

MODUL PRINSIP PEMODELAN FISIK TEKNIK KELAUTAN

Jurusan Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan
Institut Teknologi Sumatera

Penyusun:
Tim Dosen Mata Kuliah
Prinsip Pemodelan Fisik
ITERA

2022

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas limpahan rahmat-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan Modul Pembelajaran Mata Kuliah Prinsip Pemodelan Fisik. Modul ini disusun berdasarkan kebutuhan pembelajaran dilingkup Program Studi Teknik Kelautan. Modul ini juga dilengkapi dengan latihan soal untuk menguji pemahaman peserta didik terkait dengan materi yang terdapat pada modul.

Kami menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan modul ini. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan kritik dan saran demi perbaikan dan kesempurnaan modul ini.

Kami mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu proses penyelesaian modul ini, terutama tim dosen pengampu mata kuliah prinsip pemodelan fisik, **Trika Agnestasia Tarigan, S.Kel., M.T., Suciana, S.T., M.T., Nanda Nurisman, S.Kel., M.T. dan Ayu Libiaty Ahmad, S.Kel., M.T.** Semoga modul ini dapat bermanfaat bagi kita semua, khususnya para peserta didik.

Lampung, 1 Desember 2022

Penyusun

DAFTAR ISI

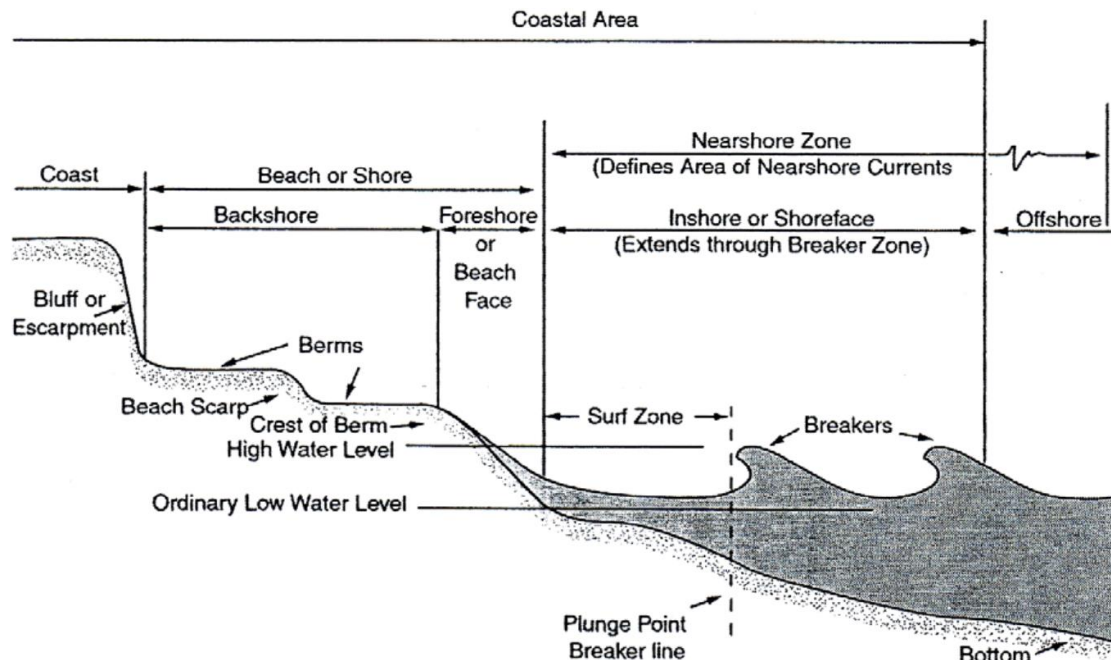
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
1 BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Definisi Pantai dan Tipe Pantai	1
1.2 Permasalahan Pantai dan Penanggulangannya	2
1.3 Bangunan Pantai	5
2 PENDEKATAN MODEL FISIK	14
2.1 Prinsip Pemodelan Fisik.....	14
2.2 Tujuan Pemodelan Fisik.....	15
2.3 Keuntungan Model Fisik	15
2.4 Kerugian Model Fisik	15
3 BAB III PRINSIP PEMODELAN FISIK	17
3.1 Analisa Dimensi	17
3.2 Metode Buckingham	19
3.2.1 Langkah Pemakaian metode Buckingham yaitu.....	19
3.3 Skala Model.....	23
3.3.1 Tipe kesetaraan	23
3.3.2 Gaya yang bekerja pada elemen fluida	24
3.3.3 Model Terdistorsi	26
4 BAB IV MODEL FISIK BANGUNAN PANTAI	28
4.1 Tujuan dan Persyaratan dari Model Bangunan Pantai	28
4.2 Struktur Rubble Mound	28
4.2.1 Model Laboratorium Rubble-Mound dan Efek Skala	31
4.2.2 Verifikasi Model Rubble-Mound	32
5 BAB V MODEL HIDRODINAMIKA	33

5.1	Tujuan Kegiatan.....	33
5.2	Alat dan Bahan	33
5.2.1	Saluran Gelombang (<i>Wave Flume</i>).....	33
5.2.2	Wave Generator	34
5.2.3	Probe	34
5.2.4	Penggaris/Meteran	35
5.2.5	Kamera.....	35
5.3	Prosedur Percobaan	35
5.3.1	Pengukuran Tinggi dan Periode Gelombang Secara Visual.....	36
5.3.2	Objek Pembahasan	36
6	BAB VI MODEL TRANSPOR SEDIMEN	38
6.1	Pengenalan <i>Moveable-Bed Models</i>	38
6.2	Permasalahan dari <i>Moveable-Bed Models</i>	38
6.3	Fungsi dari <i>Moveable-Bed Models</i>	38
6.4	Analisa Dimensi Transpor Sedimen	39
6.4.1	Parameter Hidrodinamika	39
6.4.2	Parameter Sedimen	40
6.5	Persyaratan Kesamaan Hidrodinamik	40
6.6	Syarat Keserupaan Transpor Sedimen	41
6.7	Syarat Penskalaan Transpor Sedimen.....	42
7	BAB VII KEBUTUHAN MODEL FISIK	44
7.1	Kapasitas Alat.....	44
7.2	Biaya.....	44

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Definisi Pantai dan Tipe Pantai

Dalam istilah kepantaian terdapat 2 istilah yaitu pesisir (*coast*) dan pantai (*shore*). Pesisir adalah daerah darat di tepi laut yang masih mendapat pengaruh laut seperti pasang surut, angin laut dan perembesan air laut. Pantai adalah daerah di tepi perairan yang dipengaruhi oleh air pasang tinggi dan air surut terendah. Secara teknis pantai dapat didefinisikan dengan sketsa pada gambar 1.



Gambar 1. Sketsa Definisi Pantai ((Triatmodjo, 1999)

Secara alami pantai berfungsi sebagai (Muliati, 2020) :

- 1) Pembatas antara darat dan laut;
- 2) Tempat hidup biota pantai;
- 3) Tempat sungai bermuara;

Selain fungsi diatas, pantai dapat bertambah fungsi sesuai dengan kebutuhan manusia, antara lain :

- 1) Tempat saluran bermuara (misal : saluran untuk tambak);
- 2) Tempat peralihan kegiatan hidup di darat dan di laut (pelabuhan, pelayaran);
- 3) Tempat hunian nelayan;
- 4) Tempat wisata;

- 5) Tempat usaha;
- 6) Tempat budidaya pantai (antara lain : tambak dan pertanian);
- 7) Sumber bahan bangunan (antara lain pasir dan batukarang).

Pantai memiliki beberapa tipe, yaitu :

1) Pantai berpasir

Pantai berpasir ini memiliki karakteristik yaitu :

- a. *Wave dominated coast*;
- b. Ukuran butir sedimen antara 0.063 sampai 2 mm;
- c. Deposisi sedimen yang terjadi cenderung dipengaruhi oleh arus yang diakibatkan gelombang dibandingkan arus yang diakibatkan oleh pasang surut atau angin.

2) Pantai berlumpur

Pantai berlumpur ini memiliki karakteristik, yaitu :

- a. Ukuran butir sedimen < 63 micron meter;
- b. Permukaan landai ($1/500$ sampai $1/2000$);
- c. Air yang kecoklatan;
- d. Gelombang pecah yang kecil;

3) Pantai berkarang/berbatu

Pantai berkarang/berbatu ini memiliki karakteristik, yaitu:

- a. Pantai dengan profil permukaan yang curam dan tinggi.
- b. Biasanya tidak memiliki pantai atau pantai sempit.
- c. Terdiri dari material *unconsolidated* dan *consolidated*.
- d. Tersusun dari berbagai jenis material: granit, batu kapur dan batu lumpur.

1.2 Permasalahan Pantai dan Penanggulangannya

Pantai akan terus menerus mengatur profilnya untuk mendapatkan kondisi yang efisien sebagai respon dalam proses disipasi energi gelombang yang datang dari laut yang bisa disebut respon pantai secara alami. Ada beberapa permasalahan pantai yang dapat terjadi baik akibat respon secara alami tersebut, maupun akibat kegiatan manusia yaitu :

1) Erosi

Erosi pantai adalah proses mundurnya pantai dari kedudukan semula yang antara lain disebabkan oleh tidak adanya keseimbangan antara pasok dan kapasitas angkutan sedimen. Perubahan pantai jenis ini biasa terjadi pada pantai landai (berpasir, atau berlumpur). Contoh erosi yang terjadi di pantai dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Erosi yang terjadi di Pantai Selatan *Long Island US*
(<https://toolkit.climate.gov/>)

Beberapa faktor penyebab yang sering mengakibatkan terjadinya erosi pantai antara lain:

- a. Pengaruh adanya bangunan pantai;
- b. Penambangan material pantai dan sungai;
- c. Pemindahan muara sungai;
- d. Pencemaran perairan pantai (dapat mematikan karang, hutan);
- e. Pengaruh pembuatan waduk di hulu (angkutan sedimen berkurang);
- f. Perusakan oleh bencana alam (misal : gelombang badai, tsunami).

2) Abrasi

Abrasi adalah proses erosi yang diikuti longsoran (runtuhan) pada material yang massif (batu) seperti tebing pantai. Abrasi antara lain disebabkan oleh daya tahan material menurun karena cuaca (pelapukan) dan selanjutnya daya tahan tersebut dilampaui oleh kekuatan hidraulik (arus dan gelombang). Contoh abrasi yang terjadi di pantai dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Abrasi di Pantai Tugu Merpati Padang

(<https://sda.pu.go.id/>)

3) Sedimentasi

Sedimentasi adalah proses pengendapan material yang terbawa oleh air, angin, maupun gletser. Sedimentasi dapat terjadi di muara sungai dan di pelabuhan. Sedimentasi di muara sungai terdiri atas proses penutupan dan proses pendangkalan muara. Contoh sedimentasi yang terjadi di pantai dapat dilihat pada gambar 4. Penutupan sungai terjadi tepat di mulut sungai pada pantai yang berpasir atau berlumpur, yaitu dengan terjadinya formasi ambang di muara. Proses ini biasanya disebabkan karena debit sungai kecil, terutama di musim kemarau, sehingga aliran air tidak mampu membilas sedimen. Pendangkalan muara sungai dapat terjadi mulai dari muara ke udik sampai pada suatu lokasi di sungai dimana pengaruh intrusi air laut (pengaruh pasang surut dan pencampuran air garam) masih ada.



Gambar 4. Sedimentasi Pantai

Erosi ini menjadi permasalahan yang cukup serius yang terjadi di pantai. Langkah pertama yang dapat dilakukan dalam penanganan erosi adalah mencari penyebabnya. Selanjutnya dapat ditentukan cara penanggulangannya. Penanggulangan yang cukup efektif sampai saat ini adalah membangun bangunan pelindung pantai atau menambah suplai sedimen (*beach nourishment*). Bangunan pantai dapat digunakan sebagai pelindung pantai terhadap kerusakan akibat arus dan gelombang. Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk melindungi pantai, yaitu :

1. Memperkuat/melindungi pantai agar mampu menahan serangan gelombang.
2. Mengubah lajut transport sedimen sepanjang pantai.
3. Mengurangi energi gelombang yang sampai ke pantai.
4. Reklamasi dengan menambah suplai sedimen ke pantai.

1.3 Bangunan Pantai

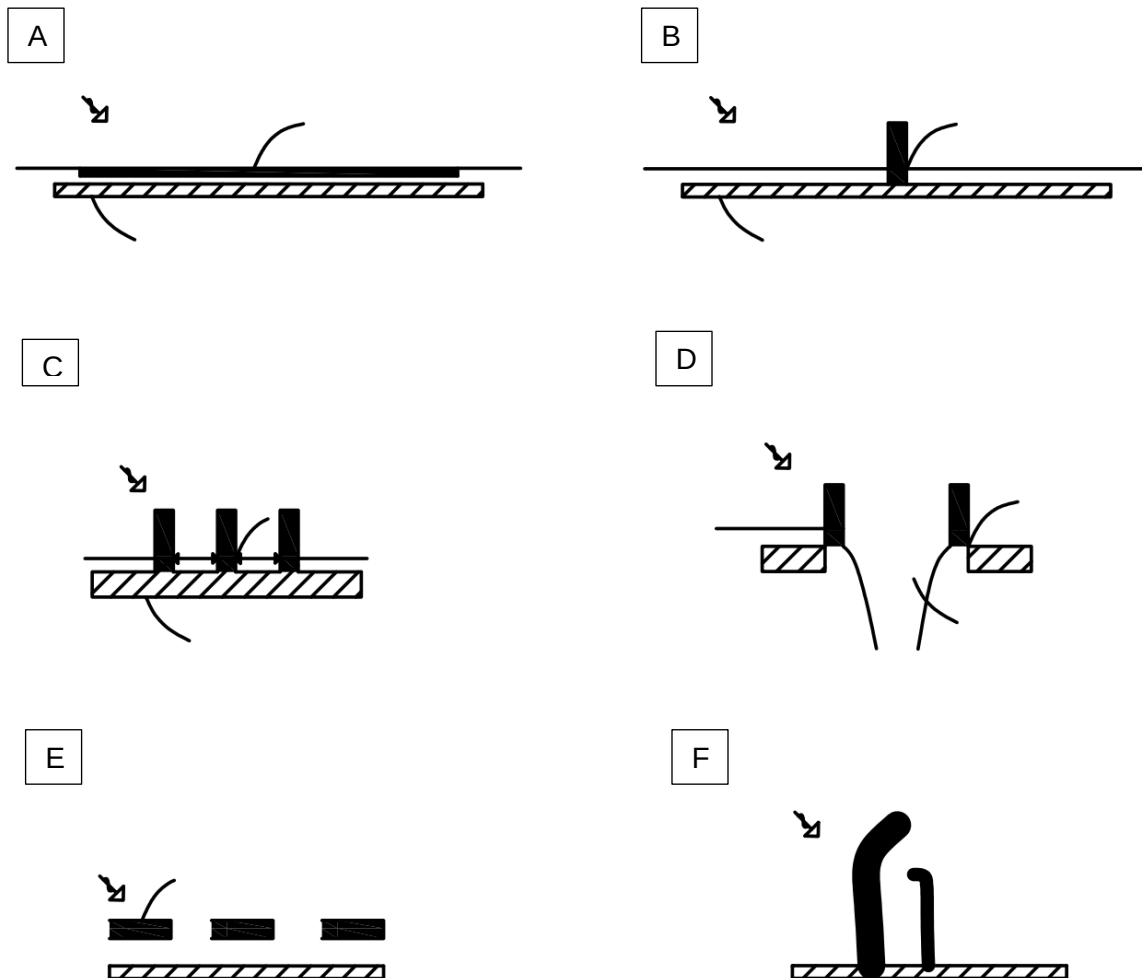
Bangunan pantai yang dibangun dapat digunakan untuk melindungi pantai terhadap kerusakan karena serangan gelombang dan arus maupun untuk kepentingan lainnya seperti fasilitas untuk menarik wisatawan khususnya untuk daerah pantai wisata. Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk melindungi pantai, yaitu :

- a) Memperkuat / melindungi muka pantai agar mampu menahan serangan gelombang,
- b) Mengubah laju transportasi sedimen pantai,
- c) Mengurangi energi gelombang yang sampai ke pantai,

- d) Beach nourishment dengan menambah suplai sedimen ke pantai,
- e) Melakukan penghijauan (reboisasi) daerah pantai.

Berdasarkan fungsinya bangunan pantai secara umum dapat diklasifikasikan dalam tiga kelompok (gambar 5) yaitu :

- a) Konstruksi yang dibangun di pantai dan sejajar dengan garis pantai,
- b) Konstruksi yang dibangun kira kira tegak lurus pantai dan berhubungan dengan pantai,
- c) Konstruksi yang dibangun dilepas pantai dan kira kira sejajar dengan garis pantai.



Gambar 5. Tipe Bangunan pengaman Pantai

Keterangan :

- A. Dinding pantai/revetment
- B. Groyne
- C. Seri groyne
- D. Jetty

E. Pemecah gelombang lepas pantai

F. Pemecah gelombang sambung pantai

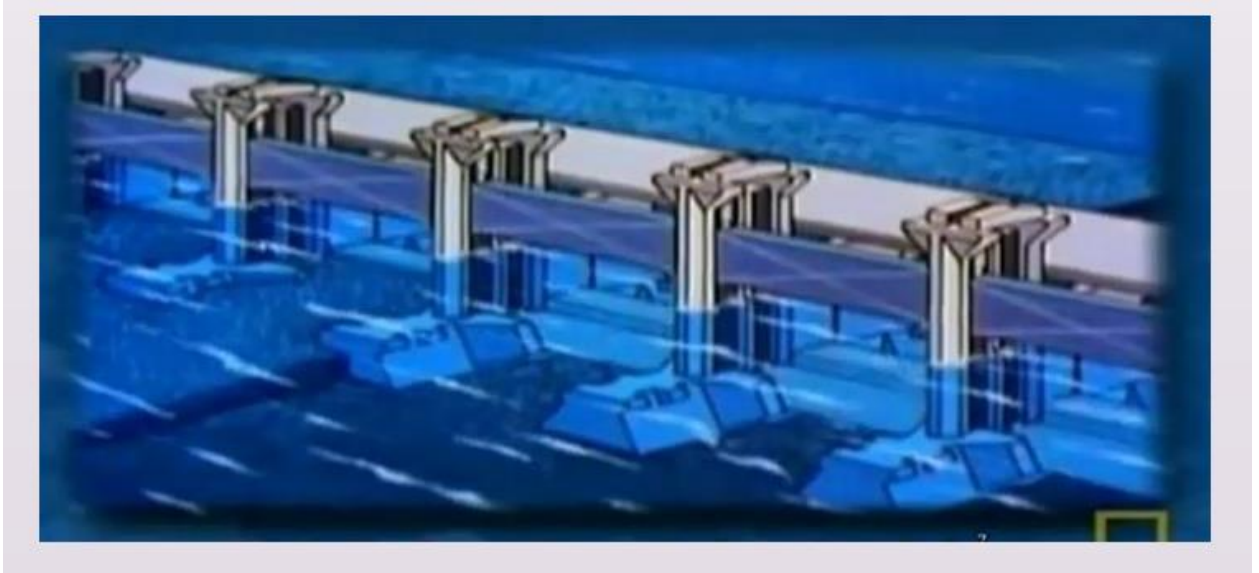
Dalam pemilihan sistem perlindungan pantai pada lokasi pantai tertentu agar bangunan dapat berfungsi secara optimal, maka perlu mempertimbangkan hal-hal berikut (Darajat, 2000) :

- a) Penyebab kerusakan pantai
- b) Tujuan yang ingin dicapai
- c) Efektifitas bangunan
- d) Bahan-bahan bangunan yang tersedia di sekitar lokasi studi
- e) Karakter gelombang (tinggi gelombang, periode dan arah datangnya)
- f) Kelestarian lingkungan
- g) Aktivitas masyarakat di sekitar kawasan
- h) Estetika pantai

Bangunan pantai digunakan untuk melindungi pantai terhadap kerusakan karena serangan gelombang dan arus. Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk melindungi pantai yaitu memperkuat pantai atau melindungi pantai agar mampu menahan kerusakan dengan membangun beberapa struktur bangunan pantai antara lain ;

- a) Tanggul laut (*Sea Dike*)

Tanggul laut atau sebutan lainnya *levee* atau *sea dike*, *embankment*, yaitu semacam tembok miring baik buatan maupun alami, dipergunakan untuk mengatur muka air. Menurut Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 07/SE/M/2010 tentang Pemberlakuan Pedoman Pelaksanaan Konstruksi Bangunan Pengaman Pantai dijelaskan bahwa *Sea Dike* adalah struktur pengaman pantai yang dibangun sejajar pantai dengan tujuan untuk melindungi dataran pantai rendah dari genangan yang disebabkan oleh air pasang, gelombang dan badai. Contoh bangunan *Sea dike* dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Tanggul Laut

Tujuan dari pembangunan tanggul laut antara lain untuk melindungi daratan pantai rendah

terhadap genangan air pasang, gelombang dan badai. Sedangkan fungsi tanggul laut lainnya, adalah :

1. Penahan air laut saat gelombang air pasang / air rob.
2. Pengendalian penurunan muka tanah.
3. Kerugian ekonomi akibat banjir.
4. Batas jelas dikawasan pesisir.

b) Tembok laut (*Sea Wall*)

Menurut Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 07/SE/M/2010 tentang Pemberlakuan Pedoman Pelaksanaan Konstruksi Bangunan Pengaman Pantai dijelaskan bahwa *Sea Wall* adalah struktur pengaman pantai yang dibangun dalam arah sejajar pantai dengan tujuan untuk melindungi pantai terhadap hempasan gelombang dan mengurangi limpasan genangan areal pantai yang berada di belakangnya. Tujuan tembok laut adalah guna mencegah/mengurangi limpasan dan genangan areal pantai yang berada di belakangnya. Sedangkan fungsi dari tembok laut adalah sebagai perkuatan pada bagian profil pantai. Contoh bangunan tembok laut dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Tembok Laut (*Seawall*)

c) Perkuatan lereng (*Revetment*)

Pengertian Perkuatan lereng (*revetment*) adalah bangunan yang ditempatkan pada permukaan suatu lereng guna melindungi suatu tebing alur sungai (umumnya muara sungai) atau permukaan lereng tanggul dan secara keseluruhan berperan meningkatkan stabilitas alur sungai atau tubuh tanggul yang dilindunginya. Tujuan dari perkuatan lereng adalah untuk melindungi daratan tepat di belakang bangunan. Dimana bangunan yang menghadap arah datangnya gelombang dapat berupa sisi vertical atau miring. Namun dinding pantai biasanya berbentuk dinding vertikal sedangkan *revetment* mempunyai sisi miring. Perkuatan lereng merupakan bangunan yang ditempatkan pada suatu lereng yang berfungsi melindungi suatu tebing alur pantai atau permukaan lereng, yang secara keseluruhan memiliki peran guna meningkatkan stabilitas alur pantai atau bahu tanggul yang dilindungi. Contoh *revetment* dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Penguatan Lereng (*Revetment*)

d) Pemecah gelombang (*Break Water*)

Pengertian *Breakwater* atau dalam hal ini pemecah gelombang lepas pantai adalah bangunan yang dibuat sejajar pantai dan berada pada jarak tertentu dari garis pantai. Menurut Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 07/SE/M/2010 tentang Pemberlakuan Pedoman Pelaksanaan Konstruksi Bangunan Pengaman Pantai dijelaskan bahwa Break Water adalah konstruksi pengaman pantai yang posisinya sejajar atau kira-kira sejajar garis pantai dengan tujuan untuk meredam gelombang datang. Contoh pemecah gelombang dapat dilihat pada gambar 9. Tujuan dari bangunan pemecah gelombang adalah untuk mengurangi energi (gaya-gaya) gelombang di belakang struktur, disamping untuk melindungi kolom pelabuhan terhadap gangguan gelombang. Disisi lain juga dapat bertujuan untuk mencegah erosi pantai. Fungsi Pemecah Gelombang adalah sebagai berikut :

1. Berfungsi sebagai pelindungi kolam perairan pelabuhan yang terletak dibelakangnya dari serangan gelombang.
2. Gelombang yang menjalar mengenai suatu bangunan peredam gelombang sebagian energinya akan dipantulkan (Refleksi).
3. Pembagian besarnya energi gelombang yang dipantulkan, dihancurkan dan diteruskan tergantung karakteristik gelombang datang (periode, tinggi, kedalaman air).
4. Berkurangnya energi gelombang di daerah terlindung akan mengurangi pengiriman sedimen di daerah tersebut.



Gambar 9. Pemecah Gelombang (*Breakwater*)

e) Krib (*Groin*)

Pengertian Krib atau Groin adalah struktur pengaman pantai yang dibangun menjorok relatif tegak lurus terhadap arah pantai. Menurut Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 07/SE/M/2010 tentang Pemberlakuan Pedoman Pelaksanaan Konstruksi Bangunan Pengaman Pantai dijelaskan bahwa Groin adalah bangunan yang dibuat tegak lurus atau kira-kira tegak lurus pantai, berfungsi mengendalikan erosi yang disebabkan oleh terganggunya keseimbangan angkutan pasir sejajar pantai (*longshore sand drift*). Contoh bangunan groin dapat dilihat pada gambar 10. Tujuan Bangunan Krib, adalah :

1. Mengatur aliran laut sedemikian rupa sehingga pada waktu banjir air dapat mengalir dengan cepat dan aman.
2. Mengatur kecepatan aliran laut yang memungkinkan adanya pengendapan dan pengangkutan sedimen dengan baik.
3. Mengarahkan aliran ke tengah alur laut agar tebing laut tidak terkikis.
4. Mengarahkan aliran laut sehingga dapat dipergunakan untuk pelayaran.

Fungsi Bangunan Krib, adalah :

1. Mengatur arah arus laut.
2. Memperbesar jari-jari belokan alur laut yang terlalu tajam supaya *alignment* laut menjadi lebih baik.
3. Mengurangi kecepatan arus laut sepanjang tebing laut.
4. Mengendalikan erosi tebing laut dengan mengurangi kecepatan aliran yang menyerang tebing laut.
5. Mempercepat sedimentasi.
6. Menutup cabang alur laut (pada *braided river*) supaya arus laut menuju ke alur yang diinginkan.
7. Menjamin keamanan tanggul atau tebing terhadap gerusan.
8. Mengkonsentrasikan aliran.
9. Memperdalam alur laut.
10. Mengarahkan aliran pada kondisi debit kecil.
11. Melindungi bangunan-bangunan laut lainnya.



Gambar 10. Krib (Groyne)

(www.theconstructor.org)

f) Jeti (*Jetty*)

Jeti adalah bangunan tegak lurus pantai yang diletakan di kedua sisi muara sungai yang berfungsi untuk mengurangi pendangkalan alur oleh sedimen pantai. Menurut Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 07/SE/M/2010 tentang Pemberlakuan Pedoman Pelaksanaan Konstruksi Bangunan Pengaman Pantai dijelaskan bahwa Jeti adalah bangunan menjorok ke laut yang berfungsi sebagai pengendalian penutupan muara sungai atau saluran oleh sedimen. Contoh bangunan Jeti dapat dilihat pada gambar 11. Fungsi bangunan jeti adalah :

1. Sebagai sandaran/pelabuhan kapal tongkang dan kapal kapal kecil lain nya yang akan melakukan transaksi naik atau turun barang baik melakukan ekspor dan impor.
2. Untuk mengurangi pendangkalan alur oleh sedimen pantai; Untuk melindungi alur pelayaran.
3. Untuk mencegah pendangkalan dimuara dalam kaitannya dengan pengendalian banjir.



Gambar 11. Jeti (*Jetty*)

PENDEKATAN MODEL FISIKA

Untuk dapat memecahkan permasalahan teknik para insinyur teknik bergantung pada tiga teknik yang berbeda namun saling terkait satu dengan yang lainnya, teknik-teknik ini adalah:

- a) Observasi dan pengukuran lapangan;
- b) Observasi dan pengujian laboratorium;
- c) Kalkulasi matematis.

2.1 Prinsip Pemodelan Fisik

Studi laboratorium pada umumnya dinamakan model fisik karena menggunakan reproduksi miniatur dari sebuah sistem fisik. Pemodelan Fisik tidak diperlukan selama pemodelan numerik dapat menggambarkan fenomena fisik yang sebenarnya. Belum semua fenomena fisik dapat di-matematika-kan sampai saat ini. Jadi Pemodelan Fisik dapat dilakukan apabila:

- a. Fenomena yang akan dilihat adalah fenomena kestabilan dari bangunan pantai.
- b. Data kalibrasi lapangan untuk pemodelan matematika tidak tersedia.
- c. Area yang dimodelkan tidak terlalu luas dimana maksimum skala pemodelan adalah maksimum 1:40. Apabila pemodelan dengan skala lebih kecil dari 1:40 semisal 1:50, maka terdapat kondisi dimana efek tegangan permukaan air dapat berakibat besar terhadap proses pemodelan di laboratorium.
- d. tidak ada model matematika untuk memodelkan suatu permasalahan.

Uji Fisik dilakukan pada saluran gelombang 2-D bila didapatkan:

- a. Pemodelan dilakukan untuk mengamati kestabilan suatu bangunan pantai.
- b. Pemodelan dilakukan untuk pengamatan detail dengan skala besar yakni lebih besar dari 1:10, sehingga efek skala bisa diminimalisir.

Prinsip Pemodelan Fisik adalah:

- a. Menentukan variabel yang berpengaruh dalam suatu fenomena di lapangan seperti tinggi gelombang, kemiringan struktur dll.
- b. Melakukan penyederhanaan variabel pada point (1) di atas untuk memudahkan identifikasi pemodelan yang diperlukan. Proses penyederhanaan variabel adalah dengan cara analisa dimensi.

- c. Setelah analisa dimensi dilakukan maka diidentifikasi variabel apa saja yang akan digunakan dan diubah-ubah nilainya, hal ini juga mengingat keterbatasan biaya dan kemampuan laboratorium.
- d. Melakukan pen-skala-an dari prototipe menjadi model yakni meminiaturkan prototipe menjadi lebih kecil untuk diletakkan dilaboratorium, untuk itu digunakan prinsip bahwa parameter bilangan Froude antara prototipe dan model harus sama.

2.2 Tujuan Pemodelan Fisik

Svendsen (1985) membuat tiga tujuan yang dapat dikejar menggunakan model fisik (atau eksperimen laboratorium):

- a. Mencari pendekatan kualitatif ke dalam fenomena yang belum terdefinisikan atau dipahami (seperti formasi turbulensi ketika gelombang pecah, formasi dari lubang scour/gerusan pada struktur pantai).
- b. Mendapatkan pengukuran untuk memverifikasi sebuah hasil teoritis (seperti gelombang nonlinear pada arus searah atau gelombang nonlinear yang saling berinteraksi).
- c. Mendapatkan pengukuran untuk fenomena yang begitu rumitnya hingga tidak dapat idekati secara teoritis (seperti stabilitas breakwater *rubble-mound* atau suspensi sedimen pada dasar laut ripple (*ripple bed*)).

2.3 Keuntungan Model Fisik

Model-model fisik dibangun dan dioperasikan dengan skala yang dikurangi, menawarkan sebuah pilihan dalam hal memeriksa fenomena pantai yang berada jauh diluar kemampuan analisa kita. Dalrymple (1985) menyatakan dua keuntungan yang dapat diperoleh dengan menggunakan model fisik untuk mereplikasi proses pantai (nearshore):

- a. Ukuran model yang kecil mengijinkan pengumpulan data yang lebih mudah sepanjang peraturan pada biaya yang dikurangi, dimana pengumpulan data lapangan lebih mahal dan sulit, dan simulasi pengukuran lapangan sangat sulit dicapai.
- b. Eksperimen dapat kita kendalikan sesuai kemampuan laboratorium.
- c. Dapat melihat umpan balik secara langsung.

2.4 Kerugian Model Fisik

Penggunaan model fisik atau eksperimen laboratorium untuk mendapatkan fenomena yang diinginkan khususnya model hidraulik juga memiliki beberapa kerugian antara lain:

- a. Efek skala yang umum terjadi pada model pantai adalah gaya viskos/kekentalan yang relatif lebih besar pada model berskala dibandingkan pada kondisi prototipenya. Semakin kecil skala (diatas 1:40) maka efek viskositas ataupun efek tegangan permukaan air akan menjadi besar terhadap keseluruhan eksperimen.
- b. Efek laboratorium dapat mempengaruhi proses yang disimulasikan pada tingkatan dimana pendekatan yang layak dari prototipe tidak dapat dipenuhi. Efek laboratorium seperti ini muncul dari ketidakmampuan untuk menciptakan kondisi gaya yang realistis dan pengaruh batasan model ketika disimulasikan. Sebuah efek laboratorium yang umum muncul ketika gelombang acak dibangkitkan didalam model untuk memperkirakan arah gelombang yang terjadi pada kondisi yang sebenarnya di alam.
- c. Beberapa gaya pembangkit dan kondisi batas yang ada di alam tidak dapat disimulasikan dalam pendekatan model fisik sehingga akan mempengaruhi hasil model yang akan dihasilkan. Sebagai contoh, tegangan geser angin yang bekerja pada permukaan bebas dapat membangkitkan sirkulasi arus dekat pantai yang signifikan di alam, yang tentunya tidak ditemukan pada model, yang hanya melibatkan pembangkitan gelombang mekanik.
- d. Pemodelan fisik membutuhkan biaya besar (mahal) untuk pendekatan simulasi dibandingkan dengan pendekatan model numerik.

BAB III PRINSIP PEMODELAN FISIKA

3.1 Analisa Dimensi

Konsep dasar analisa dimensi adalah menyederhanakan jumlah variabel terpisah yang tercakup dalam suatu sistem fisik tertentu menjadi grup variabel tak berdimensi dengan jumlah yang lebih kecil. Susunan grup variabel dipilih sedemikian rupa sehingga masing-masing grup menggambarkan karakteristik fisik yang signifikan. Dalam Sistem International (SI), parameter fisik kelautan dapat dinyatakan dalam tiga dimensi dasar yaitu massa, panjang dan waktu.

Variabel dalam analisa dimensi dapat dibedakan menjadi Geometrik dengan dimensi L, Kinematik dengan dimensi L, T, Dinamik dengan dimensi M, L, T dan Variabel Tak Berdimensi.

a. Variabel Geometrik

Variabel panjang mempunyai dimensi L dengan satuan SI-nya meter, Variabel luas mempunyai dimensi L^2 dengan satuan SI-nya m^2 , Variabel Volume mempunyai dimensi L^3 dengan satuan SI-nya m^3 . Ketiga variable tersebut adalah variable geometric karena dimensinya adalah L.

b. Variabel Kinematik

Kecepatan mempunyai dimensi L/T dengan satuan SI-nya m/s

c. Variabel Dinamis

Kerapatan Air (Densitas Air) mempunyai dimensi ML^{-3} dengan satuan SI-nya kg/m^3

d. Variabel Tak Berdimensi

Variabel tidak berdimensi terdapat dalam bilangan froude, bilangan reynolds, bilangan weber dan lain lain.

Variable, symbol, dimensi dan satuan SI yang digunakan dalam analisa dimensi dirangkum dalam table berikut:

Tabel 3.1 Variable, symbol, dimensi dan satuan SI yang digunakan dalam analisa dimensi

Variabel	Simbol	Dimensi	Satuan SI
Geometrik (L)			
Panjang	L, x, y	L	m
Luas	A	L^2	m^2
Volume	V	L^3	m^3
Kinematik (L, T)			
Kecepatan	v, u	L/T	m/detik
Percepatan	a	L/T^2	$m/detik^2$
Debit Satuan	q atau Q/L	L^2/T	$m^2/detik$
Debit	Q atau v/A	L^3/T	$m^3/detik$
Kekentalan Kinematik	ν atau μ/ρ	L^2/T	$m^2/detik$
Dinamik (M, L, T)			
Massa	m atau F/a	M	kg
Gaya	$F=m \cdot a$ atau $m \cdot g$	ML/T^2	$kg \cdot m/detik^2$
Tekanan	$P = F/A$	$M/(LT^2)$	N/m^2
Kerapatan Massa	ρ	M/L^3	Kg/m^3

3.2 Metode Buckingham

Metode Buckingham π perlu diperhatikan bahwa π dalam analisa dimensi bukan konstanta yang bernilai 3.14. Metode ini menyatakan bahwa Kuantitas Fisik sejumlah n dengan jumlah dimensi dasar r . Secara umum dapat disusun menjadi $(n-r)$, Grup bilangan tak berdimensi yang didefinisikan sebagai π

Aturan dalam pemakaian metode Buckingham yaitu

- a) Variabel yang terpilih harus variabel fisik yang terpenting
- b) Variabel yang terpilih harus meliputi semua dimensi
- c) Variabel *independent* yang tidak berulang sedapat mungkin harus dimasukkan
- d) Variabel aliran dasar yang relevan harus dimasukkan, yaitu: variabel geometris (L), variabel kinematis (L,T), variabel dinamik (L,T,M).

3.2.1 Langkah Pemakaian metode Buckingham yaitu

1. Reduksi Data

Buat daftar semua variabel fisik yang terkait dalam suatu sistem berdasarkan tipenya: variabel geometris, kinematis, dan dinamis. Pilih semua dimensi yang dipakai, FLT atau MLT. Pilih kelompok dasar dari karakteristik variabel aliran sebagai berikut: BG, variabel geometris; BK, variabel kinematis; BD, variabel dinamik. Selebihnya dari ke-3 dimensi tersebut dipakai lambang "A" dimulai dari A1.

2. Turunkan Ratio π

Jumlah Ratio π sama dengan A

$$\pi_1 = (B_G)^{x_1}(B_k)^{y_1}(B_D)^{z_1}A_1$$

$$\pi_2 = (B_G)^{x_2}(B_k)^{y_2}(B_D)^{z_2}A_2$$

$$\pi_n = (B_G)^{x_n}(B_k)^{y_n}(B_D)^{z_n}A_n$$

Eksponen pada persamaan bisa disetarakan dengan menulis persamaan dimensi dan memberikan harga eksponen x , y , z untuk tiap-tiap ratio π

3. Ratio π dikonversikan ke dalam bentuk praktis

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0$$

$$\pi_2 = f(\pi_1, \pi_3, \dots, \pi_n)$$

Contoh soal :

Stability of rubble mound armor stone. Parameter penting dalam penentuan kestabilan struktur *rubble mound* terhadap proses hidrodinamika gelombang yaitu

W	:	Berat rata-rata batuan armor
ρ_s	:	Massa jenis air
ρ_w	:	Massa jenis armor
θ	:	Kemiringan struktur
H	:	Tinggi gelombang
T	:	Periode gelombang
g	:	Kecepatan gravitasi

Perlu diperhatikan bahwa kemiringan struktur sudah *non dimensional*. Tentukan persamaan akhir stabilitas *rubble mound breakwater* yang dapat dibentuk, misalnya $\pi_2 = f(\pi_1, \pi_3, \dots, \pi_n)$

Pembahasan:

Langkah-langkah penyelesaian untuk mendapatkan persamaan akhir non dimensional sebagai berikut:

1. Reduksi Data

Variabel	Satuan SI	Dimensi
$W = m \cdot a$	$kg \cdot \frac{m}{s^2}$	MLT^2

Variabel	Satuan SI	Dimensi
ρ_s	$kg \cdot \frac{m}{s^3}$	ML^{-3}
ρ_w	$kg \cdot \frac{m}{s^3}$	ML^{-3}
θ	$\frac{m}{m}$	-
H	m	L
T	s	T
g	$\frac{M}{M^2}$	LT^{-2}

- Membuat matriks dimensi dengan menggunakan sistem MLT

	W	ρ_s	ρ_w	H	T	g
M	1	1	1	0	0	0
L	1	-3	-3	1	0	1
T	-2	0	0	0	1	-2

- Pilih karakter variable utama/dimensi dasar

1) $B_g(L) = H$

2) $B_k(M,L) = g$

3) $B_D(M,L,T) = W$

Variabel sisa:

1) $A_1 = \rho_s$

2) $A_2 = \rho_w$

3) $A_3 = T$

- Menghitung produk non dimensional

- Kuantitas fisik = 6 (n)
- dimensi dasar = 3 (r)

sehingga $n-r = 6-3 = 3$ (π_1, π_2, π_3)

2. Turunkan rasio π

$$\pi_1 = (B_G)^{x_1} (B_k)^{y_1} (B_D)^{z_1} A_1$$

$$\pi_2 = (B_G)^{x_2} (B_k)^{y_2} (B_D)^{z_2} A_2$$

$$\pi_3 = (B_G)^{x_3} (B_k)^{y_3} (B_D)^{z_3} A_3$$

➤ Seimbangkan eksponen persamaan

$$\epsilon M = 0, \epsilon L = 0, \epsilon T = 0$$

$$a) \pi_1 = (H)^{x_1} (g)^{y_1} (W)^{z_1} \rho_s$$

$$M^0 L^0 T^0 = (L)^{x_1} (L T^{-2})^{y_1} (M L T^{-2})^{z_1} (M L^{-3})$$

$$= (L^{x_1}) (L^{y_1} T^{-2y_1}) (M^{z_1} T^{z_1} T^{-2z_1}) (M L^{-3})$$

$$M = z_1 + 1 = 0; z_1 = -1$$

$$L = x_1 + y_1 + z_1 - 3 = 0; x_1 + y_1 = 4; x_1 = 3 \text{ (Substitusi nilai } y_1)$$

$$T = -2y_1 - 2z_1 = 0; \text{ (substitusi nilai } z_1) y_1 = 1$$

$$\pi_1 = H^3 g^1 W^{-1} \rho_s$$

$$\pi_1 = \frac{\rho_s g H^3}{W} \text{ atau } \frac{W}{\rho_s g H^3}$$

$$b) \pi_2 = (H)^{x_2} (g)^{y_2} (W)^{z_2} \rho_w$$

$$\pi_2 = \frac{\rho_s g H^3}{W} \text{ atau } \frac{W}{\rho_s g H^3}$$

Karena $\pi_1 = \pi_2$, Maka cari non dimensional yang lain

Dengan cara : Perbandingan variable yang memiliki dimensi yang sama

$$\pi_2 = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{M L^{-3}}{M L^{-3}} = 1 \text{ (Non Dimensional)}$$

$$c) \pi_3 = (H)^{x_3} (g)^{y_3} (W)^{z_3} (T)$$

$$M^0 L^0 T^0 = (L^{x_3}) (L^{y_3} T^{-2y_3}) M^{z_3} T^{z_3} T^{-2z_3} (T)$$

$$M = z_3 = 0$$

$$L = x_3 + y_3 = 0; x_3 = -1/2$$

$$T = -2y_3 + 1 = 0; y = 1/2$$

$$\pi_3 = H^{-1/2} g^{1/2} W^0 T$$

$$\pi_3 = \frac{g^{-1/2} T}{H^{1/2}} = \sqrt{\frac{g}{H}} T = \frac{g T^2}{H} \text{ atau } \frac{H}{g T^2}$$

3. Konversi π dalam bentuk persamaan praktis/set

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3)$$

$$\frac{W}{\rho_s g H^3} = f\left(\frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{H}{g T^2}, 0\right)$$

3.3 Skala Model

Skala model dikembangkan berdasarkan kesetaraan antara dua fenomena yang berbeda ukurannya. Pembuatan skala model merupakan pekerjaan teknik dimana kompromi dibuat dengan hukum kesetaraan untuk menyusun cara praktis dalam menyelesaikan permasalahan teknis. Kondisi penskalaan model :

1. Skala model harus disimulasi secara akurat: model harus mereproduksi dengan tepat fenomena alam yang di studi.
2. Skala model harus konsisten: model harus memberikan hasil yang sama untuk kondisi yang sama.
3. Skala model harus sensitif: sensitifitas skala model harus disesuaikan dengan kebutuhan yang diinginkan dalam mereproduksi proses alam yang diamati.
4. Skala model harus ekonomis: model yang terbaik bukanlah model yang terbesar, tetapi skala model yang juga memperhitungkan ekonomi.

Pemodelan yang digunakan dalam bidang Teknik kelautan adalah model hidrolik dimana model bekerja pada proses dengan media air. Skala dasar untuk sembarang model hidrolik adalah skala geometris, yaitu nisbah antara dimensi panjang dalam model dan dimensi panjang dalam prototipe.

3.3.1 Tipe kesetaraan

A. Kesetaraan geometris

Kesetaraan Geometris antara model dan prototip tercapai jika semua dimensi (ukuran panjang) yang bersesuaian antara model dan prototip adalah sama. Dengan kata lain model harus mempunyai bentuk yang sama dengan prototip-nya. Ini merupakan prasyarat utama yang harus dipenuhi oleh skala model. Nisbah ini biasa disebut skala geometris.

Panjang :

$$\frac{L_p}{L_m} = L_r \quad (3.1)$$

Dimana,

L_p = panjang prototipe

L_m = panjang model

L_r = nisbah skala panjang

Luas :

$$\frac{A_p}{A_m} = A_r = L_r^2 \quad (3.2)$$

Dimana,

A_p = luas prototipe

A_m = luas model

A_r = nisbah skala luas

Volume :

$$V_r = L_r^3 \quad (3.3)$$

Dimana,

V_r = nisbah skala volume

B. Kesetaraan dinamis

Kesetaraan dinamis antara model dan prototip terpenuhi jika gaya-gaya yang bekerja pada titik-titik yang bersesuaian antara model dan prototip mempunyai rasio yang konstan. Rasio ini biasa disebut skala gaya.

C. Kesetaraan kinematis

Kesetaraan kinematis antara model dan prototip terpenuhi jika garis-garis alirannya serupa secara geometris dan semua besaran yang bergantung waktu mempunyai nisbah yang konstan. Nisbah ini bisa disebut skala waktu.

3.3.2 Gaya yang bekerja pada elemen fluida

A. Gaya gravitasi

Gaya gravitasi muncul disebagian besar sistem fluida yang diselidiki dengan model hidrolik. Aliran yang melalui atau melewati bangunan hidrolik dipengaruhi oleh gravitasi. Aliran dalam saluran atau sungai merupakan fenomena gravitasi. Gelombang, baik di pelabuhan maupun riak akibat gerakan kapal, didominasi oleh pengaruh gravitasi. Contoh lain fenomena gravitasi adalah outfall keluaran air pendingin dari stasiun pembangkit listrik.

Untuk kesetaraan dinamis, dimana gaya gravitasi memegang peranan penting, maka nisbah antara gaya inersia dan gaya gravitasi pada model dan pada prototip harus sama. Jika gaya gravitasi dominan dalam suatu system, maka skala model yang dipakai berdasarkan bilangan Froude. Bilangan Froude harus sama antara model dan prototipe.

$$(F_r)_r = (F_r)_p \quad (3.4)$$

$$\left[\frac{v}{\sqrt{gL}} \right]_m = \left[\frac{v}{\sqrt{gL}} \right]_p \quad (3.5)$$

Dimana m menunjukan model dan p menunjukan prototipe.

B. Gaya viskositas

Gaya viskositas menjadi penting pada peristiwa dimana aliran yang terjadi tidak turbulen sempurna atau pada aliran disekitar benda yang berada dalam fluida (*submerged body*). Dalam beberapa kasus, peristiwa ini dipengaruhi oleh kombinasi gaya viskositas dan gravitasi, misalnya aliran dalam pipa atau sekitar benda yang tercelup sebagian dalam air seperti kapal. Untuk kasus dimana Gaya Viskositas dominan, maka dipakai kesamaan Reynolds.

$$(R_e)_r = (R_e)_p \quad (3.5)$$

$$\left[\frac{vL}{\mu} \right]_m = \left[\frac{vL}{\mu} \right]_p \quad (3.6)$$

Tabel 1. Skala model berdasarkan hukum yang dipakai (Kodoatie, 2002)

Karakteristik	Simbol	Dimensi	Skala model dari hukum yang dipakai			
			Froude	Reynolds	Weber	Coucy
Geometris						
Panjang, lebar	L, B	m	L_r	L_r	L_r	L_r
Tinggi, kedalaman	H, d	m	L_r	L_r	L_r	L_r
Luas	A	m^2	L_r^2	L_r^2	L_r^2	L_r^2
Volume, isi	V	m^3	L_r^3	L_r^3	L_r^3	L_r^3
Kinematis						
Waktu	t	s	$L_r^{0.5}$	L_r^2	$L_r^{1.5}$	L_r
Frekuensi	f	s^{-1}	$L_r^{-0.5}$	L_r^{-2}	$L_r^{-1.5}$	L_r^{-1}
Kecepatan	v	m/s	$L_r^{0.5}$	L_r^{-1}	$L_r^{-0.5}$	L_r^0
Percepatan	a	m/s^2	L_r^0	L_r^{-3}	L_r^{-2}	L_r^{-1}
Gravitasi	g	m/s^2	L_r^0	L_r^{-3}	L_r^{-2}	L_r^{-1}
Debit	Q	m^3/s	$L_r^{2.5}$	L_r	$L_r^{1.5}$	L_r^2
Debit/satuan lebar	q	$m^3/s.m$	$L_r^{1.5}$	L_r^0	$L_r^{0.5}$	L_r
Dinamis						
Massa	m	kg	L_r^3	L_r^3	L_r^3	L_r^3
Impulse	Fi	kg.m/s	$L_r^{3.5}$	L_r^2	$L_r^{2.5}$	L_r^3
Viskositas dinamis	μ	kg.m/m	$L_r^{1.5}$	L_r^0	$L_r^{0.5}$	L_r
Rapat massa	ρ	kg/m^3	L_r^0	L_r^0	L_r^0	L_r^0
Gaya	F	N	L_r^3	L_r^0	L_r	L_r^2
Kerja	W	Nm	L_r^4	L_r	L_r^2	L_r^3
Momen	M	Nm	L_r^4	L_r	L_r^2	L_r^3
Energi	E	Nm	L_r^4	L_r	L_r^2	L_r^3
Tegangan permukaan	σ	N/m	L_r^2	L_r^{-1}	L_r^0	L_r^1
Tekanan	P	N/m^2	L_r	L_r^{-2}	L_r^{-1}	L_r^0
Berat spesifik	γ	N/m^3	L_r^0	L_r^{-3}	L_r^{-2}	L_r^{-1}

3.3.3 Model Terdistorsi

Dalam beberapa kasus diperlukan pembuatan model yang tidak setara benar dengan prorotip-nya seperti model dengan area yang luas yaitu sungai, pelabuhan, proses pantai, estuari dan lain sebagainya. Berikut alasan mengapa model terdistorsi diperlukan :

1. Mengurangi biaya.
2. Memperkecil ruang.
3. Mempercepat kecepatan aliran.
4. Memperpendek waktu pengetesan model.
5. Meningkatkan Bilangan Reynolds dalam model.
6. Memperbaiki secara relatif tingkat akurasi pengukuran.
7. Mengurangi kehilangan air dalam model.

Beberapa keterbatasan dalam membuat model terdistorsi :

1. Ketersediaan ruang dalam laboratorium membatasi ukuran maksimum model yang akan dibuat (*scale-limit space*).
2. Toleransi maksimum yang diperkenankan dalam membuat model juga membatasi batas maksimum skala model yang mungkin dibuat.
3. Untuk menghindari kekasaran model yang berlebihan, kekasaran model tidak boleh lebih dari sepuluh kali dari kekasaran prototip . Ketentuan ini juga berperan ikut menentukan skala model. .
4. Jika material granular tidak kohesif (*non-cohesive*) dipakai untuk model dasar tidak tetap (*movable bed*), ukuran partikel harus cukup besar untuk mencegah terjadinya transportasi partikel tersebut oleh aliran (*smoothness limit*).
5. Kapasitas debit maksimum pada laboratorium juga mungkin menjadi penentu skala model yang dibuat (*discharge limit*).

BAB IV MODEL FISIKA BANGUNAN PANTAI

4.1 Tujuan dan Persyaratan dari Model Bangunan Pantai

Ditahap desain awal, banyak struktur pantai dapat didesain menggunakan formula empiris dan nomogram berdasarkan uji model fisik skalakecil dari struktur pada umumnya. Desain ini sering dikategorikan cukup untuk mengestimasi biaya atau memilih tipe struktur yang tepat sesuai kebutuhan proyek.

Terdapat 5 (lima) tujuan yang dapat dicapai dalam hal membuat pemodelan stabilitas dari struktur *rubble-mound* (Markle, 1989):

- Memeriksa kesetabilan dari lapisan armor rubble-mound, yang melindungi sisi miring, bagian dasar atau puncak struktur ketika terkena gelombang pada ketinggian permukaan air yang berbeda. Dapat dilakukan dengan memeriksa desain yang spesifik dan/atau desain umum untuk armor.
- Menghitung gaya hidrodinamik yang terjadi pada struktur monolit akibat gaya gelombang.
- Mengoptimalkan tipe, ukuran dan bentuk geometri struktur untuk memenuhi spesifikasi dan anggaran keuangan.
- Mengestimasi karakteristik struktur seperti runup, rundown, overtopping, pantulan, transmisi, absorpsi, dan tekanan internal statis atau dinamis untuk tiap tipe dan bentuk geometri struktur yang berbeda dan/atau metode konstruksinya.

4.2 Struktur Rubble Mound

Permasalahan dalam kestabilan breakwater *rubble-mound* mencakup parameter yang cukup banyak antara lain:

h	:	kedalaman perairan
D	:	persentase kerusakan pada lapisan pelindung struktur breakwater
g	:	percepatan gravitasi
H	:	tinggi gelombang
l_a	:	karakteristik dimensi linier dari unit armor
V_w	:	kecepatan air di sekitar lapisan

α	:	sudut kemiringan
β	:	sudut datang gelombang
Δ	:	bentuk dari unit armor
θ	:	kemiringan dasar struktur
L	:	panjang gelombang
μ	:	viskositas dinamik air sekitar breakwater
ε_a	:	karakteristik dimensi linier dari kekasaran permukaan unit armor
ρ_a	:	massa jenis unit armor
ρ_w	:	massa jenis air disekitar armor

Menentukan rapat massa unit armor pada model, khususnya prototipe yang akan dibangun di laut menggunakan persamaan:

$$\left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right)_p = \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right)_m$$

Berat unit armor dapat dihitung dengan:

$$W_a = \gamma \cdot V$$

Dimana

W_a : berat unit armor

γ_a : berat jenis unit armor ($= \rho_a g$)

V : volume unit armor

Hubungan skala berat armor dapat dihitung dengan persamaan:

$$(N_{wa})_m = N_{\gamma a} N_l^3$$

Contoh Perhitungan dalam Penskalaan Berat Unit Armor

Sebuah *jetty* yang terletak pada air asin (*salt water*) akan direhabilitasi menggunakan 360 kN armor dolos yang terbuat dari beton dengan berat jenis

30kN/m³ (191 lbs/ft³). Model stabilitas struktur dengan skala 1:50 akan digunakan untuk melakukan uji model desain jetty tersebut. Model dolos dilapisi campuran special antara resin. Untuk menentukan proporsi yang benar dari kedua bahan tersebut, sangatlah penting untuk melakukan perhitungan berat jenis yang diperlukan dari material dolos pada model. Pengujian model dilakukan pada air tawar. Diasumsikan $\gamma_m = 9.79 \text{ kN/m}^3$ (62.3 lbs/ft³) untuk air tawar dan $\gamma_p = 10.05 \text{ kN/m}^3$ (64.0 lbs/ft³) untuk air asin.

Pada model stabilitas dengan skala Froude, model unit armor harus menyesuaikan dengan kriteria persamaan menentukan rapat massa unit armor pada model, karena protipe akan dibangun di laut. Persamaannya:

$$\left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right)_p = \left(\frac{\rho_a}{\rho_w}\right)_m$$

Dengan memperhatikan bahwa, $\gamma_a = \rho_a \cdot g$

Maka persamaan diatas ditulis menjadi :

$$\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w}\right)_p = \left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w}\right)_m$$

Sehingga berat jenis unit pada model dapat dihitung sebagai berikut:

$$(\gamma_a)_m = (\gamma_a)_p \frac{(\gamma_w)_m}{(\gamma_w)_p} = 29.22 \text{ kN/m}^3$$

Skala berat unit armor dolos dapat diperoleh dari

$$(N_{wa})_m = N_{\gamma a} N_l^3 = \frac{30}{29.22} (50^3) = 128337$$

Dan berat unit armor pada model menjadi:

$$(W_a)_m = \frac{(W_a)_p}{N_{wa}} = \frac{360N}{128337} = 2.8 \text{ N}$$

4.2.1 Model Laboratorium Rubble-Mound dan Efek Skala

1) Efek skala viskositas dalam model rubble-mound

- a) Gaya viskositas merupakan efek skala yang penting dalam hubungannya dengan model fisik dari struktur rubble-mound.
- b) Efek skala yang menjadi masalah pada lapisan kedua yaitu lapisan armor karena bilangan Reynolds dari karakteristik dimensi unit armor sehingga terjadi aliran turbulen.
- c) Pada lapisan *underlayers* model lab, skala geometric dari ukuran material dapat mengakibatkan efek skala viskositas karena lapisan ini dapat mengurangi permeabilitas dan membangkitkan tekanan downrush yang relatif tinggi.
- d) Metoda transmisi gelombang diperlukan untuk pertambahan ukuran dari material *underlayer*.

2) Transmisi Gelombang

- a) Apabila struktur rubble-mound dimodelkan dengan ukuran batu dan metrial core yang telah direduksi secara geometri dari skala prototipenya, maka akan terjadi transmisi gelombang melewati struktur yang lebih kecil.
- b) Kehilangan energi akibat gesekan akan terjadi lebih besar pada model ketika gelombang berjalan melewati struktur.

3) Efek skala pantulan dan transmisi pada rubble-mounds

- a) Transmisi dan pantulan gelombang merupakan komponen penting dalam studi lanoratorium.
- b) Simulasi yang tepat pada transmisi gelombang adalah syarat yang penting untuk struktur semipermeable (*breakwater* dan *jetty*)
- c) Model fisik skala geometri dari struktur rubble-mound berpori, pada umumnya memiliki energi gelombang yang lebih besar.

4) Efek densitas air pada struktur rubble-mound

- a) Umumnya uji model struktur rubble-mound dilakukan menggunakan air tawar daripada air asin.
- b) Tujuannya adalah untuk menghindari korosi dari pembangkit gelombang yang berharga mahal ataupun korosi pada metal lainnya.
- c) Jika prototipe secara kebetulan berada di lingkungan air asin, harus dibuat koreksi terhadap model unit armor menggunakan penskalaan Hudson.

5) Efek skala friksi pada model struktur rubble-mound

- a) Efek skala friksi mungkin terjadi pada model struktur pantai jika propagasi jarak gelombang sangat panjang.
- b) Efek skala friksi lainnya muncul akibat kontak friksi antara unit armor yang berdekatan.
- c) Pada prototipe rubble-mound, gaya kontak friksi antara unit armor biasanya diabaikan (kecuali strukturnya terbuat dari *artificial armor*).

6) Efek skala aerasi pada model struktur rubble-mound

- a) Aerasi bertambah seiring dengan kenaikan perioda gelombang untuk tinggi gelombang konstan.
- b) Gelombang pecah tipe plunging mengakibatkan derajat aerasi tinggi.
- c) Aerasi lebih sulit terjadi pada struktur dengan permeabilitas tinggi.

4.2.2 Verifikasi Model Rubble-Mound

Dua aspek penting dari **verifikasi model** adalah:

1. Untuk memastikan bahwa gelombang dan arus yang tercipta pada model fisik adalah tepat sesuai skala replica dari kondisi hidrodinamika prototipe yang diinginkan dan pendekatan batimetri yang sesuai.
2. Membantu memastikan bahwa model memproduksi reaksi yang tepat.

BAB V MODEL HIDRODINAMIKA

5.1 Tujuan Kegiatan

Pemodelan fisik merupakan satu dari tiga metode yang dikenal dalam bidang Teknik Kelautan dalam mempelajari fenomena alam (perairan laut) dan atau rekayasa pantai. Kegiatan ini memerlukan dana yang cukup besar guna membiaya pembuatan media dan prototipe dalam ukuran yang lebih kecil dibandingkan ukuran sesungguhnya di alam. Selain itu, waktu yang dibutuhkan dalam kegiatan eksperimen laboratorium lebih lama dibandingkan dengan kegiatan pemodelan numerik. Meski demikian, hasil yang diperoleh dari pekerjaan pemodelan fisik lebih bisa menggambarkan kondisi yang sesungguhnya di alam dibandingkan dengan pemodelan numerik. Hal ini dikarenakan ada banyak parameter dan fenomena di alam yang hanya bisa diakomodasi melalui kegiatan pemodelan fisik. Satu diantara beberapa topik kegiatan pemodelan fisik yang sangat penting adalah “Model Hidrodinamika”.

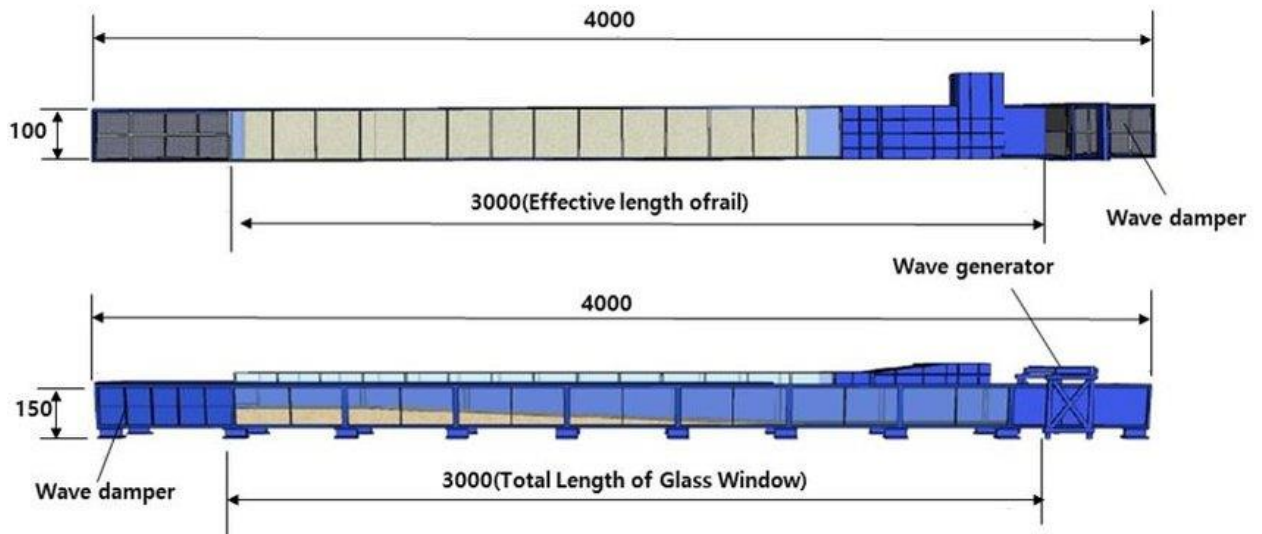
Praktikum Model Hidrodinamika bertujuan untuk memberikan pengalaman kepada mahasiswa tentang perambatan gelombang (dalam hal ini adalah teori gelombang linier). Adapun objek yang dikaji pada kegiatan ini adalah Tinggi Gelombang Datang (H_i), Periode Gelombang (T), Panjang Gelombang (L), Tinggi Gelombang Transformasi (H_t) dan Kedalaman Perairan (h). Melalui kegiatan secara langsung di laboratorium, mahasiswa dapat melihat secara langsung proses terjadinya pembentukan gelombang dan gelombang pecah. Sehingga pada kegiatan ini mahasiswa diharapkan mampu memahami transformasi gelombang akibat perubahan kedalaman perairan.

Guna tercapainya tujuan dari pembelajaran praktikum Model Hidrodinamika, maka mahasiswa dapat melakukan pekerjaan secara berkelompok. Masing – masing kelompok praktikum dapat minimal beranggotakan 4 orang yang bertanggung jawab pada masing – masing pos/titik pengamatan.

5.2 Alat dan Bahan

5.2.1 Saluran Gelombang (*Wave Flume*)

Saluran gelombang yang digunakan memiliki struktur baja dengan dinding kaca disepanjang saluran sehingga memungkinkan dilakukan pengamatan di sepanjang saluran. Ilustrasi saluran gelombang (*wave flume*) dapat dilihat pada gambar berikut ini



Gambar 12. Desain Saluran Gelombang



Gambar 13. Saluran Gelombang Lab Hidrodinamika ITB
Sumber: Nurisman, N (2016)

5.2.2 Wave Generator

Gelombang di dalam *wave flume* (saluran gelombang 2D) dibangkitkan oleh *wave generator* (pembangkit gelombang). Alat tersebut bekerja dengan menggunakan sistem mekanik yang dapat membangkitkan gelombang reguler

5.2.3 Probe

Probe digunakan untuk mencatat tinggi gelombang yang dihasilkan oleh *wave generator*. Alat pengukur gelombang ini dapat dilihat gambar berikut ini



Gambar 14. Probe (Pengukur Elevasi Muka Air (Gelombang))
Sumber: Nurisman, N (2016)

5.2.4 Penggaris/Meteran

Selain dilakukan pengukuran tinggi gelombang menggunakan probe, praktikan juga harus melakukan pengamatan visual guna verifikasi data. Adapun alat bantu yang digunakan dalam pengamatan visual adalah penggaris/meteran yang diletakkan dinding kaca *wave flume*.

5.2.5 Kamera

Berfungsi sebagai alat perekam untuk dokumentasi dan merekam proses perambatan gelombang sehingga dapat mempelajari dan menganalisis perambatan gelombang lebih detail.

5.3 Prosedur Percobaan

Secara garis besar, langkah kerja kegiatan adalah sebagai berikut

1. Menentukan variabel yang berpengaruh dalam suatu fenomena di lapangan seperti tinggi gelombang, periode gelombang, kedalaman perairan.
2. Melakukan penyederhanaan variabel pada point (1) di atas untuk memudahkan identifikasi pemodelan yang diperlukan. Proses penyederhanaan variabel adalah dengan cara analisa dimensi.
3. Setelah analisa dimensi dilakukan maka diidentifikasi variabel apa saja yang akan digunakan dan diubah-ubah nilainya, hal ini juga mengingat keterbatasan biaya dan kemampuan laboratorium.
4. Melakukan pen-skala-an dari prototipe menjadi model yakni meminiaturkan prototipe menjadi lebih kecil untuk diletakkan di laboratorium,

untuk itu digunakan prinsip bahwa parameter bilangan Froude antara prototipe dan model harus sama.

5.3.1 Pengukuran Tinggi dan Periode Gelombang Secara Visual

Tahapan pengukuran tinggi dan periode gelombang adalah sebagai berikut

- Tinggi muka air tenang ditentukan dengan menggunakan tali meteran atau penggaris.
- Paddle dijalankan dengan berbagai kondisi (kedalaman, angka potensiometer, dan posisi lengan paddle) tertentu.
- Tinggi gelombang diukur dengan menggunakan Probe yang merupakan alat ukur otomatis, sedangkan pengamatan secara langsung (visual) dilakukan dengan cara melihat besaran nilai disentuh oleh puncak dan lembah gelombang (air) di alat penggaris/meteran.
- Adapun periode gelombang diukur dengan menggunakan *stopwatch* dengan melihat waktu yang dibutuhkan oleh puncak-puncak gelombang melwati suatu titik pengamatan
- Pengukuran diulangi untuk posisi lengan paddle dan angka potensiometer yang lain hingga diperoleh tinggi gelombang dan periode gelombang.

5.3.2 Objek Pembahasan

Proses analisa menggunakan saluran gelombang dapat dijadikan sebagai objek untuk mengamati tinggi gelombang, periode gelombang, dan panjang gelombang yang diperoleh selama pekerjaan. Selain itu uga dapat mengkaji lebih jauh terkait kecepatan gelombang berdasarkan data-data yang diperoleh selama kegiatan praktikum.

Tinggi Gelombang = jarak antara puncak dan lembah



BAB VI MODEL TRANSPOR SEDIMEN

6.1 Pengenalan *Moveable-Bed Models*

Pemodelan fisik atau metode eksperimen laboratorium ditinjau dari dasar salurannya terbagi menjadi 2 (dua) yaitu:

a. *Fixed-Bed Models*

Fixed bed model merupakan bentuk model fisik yang umumnya digunakan untuk melakukan model uji breakwater, struktur platform. Dimana pemodelan fisik jenis ini menggunakan *fix bed* (dasar yang solid/tetap).

b. *Moveable-Bed Models*

Moveable-bed model merupakan pemodelan uji fisik yang digunakan untuk mempelajari fenomena transpor sedimen, dimana dasar saluran yang digunakan pada pemodelan ini terdiri dari material yang dapat bereaksi dengan gaya hidrodinamik.

Moveable-Bed Models adalah salah satu alternatif model fisik untuk mempelajari fenomena transpor sedimen daerah pantai yang dapat digerakkan oleh gaya hidrodinamik akibat gelombang dan arus.

6.2 Permasalahan dari *Moveable-Bed Models*

Fenomena transport sedimen yang diamati dengan menggunakan *moveable-bed models* memiliki beberapa permasalahan akibat gaya hidrodinamik yang bekerja pada saluran dan prosesnya, yaitu:

- a. *Moveable-Bed Models*, memiliki dasar laut (*bed*) yang tersusun dari material yang dapat bereaksi dengan gaya hidrodinamik yang bekerja (akibat gelombang dan arus).
- b. Efek skala pada *Moveable-Bed Models* belum dipahami atau dimengerti sebaik pada *Fix-Bed Models*, maka hasil dari model ini harus di review kembali secara hati-hati dengan mengacu kepada demonstrasi pemodelan perubahan dasar laut lainnya yang telah sukses.

6.3 Fungsi dari *Moveable-Bed Models*

Adapun fungsi yang didapatkan dari *moveable-bed models* adalah:

- a. Menginvestigasi efek atau pengaruh dari struktur onshore maupun offshore terhadap evolusi garis pantai, stabilitas pantai, dan desain bangunan pantai untuk mencegah erosi.

- b. Menginvestigasi layout bangunan pantai yang bertujuan untuk meminimalisasi erosi pantai dan sedimentasi pada pelabuhan.

Beberapa contoh pemodelan fisik 2D untuk *moveable-bed models* yang berpotensi untuk digunakan pada bidang teknik kelautan adalah:

- 1) Evolusi atau perubahan profil pantai
- 2) Erosi Berm/Dune
- 3) Pembentukan Ripple
- 4) Penggerusan (scouring) pada bangunan pantai
- 5) Pengisian area pantai
- 6) *Respons of beach fills to storm*
- 7) *Respons of cobble beach to wave action*
- 8) *Bed form translation under unidirectional currents*

Sedangkan untuk pemodelan fisik 3D yang untuk *moveable-bed models* yang berpotensi untuk digunakan pada bidang teknik kelautan adalah:

- 1) Erosi pada lokasi pengerukan
- 2) Littoral drift akibat pembelokan gelombang
- 3) Pengaruh bangunan pantai dengan jarak yang berdekatan
- 4) Proses pembentukan morfologi pantai spit
- 5) Efek shoaling di pelabuhan
- 6) Pembentukan ripple (3D)
- 7) Gerusan sedimen di sekitar struktur

6.4 Analisa Dimensi Transpor Sedimen

Parameter fisik yang terlibat dalam transport sedimen pantai telah diidentifikasi (Kamphius, 1985; Dalrymple, 1989) sebagai berikut:

6.4.1 Parameter Hidrodinamika

Parameter hidrodinamik merupakan parameter yang dipengaruhi oleh gerak harmonik yang terjadi akibat gaya gravitasi (seperti gelombang). Adapun parameter hidrodinamik adalah:

Simbol Parameter	Keterangan
H	Tinggi gelombang

Simbol Parameter	Keterangan
T	Perioda gelombang
L	Panjang gelombang
λ	Panjang karakteristik
x, y	Koordinat horizontal
z	Koordinat vertikal
T	Waktu
h	Kedalaman perairan lokal
g	Percepatan gravitasi
ks	Kekasaran dasar perairan
ρ	Kerapatan fluida
v	Viskositas kinematika fluida

6.4.2 Parameter Sedimen

Adapun parameter sedimen adalah:

Simbol Parameter	Keterangan
d	Diameter sedimen
ρ_s	Kerapatan sedimen
τ_b	Tegangan dasar perairan
ω	Kecepatan sedimen layang

6.5 Persyaratan Kesamaan Hidrodinamik

Dari analisa dimensi metoda Buckingham Pi Theorem, diperoleh:

$$\Pi_H = f \left[\frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{z}{L}, \frac{k_s}{L}, t \sqrt{\frac{g}{L}}, \frac{v}{L\sqrt{gL}} \right]$$

Dari persamaan di atas 5 bilangan tak berdimensi pertama menyatakan bahwa geometri model harus *UNDISTORTED* (skala horizontal = skala vertikal). Parameter atau bilangan tak berdimensi ke-6 bersifat konstan dikarenakan kekasaran pada model sama dengan kekasaran prototype. Bilangan tak berdimensi ke-7 dapat digunakan untuk mendapatkan $t \sqrt{\frac{g}{L}}$ dimana $\sqrt{\frac{L}{g}}$ merupakan periode gerak harmonik (gelombang) akibat gaya gravitasi. Bilangan tak berdimensi ke-8, $\frac{v}{L\sqrt{gL}}$ dikenal sebagai bilangan Reynolds dengan kecepatan aliran dinyatakan oleh $\sqrt{gL}$. Berdasarkan analisa dari parameter-parameter non dimensional pada persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa tahap hidrodinamik dari pemodelan transpor sedimen harus *UNDISTORTED* secara geometri dan diskalakan berdasarkan kriteria *Froude*.

6.6 Syarat Keserupaan Transpor Sedimen

Parameter fisik dari sedimen dapat dikombinasikan dengan beberapa parameter fisik dari fluida untuk membentuk suatu set bilangan non dimensional yang umum digunakan pada aliran searah. Kamphius (1985) menggunakan parameter sedimen d , ρ_s , dan τ_b yang dikombinasikan dengan parameter fluida seperti ρ , v , dan λ untuk merepresentasikan sedimen dalam kaitannya dengan fungsi:

$$f(\rho, v, \lambda, \tau_b, d, \rho_s) = 0$$

Berikut satu set persamaan parameter non-dimensional yang sesuai

$$\Pi_{so} = g \left[\frac{vd}{v}, \frac{\rho v^2}{\gamma_i d}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\lambda}{d} \right]$$

Dimana :

$$v = \text{Kecepatan Geser} \left[= \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \right]$$

$$\gamma_i = \text{Berat jenis sedimen terendam} [= (\rho_s - \rho)g]$$

Persamaan tersebut paling sesuai untuk transport sedimen yang diakibatkan tegangan geser (τ_b) yang terjadi pada dasar *boundary layer* (*bedload sediment transport*).

Selanjutnya, Kamphius menambah satu parameter lagi yaitu $\frac{\omega}{v}$ yang merupakan rasio antara kecepatan sedimen jatuh dengan kecepatan geser. Sehingga dapat disimpulkan bahwa

parameter non-dimensional untuk transport sedimen yang telah dikombinasikan dengan beberapa parameter fisik dari fluida adalah sebagai berikut:

$$\Pi_{so} = g \left[\frac{vd}{v}, \frac{\rho v^2}{\gamma_i d}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\lambda}{d}, \frac{\omega}{v} \right]$$

Bilangan non-dimensional yang pertama merupakan “Grain Size Reynolds Number” yaitu:

$$R_* = \frac{v_* \cdot d}{\nu}$$

Bilangan non-dimensional yang kedua dinyatakan sebagai “Densimetric Froude Number” yaitu:

$$F_* = \frac{\rho v^2}{\gamma_i d}$$

Bilangan non-dimensional yang ketiga dinyatakan sebagai “Kerapatan Relatif Sedimen” yaitu:

$$S_s = \frac{\rho_s}{\rho}$$

Bilangan non-dimensional yang keempat dinyatakan sebagai “Panjang Relatif” yaitu:

$$I_s = \frac{\lambda}{d}$$

Panjang karakteristik λ , pada parameter panjang relatif merupakan rata-rata amplitudo gelombang (a_m) untuk model gelombang pendek dan kedalaman air (h) untuk model gelombang panjang dan aliran searah. Parameter non-dimensional yang kelima merupakan “Kecepatan Jatuh Sedimen Relatif” yaitu: $V_w = \frac{\omega}{v_*}$. Untuk keserupaan yang sempurna atau lengkap pada transport sedimen, seluruh nilai dari kelima parameter diatas harus sama antara model dan prototipenya. Secara umum, tidak dimungkinkan untuk melakukan penskalaan pada prototipe. Oleh karena itu dibuatlah keserupaan tidak lengkap.

6.7 Syarat Penskalaan Transpor Sedimen

Keserupaan yang sempurna dapat diperoleh jika rasio antara prototype dan model dari kelima parameter non-dimensional tersebut sama dengan satu.

$$N_R = N_f = N_{\frac{\rho_s}{\rho}} = N_{\frac{\lambda}{d}} = N_{v_\omega} = 1$$

Dan hidrodinamikanya diskalakan berdasarkan kriteria Froude dan *Undistorted*. Namun pada kenyataannya, keserupaan yang sempurna adalah hal yang mustahil. Kamphius (1974,1975)

menyarankan beberapa keserupaan yang tidak sempurna dimana dua atau lebih rasio skala tidak terpenuhi.

Tipe Model	$\frac{v_* \cdot d}{v}$	$\frac{\rho \cdot v_*^2}{\gamma_i \cdot d}$	$\frac{\rho_s}{\rho}$	$\frac{\lambda}{d}$	$\frac{\omega}{v_*}$
Best Model (BM)	-	+	+	+	-
Lightweight Model (LWM)	+	+	*	-	-
Densimetric Froude Model (DFM)	-	+	*	-	-
Sand Model (SM)	-	-	+	-	-

Keterangan:

+ : Memenuhi

- : Tidak Memenuhi

* : Tidak memenuhi terpatas pada $1.05 < \frac{\rho_s}{\rho} < 2.65$

Dari tabel diatas, terlihat bahwa tidak ada satupun tipe model yang dapat memenuhi kriteria parameter kecepatan jatuh sedimen relative. Berikut ini rasio antara prototipe dan model dari 5 parameter non-dimensional pada setiap kondisi keserupaan:

a) Kriteria “Grain Size Reynolds Number”

$$Nr = \frac{N_v N_d}{N_v} = 1$$

b) Kriteria “ Densimetric Froude Number”

$$Nf = \frac{N_\rho N_v^2}{N_{\gamma_i} N_d} = 1$$

c) Kriteria Rapat Jenis

$$\frac{N_{\rho_s}}{N_\rho} = 1$$

d) Kriteria “Panjang Relatif “

$$\frac{N_\lambda}{N_d} = 1$$

e) Kriteria “Kecepatan Jatuh Sedimen Relatif”

$$N_{v\omega} = \frac{N_\omega}{N_{v_*}} = 1$$

BAB VII KEBUTUHAN MODEL FISIK

7.1 Kapasitas Alat

Pekerjaan pemodelan fisik merupakan pekerjaan yang membutuhkan perangkat/alat yang kompleks. Alat – alat yang dibutuhkan menyesuaikan dengan objek yang akan dikaji dalam pekerjaan. Adapun alat – alat yang umumnya selalu dibutuhkan adalah kolam saluran gelombang (*wave flume*), probe, pembangkit gelombang (*wave maker*), peredam gelombang (*wave dumping*), *control panel*.

Spesifikasi alat seperti dimensi saluran geluran gelombang (*wave flume*) mempengaruhi besar kecilnya pen-skala-an yang akan digunakan dalam pekerjaan. Semakin kecil dimensi saluran gelombang maka semakin besar skala yang digunakan. Pertimbangan tersebut juga didasarkan pada objek dari gelombang balik yang mungkin di sekitar posisi alat pembangkit gelombang (*wave maker*) dan ujung saluran gelombang (*wave flume*).

7.2 Biaya

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam penyusunan Rencana Anggaran Biaya, yaitu:

- Objek dan tujuan pekerjaan
- Alat dan bahan yang digunakan
- Jumlah praktikan/pekerja
- Biaya sewa laboratorium, peralatan dan tenaga ahli
- Durasi (waktu yang dibutuhkan) untuk 1 kali percobaan

