1.073
3	60 D (H = 11 cm)	0	11	2.201	0.097	0.118	0.945	1.008
4	60 U (H = 11 cm)	-0.1	11	2.201	0.068	0.084	1.047	1.152
5	80 D (H = 11 cm)	0	11	2.201	0.131	0.142	0.958	1.013
6	80 U (H = 11 cm)	-0.1	11	2.201	0.071	0.100	1.168	1.163
7	40 D (H = 13 cm)	0	13	2.601	0.152	0.134	1.438	1.323
8	40 U (H = 13 cm)	-0.1	13	2.601	0.147	0.087	1.181	1.302
9	60 D (H = 13 cm)	0	13	2.601	0.173	0.144	1.646	1.365
10	60 U (H = 13 cm)	-0.1	13	2.601	0.165	0.110	1.273	1.344
11	80 D (H = 13 cm)	0	13	2.601	0.189	0.157	1.690	1.535
12	80 U (H = 13 cm)	-0.1	13	2.601	0.168	0.115	1.383	1.441

4. Wave Steepness

Perbandingan H/gT^2 dengan S/D dan w/D								
No	Gap (cm)	e/D	H	H/gT^2	S_{exp}/D		W_{exp}/D	
					Down	Up	Down	Up
1	40 D ($e/D = 0$)	0	0.11	0.011	0.084	0.094	0.937	1.005
2	40 U ($e/D = 0$)	0	0.13	0.013	0.152	0.134	1.181	1.323
3	60 D ($e/D = 0$)	0	0.11	0.011	0.097	0.118	0.945	1.008
4	60 U ($e/D = 0$)	0	0.13	0.013	0.173	0.144	1.273	1.365
5	80 D ($e/D = 0$)	0	0.11	0.011	0.131	0.142	0.958	1.013
6	80 U ($e/D = 0$)	0	0.13	0.013	0.189	0.157	1.383	1.535
7	40 D ($e/D = -0.1$)	-0.1	0.11	0.011	0.060	0.076	0.882	1.073
8	40 U ($e/D = -0.1$)	-0.1	0.13	0.013	0.147	0.087	1.438	1.302
9	60 D ($e/D = -0.1$)	-0.1	0.11	0.011	0.068	0.084	1.047	1.152
10	60 U ($e/D = -0.1$)	-0.1	0.13	0.013	0.165	0.110	1.646	1.344
11	80 D ($e/D = -0.1$)	-0.1	0.11	0.011	0.071	0.100	1.168	1.163
12	80 U ($e/D = -0.1$)	-0.1	0.13	0.013	0.168	0.115	1.690	1.441

5. Gap

Perbandingan Gap dengan S/D dan w/D												
No	Gap/D	H (cm)	e/D	KC	S _{exp} (cm)		S _{exp} /D		W _{exp} (cm)		W _{exp} /D	
					Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up
1	10.49	11	0.0	2.20	0.320	0.360	0.084	0.094	3.570	3.830	0.937	1.005
2	15.74	11	0.0	2.20	0.370	0.450	0.097	0.118	3.600	3.840	0.945	1.008
3	20.99	11	0.0	2.20	0.500	0.540	0.131	0.142	3.650	3.860	0.958	1.013
4	10.49	11	-0.1	2.20	0.230	0.290	0.060	0.076	3.360	4.090	0.882	1.073
5	15.74	11	-0.1	2.20	0.260	0.320	0.068	0.084	3.990	4.390	1.047	1.152
6	20.99	11	-0.1	2.20	0.270	0.380	0.071	0.100	4.450	4.430	1.168	1.163
7	10.49	13	0.0	2.60	0.580	0.510	0.152	0.134	4.500	5.040	1.181	1.323
8	15.74	13	0.0	2.60	0.660	0.550	0.173	0.144	4.850	5.200	1.273	1.365
9	20.99	13	0.0	2.60	0.720	0.600	0.189	0.157	5.270	5.850	1.383	1.535
10	10.49	13	-0.1	2.60	0.560	0.330	0.147	0.087	5.480	4.960	1.438	1.302
11	15.74	13	-0.1	2.60	0.630	0.420	0.165	0.110	6.270	5.120	1.646	1.344
12	20.99	13	-0.1	2.60	0.640	0.440	0.168	0.115	6.440	5.490	1.690	1.441

BIODATA PENULIS



Dwi Fakhri Chusaini adalah nama yang diberikan oleh ibu saya. Saya dilahirkan di Gresik, pada tanggal 01 Januari 1996, yang merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Setelah lahir, penulis telah menyelesaikan pendidikan formal mulai dari TK Aisyiyah Bustanul Atfhal, SDM 1 Melirang Bungah, SMPM 10 Melirang Bungah, SMAN 1 Manyar Gresik. Pada tahun 2014, penulis melanjutkan pendidikan jenjang perguruan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur tulis (SBMPTN) dan diterima pilihan kedua di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan. Selama empat tahun di Departemen Teknik Kelautan, penulis mengambil bidang Teknik dan Manajemen Pantai (*Coastal and Engineering Management*). Selama menjadi mahasiswa, penulis juga mengikuti kegiatan kemahasiswaan. Pada tahun pertama (2014-2015), penulis mengikuti Unit Kegiatan Mahasiswa Catur menjadi anggota aktif. Pada tahun kedua (2015-2016), penulis menjadi staff Departemen Sosial Masyarakat Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (HIMATEKLA) dan mengikuti kepanitiaan seperti Gerigi ITS 2015 dan Oceano 5. Pada tahun ketiga, penulis melakukan Kerja Praktek di Perusahaan Fabrikasi *Offshore* yaitu PT. Gearindo Prakarsa yang berlokasi di Bekasi. Selama Kerja Praktek penulis mempelajari proses fabrikasi *pipeline* dari awal sampai akhir. Apabila ingin menanyakan Tugas Akhir mengenai *scouring* pada dua pipa, dapat menghubungi penulis melalui email sebagai berikut: fakhri.chusaini@gmail.com