

14.882/H/02



**TUGAS AKHIR
OE 1701**

**MODEL FISIK TERDISTORSI
KASUS TSUNAMI BANYUWANGI 1994
DI TELUK RAJEGWESI**



RSke
551.470 24
Son
17-1

2000

Disusun Oleh :

SONYA RATNA A.P

NRP : 4392.100.006

**JURUSAN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

SURABAYA

2000

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	3/10/2000
Tahun Terbit	4
No. Agenda Perp.	21.2136

**MODEL FISIK TERDISTORSI
KASUS TSUNAMI BANYUWANGI 1994
DI TELUK RAJEGWESI**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

Jurusan Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

Surabaya, Agustus 2000

Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Paulus Indivono, MSc.
NIP. 131 453 680

Ir. A. Bagyo Widagdo, M.T.
NIP. 680 002 909

A gift to my increadeable family,

My sweet new family,

and my precious friends

Matur nuwin sanget



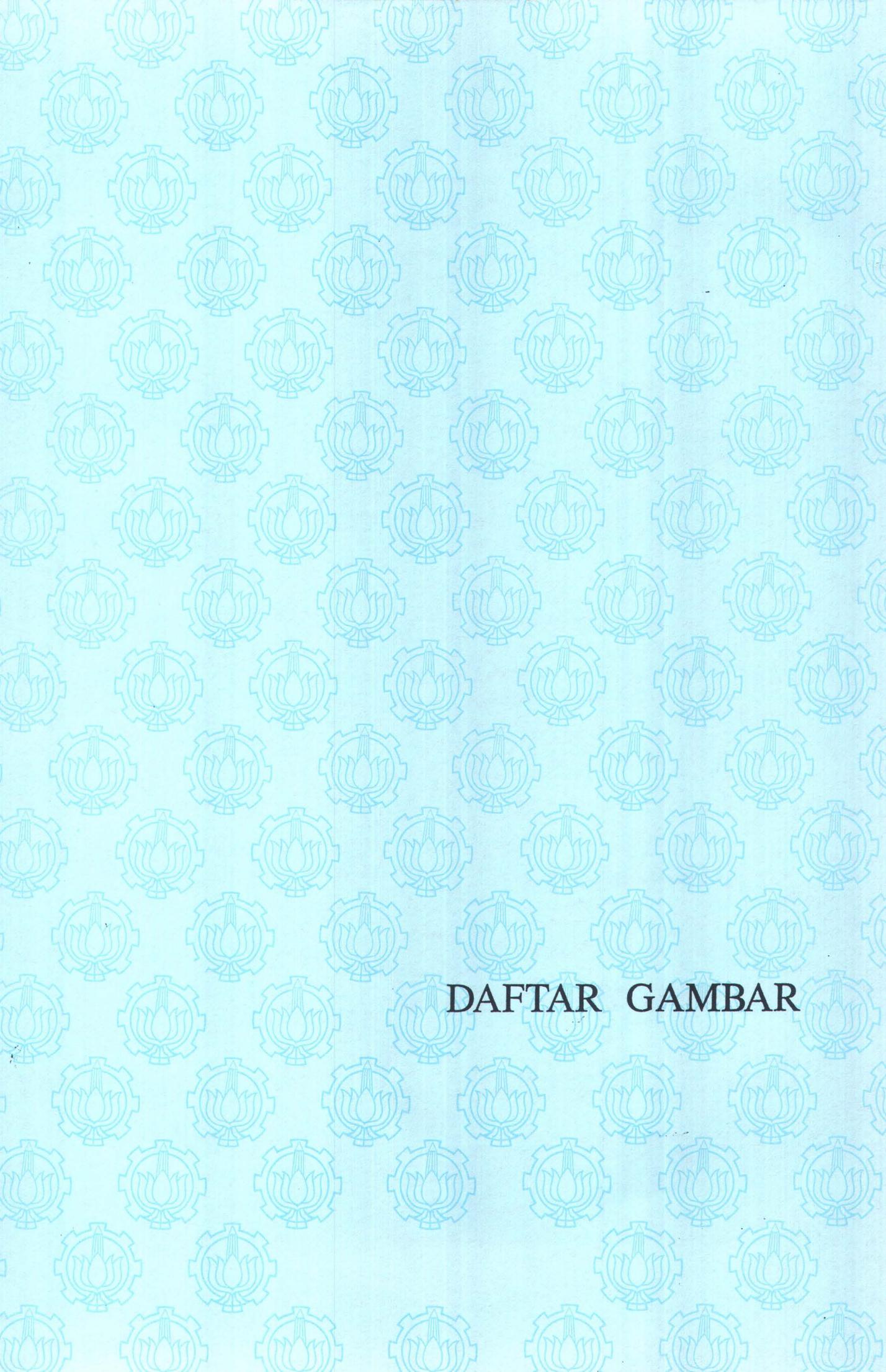
ABSTRAK

ABSTRAK

Bencana yang ditimbulkan akibat tsunami memberikan dampak kerugian yang besar terhadap kehidupan manusia dan lingkungan. Informasi yang lengkap mengenai tsunami sangat penting sebagai usaha mitigasi bencana dan sebagai bahan pelajaran untuk menghadapi bencana serupa di masa datang. Studi mengenai tsunami dapat dilakukan secara teoritis-matematis, studi laboratorium dan studi lapangan. Ketiga jenis studi tersebut akan saling mendukung dan berkaitan satu dengan yang lainnya. Dalam rekayasa pantai, banyak permasalahan yang yang tidak dapat dipecahkan dengan rumus-rumus yang ada karena beberapa rumus yang ada diturunkan dari suatu kondisi tertentu yang belum tentu sama dengan kondisi sebenarnya, sehingga studi laboratorium dengan menggunakan model fisik hidraulik sangat tepat dan bermanfaat. Penggunaan model fisik hidraulik (*hydraulic scale model, physical modelling*) ini dilakukan apabila fenomena fisik dari permasalahan yang ada di prototip dapat dibuat dengan skala yang lebih kecil dengan kesebangunan (similaritas) yang cukup memadai. Dalam pemodelan fisik hidraulik, apabila satu atau lebih dari kriteria kesebangunan tidak terpenuhi maka model tersebut dikatakan sebagai model terdistorsi. Pemodelan fisik dari fenomena tsunami di Teluk Rajegwesi dilakukan dengan model terdistorsi dengan mempertimbangkan fasilitas dan material yang tersedia untuk pengujian model. Model fisik terdistorsi adalah pemodelan fisik dengan skala horisontal dan skala vertikal yang berbeda. Dengan kata lain suatu model terdistorsi tidak mempunyai kesebangunan geometrik yang sama dengan yang ada pada prototip. Pemodelan fisik terdistorsi dari fenomena tsunami dilakukan untuk mendapatkan nilai atau besaran run up yang terjadi pada pantai di Teluk Rajegwesi. Hasil pengujian dari pemodelan ini perlu diinterpretasikan ke prototip dengan cara membawa data pengujian model terdistorsi ke model tidak terdistorsi dengan membandingkan nilai run upnya kemudian dikalikan faktor skala model tidak terdistorsi dan data hasil pengukuran di laboratorium. Analisa perhitungan dilakukan terhadap hasil pengujian gelombang cnoidal karena dari pemodelan tersebut diketahui bahwa jenis gelombang yang lebih mencerminkan keadaan prototip adalah jenis gelombang ini.



KATA PENGANTAR



DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar	1.1.	Lokasi episenter gempa di Samudera Indonesia.....	I-6
Gambar	1.2.	Lokasi dampak tsunami di Banyuwangi dan pantai di sekitarnya serta distribusi run up gelombang.....	I-6
Gambar	2.1.	Bagan penyelesaian masalah lewat modelisasi.....	II-6
Gambar	2.2.	Pembangkitan gelombang di perairan dangkal.....	II-19
Gambar	3.1	Hubungan antara kekuatan gempa dan besaran tsunami	III-3
Gambar	3.2	Hubungan antara kekuatan gempa dan periode gelombang ...	III-4
Gambar	3.3	Daerah rawan tsunami di Indonesia.....	III-5
Gambar	3.4	Klasifikasi gelombang menurut gaya pembangkitnya.....	III-6
Gambar	3.5	Pergerakan sepanjang garis patahan.....	III-7
Gambar	3.6	Sketsa sederhana gelombang amplitudo kecil.....	III-11
Gambar	4.1	Run up gelombang.....	IV-2
Gambar	4.2	Lokasi penempatan titik sensor A.....	IV-9
Gambar	4.3	Lokasi penempatan titik sensor B.....	IV-10
Gambar	4.4	Penempatan titik sensor B pada penampakan potongan kontur.....	IV-11



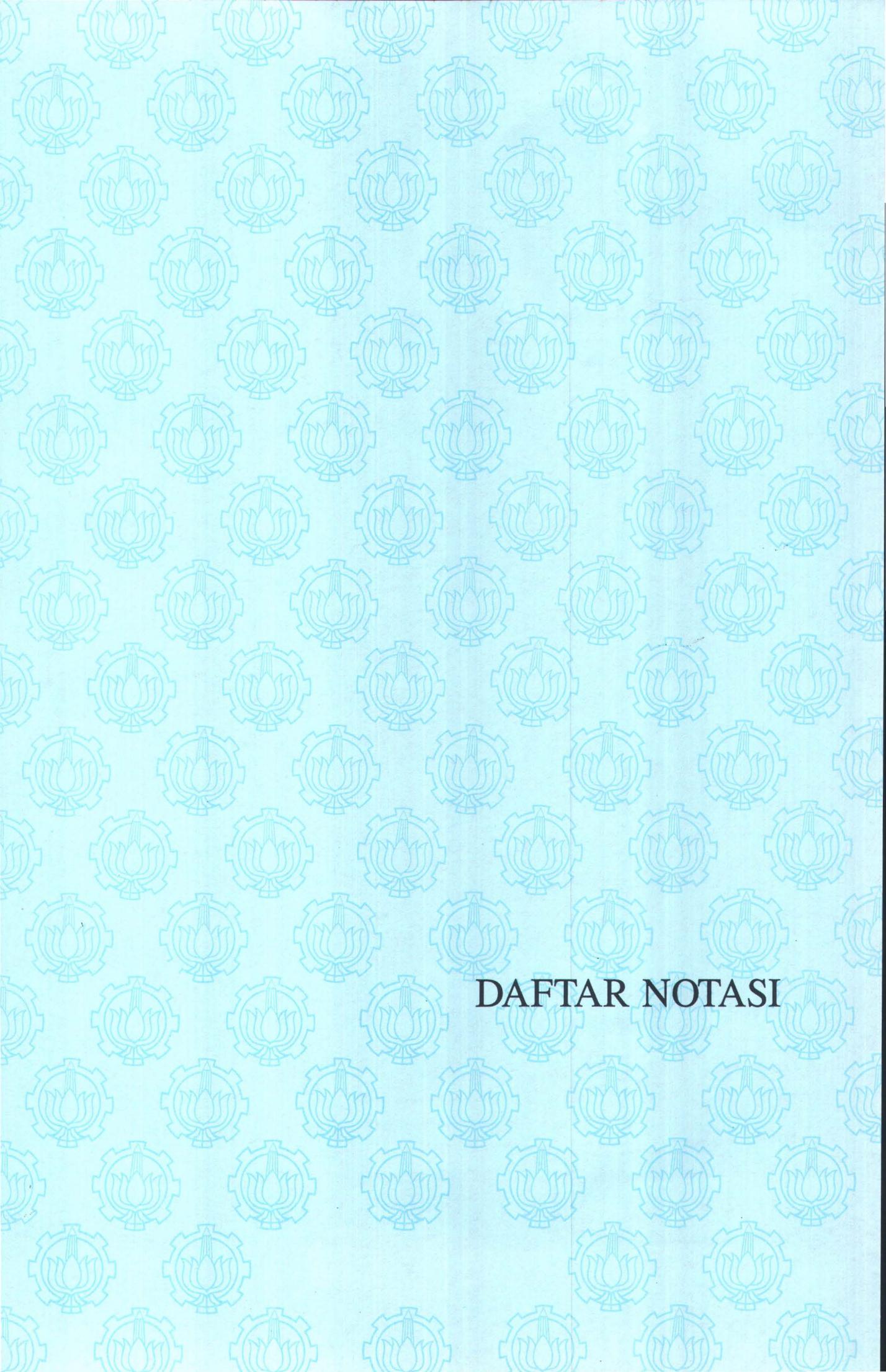
DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Hubungan antara besaran gempa dan tinggi tsunami di pantai.....	III-2
Tabel 4.1	Parameter skala model pengujian untuk model terdistorsi.....	IV-5
Tabel 4.2	Parameter skala model pengujian untuk model tak terdistorsi	IV-6
Tabel 4.3	Perhitungan analitis run up model terdistorsi	IV-7
Tabel 4.4	Perhitungan analitis run up model tak terdistorsi	IV-7
Tabel 4.5	Hasil perhitungan analitis run up prototip (terdistorsi dan tidak terdistorsi)	IV-7
Tabel 4.6	Karakteristik gelombang pengujian jenis gelombang solitary	IV-9
Tabel 4.7	Karakteristik gelombang pengujian jenis gelombang cnoidal	IV-16
Tabel 5.1	Hasil pengujian run up terdistorsi di laboratorium untuk sensor B1-5 sampai B5-5 dalam satuan cm	V-2
Tabel 5.2	Hasil perhitungan run up secara analitis dan dengan metode numerik.....	V-4
Tabel 5.3	Hasil simulasi numerik run up terdistorsi	V-5
Tabel 5.4	Hasil simulasi numerik run up tidak terdistorsi	V-5
Tabel 5.5	Hasil perhitungan run up dengan metode numerik pada sensor B1-5.....	V-6
Tabel 5.6	Hasil perhitungan run up dengan metode numerik pada sensor B2-5.....	V-7
Tabel 5.7	Hasil perhitungan run up dengan metode numerik pada sensor B3-5.....	V-7
Tabel 5.8	Hasil perhitungan run up dengan metode numerik pada sensor B4-5.....	V-8
Tabel 5.9	Hasil perhitungan run up dengan metode numerik pada sensor B5-5	V-8
Tabel 5.10	Hasil perhitungan run up prototip dengan metode numerik dan di laboratorium.....	V-9

DAFTAR NOTASI

A_P	: Luas pada prototip (tidak berdimensi)
A_M	: Luas pada model (tidak berdimensi)
C	: Cepat rambat gelombang (celerity)
d	: Variabel kedalaman (m)
f	: Parameter coriolis
g	: Percepatan gravitasi bumi (m/det^2)
H	: Tinggi gelombang (m)
H_P	: Tinggi pada prototip (tidak berdimensi)
H_M	: Tinggi pada model (tidak berdimensi)
h	: Variabel kedalaman perairan (m)
k	: Angka gelombang
L	: Panjang gelombang (m)
L_P	: Panjang pada prototip (tidak berdimensi)
L_M	: Panjang pada model (tidak berdimensi)
N_A	: Skala luas (tidak berdimensi)
N_H	: Skala tinggi (tidak berdimensi)
N_L	: Skala panjang (tidak berdimensi)
N_Q	: Skala debit (tidak berdimensi)
N_t	: Skala waktu (tidak berdimensi)
N_T	: Skala periode gelombang (tidak berdimensi)
N_U	: Skala kecepatan (tidak berdimensi)
N_V	: Skala kecepatan (tidak berdimensi)
	: Skala volume (tidak berdimensi)
S	: Jarak gerakan wave board (m)
T	: Variabel waktu (detik)
	: Periode gelombang (detik)
t	: Variabel waktu (detik)
U, V, W	: Variabel kecepatan arah x,y,z (m/det)
u	: Kecepatan dalam arah θ
V	: Kecepatan gelombang (m/det^2)



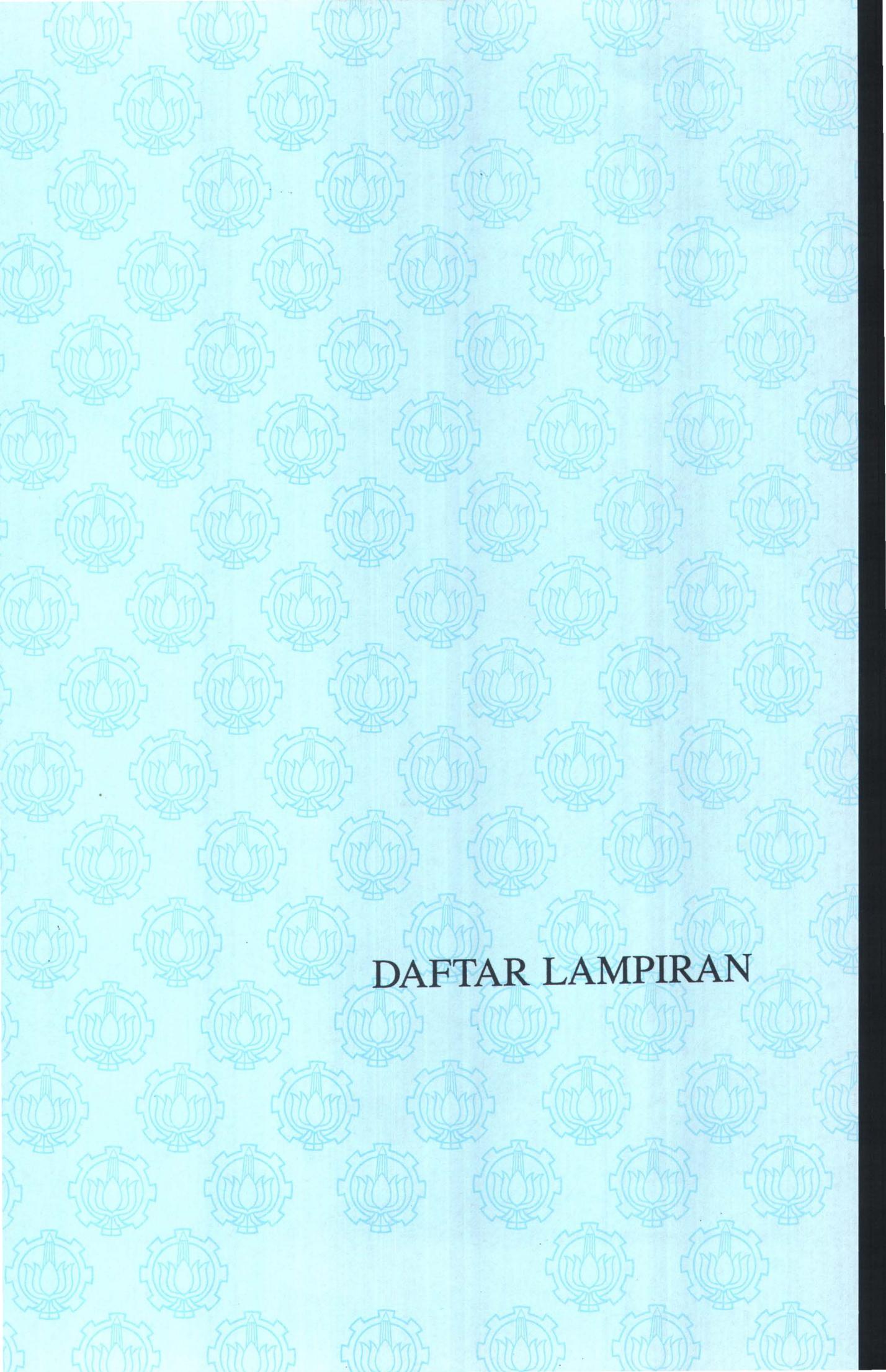
DAFTAR NOTASI

v	: Kecepatan dalam arah ϕ
V_P	: Volume pada prototip (tidak berdimensi)
V_M	: Volume pada model (tidak berdimensi)
F_I	: Gaya inersia
F_g	: Gaya berat
F_r	: Froude number
F_μ	: Gaya gesek
ρ	: Densitas fluida
F_σ	: Gaya tegangan permukaan
F_e	: Gaya kenyal
x	: Panjang arah horisontal (m)
z	: Panjang arah vertikal (m)
μ	: Viskositas dinamik (m^2/det)
σ	: Tegangan permukaan (N/ m^2)
	: Frekwensi angular gelombang (Hz)
E	: Modulus elastisitas (GPa)
P	: Tekanan (N/ m^2)
$\eta_{(x,t)}$: Elevasi permukaan air (m)
$\eta_{(x_0,t)}$: Elevasi permukaan air pada posisi papan gelombang bergerak (m)
θ	: Sudut fase
	: Garis lintang derajat (diukur dari kutub)
ω	: Variabel dummy dari integrasi
m	: Besaran tsunami
M	: Kekuatan gempa
R_e	: Jari-jari bumi (m)
ϕ	: Titik garis bujur yang dilewati oleh permukaan gelombang (°)
	: Garis bujur derajat (diukur ke arah timur)
ψ	: Titik garis lintang (°)
α	: Sudut antara wave ray dengan garis lintang
β	: Sudut batas pemisahan ray
Ω	: Kecepatan rotasional bumi dalam radian per detik



DAFTAR LAMPIRAN

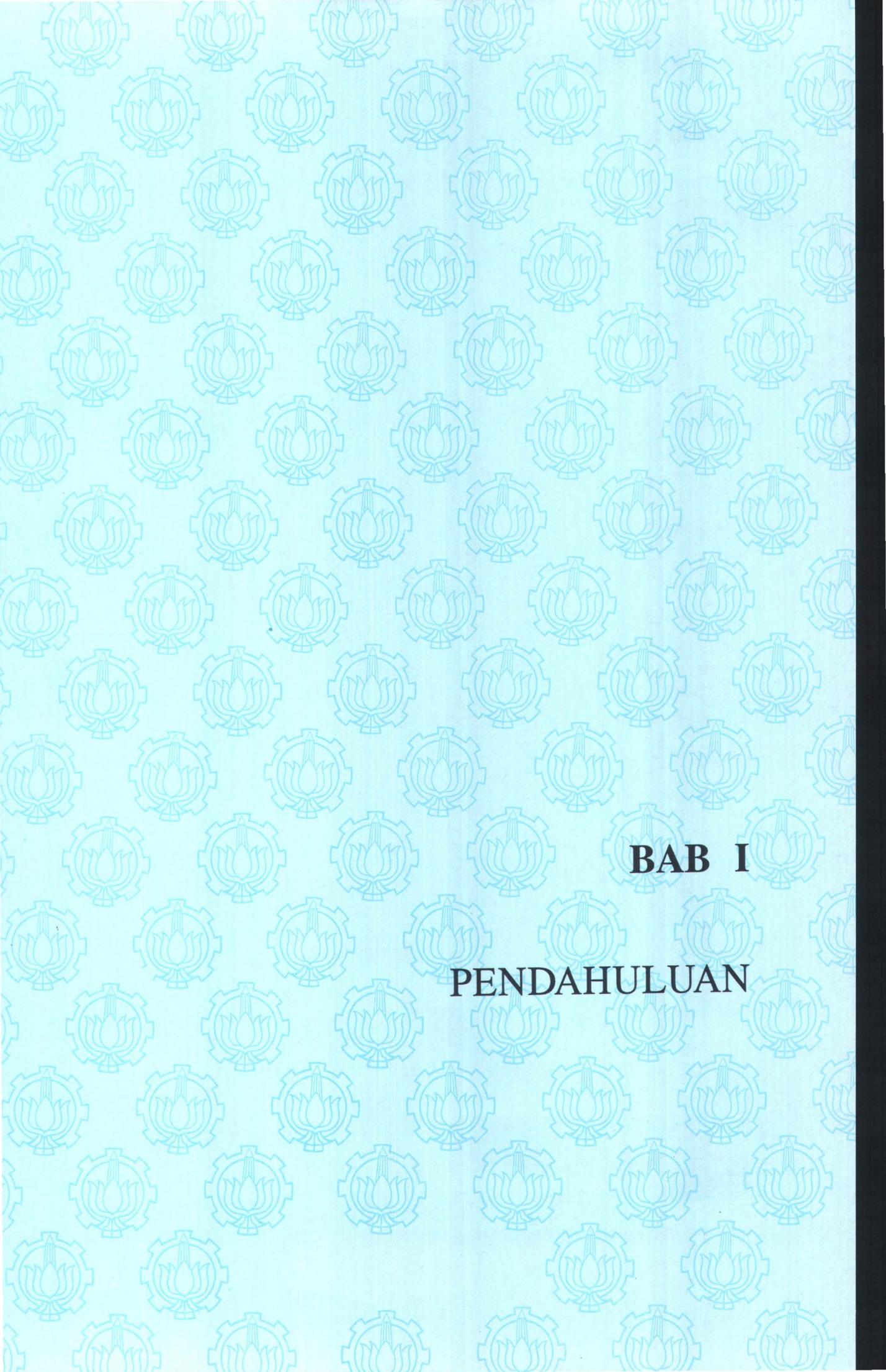
- v : Kecepatan dalam arah ϕ
- V_P : Volume pada prototip (tidak berdimensi)
- V_M : Volume pada model (tidak berdimensi)
- F_I : Gaya inersia
- F_g : Gaya berat
- F_r : Froude number
- F_μ : Gaya gesek
- ρ : Densitas fluida
- F_σ : Gaya tegangan permukaan
- F_e : Gaya kenyal
- x : Panjang arah horisontal (m)
- z : Panjang arah vertikal (m)
- μ : Viskositas dinamik (m^2/det)
- σ : Tegangan permukaan (N/ m^2)
- ω : Frekwensi angular gelombang (Hz)
- E : Modulus elastisitas (GPa)
- P : Tekanan (N/ m^2)
- $\eta_{(x,t)}$: Elevasi permukaan air (m)
- $\eta_{(x_0,t)}$: Elevasi permukaan air pada posisi papan gelombang bergerak (m)
- θ : Sudut fase
- λ : Garis lintang derajat (diukur dari kutub)
- ω : Variabel dummy dari integrasi
- m : Besaran tsunami
- M : Kekuatan gempa
- R_e : Jari-jari bumi (m)
- ϕ : Titik garis bujur yang dilewati oleh permukaan gelombang (°)
- λ : Garis bujur derajat (diukur ke arah timur)
- ψ : Titik garis lintang (°)
- α : Sudut antara wave ray dengan garis lintang
- β : Sudut batas pemisahan ray
- Ω : Kecepatan rotasional bumi dalam radian per detik



DAFTAR LAMPIRAN

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Peta perkiraan tinggi rayapan tsunami di pantai Rajegwesi, Banyuwangi
- Lampiran 2 Peta geologi permukaan daerah Rajegwesi, Banyuwangi
- Lampiran 3 Gambar denah lokasi percobaan, LPTP-BPPT, Yogyakarta
- Lampiran 4 Mock-up model fisik dan posisi wave probe di wave basin
- Lampiran 5 Gambar *wave generator* di LPTP-BPPT Yogyakarta
- Lampiran 6 Gambar peletakan sensor percobaan di LPTP-BPPT Yogyakarta
- Lampiran 7 Gambar peletakan titik sensor A
- Lampiran 8 Gambar peletakan titik sensor B
- Lampiran 9 Statistical hasil pembacaan sensor model gelombang Cnoidal



BAB I

PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Antara tahun 1900 sampai dengan 1994 setidaknya telah terjadi lima belas tsunami di Indonesia. Bencana tsunami tersebut telah menyebabkan banyak kerugian, baik jiwa maupun harta benda. Tidak kurang dari tiga ribu nyawa melayang dan milyaran rupiah terbang selama kurun waktu tersebut. Sebagai contoh, bencana tsunami yang terjadi di Flores pada tanggal 12 Desember 1992, yang diakibatkan oleh gempa berkekuatan 6,8 skala Richter menyebabkan 2.100 jiwa melayang dan kerugian material diperkirakan mencapai Rp. 200 Milyar. (*Harian Surya, 17 Des. 1992*). Kemudian pada tanggal 3 Juni 1994 pukul 01.17 waktu setempat (atau tanggal 2 Juni pukul 18.17 GMT) di pantai Selatan pulau Jawa tepatnya di Samudera Hindia terjadi gempa bumi dahsyat dengan magnitud $M_w = 7.6$. Episenter gempa ini terletak pada S 10.5, E 113.0 atau 240 km dari sebelah Selatan pantai terdekat pulau Jawa bagian Timur. Gempa ini mengakibatkan tsunami yang cukup besar setinggi lebih dari 13 meter dengan tinggi minimum sekitar 3 meter dan memakan korban jiwa sebanyak 208 orang.

Beberapa tsunami tersebut terjadi karena wilayah Indonesia berada di kawasan (zone) dengan aktivitas seismik yang ekstrem. Zone ini mengitari Samudra Pasifik dari sebelah Selatan Chili sampai ke pantai Selatan dan pantai Utara Amerika, melintasi bagian Barat kepulauan Auletian, di bagian Selatan melewati Jepang dan Filipina, di bagian Barat melalui Malaysia dan Indonesia, dan di bagian Timur melewati Papua Nugini, sekumpulan kepulauan Selatan dan berakhir di Selandia Baru. 'Lingkar Api' ini merupakan suatu bagian seismik penting yang

paling aktif di bumi dan secara periodik menimbulkan gelombang samudra yang besar, disebut dengan Tsunami yang mengancam hampir seluruh pulau dan pantai di Samudra Pasifik. Gempa di dasar laut akan menimbulkan gangguan impulsif pada permukaan laut. Hal ini dapat dipahami karena gempa dapat menggerakkan dasar laut secara vertikal yang akan langsung diikuti oleh perubahan kolom massa air yang ada di atasnya. Dengan kata lain, apa yang terjadi di dasar laut akan terus berlanjut dan terjadi pula di permukaan.

Tsunami adalah serangkaian gelombang samudra yang dihasilkan oleh perpindahan air dalam volume yang besar secara mendadak, yang disebabkan oleh gempa tipe thrust di bawah permukaan laut, longsoran, tabrakan meteor, atau letusan gunung berapi di laut. Sampai saat ini belum ada metode yang dapat menentukan apakah sebuah gelombang tsunami dibangkitkan oleh gempa bumi, kecuali dalam hal menentukan besar (magnitud) dan lokasi episenternya kemudian diketahui kedatangan gelombang tsunami dari sistem di stasiun pasang-surut (*tidal station*).

Tsunami bergerak ke segala arah dari daerah sumbernya. Kecepatan gelombang ini tergantung pada kedalaman air sehingga gelombang ini akan mengalami percepatan atau perlambatan saat melewati dasar laut dengan kedalaman yang berbeda. Pada laut dalam dan terbuka, kecepatan gelombang tsunami dapat mencapai 800 kilometer per jam dengan panjang gelombang sekitar 650 kilometer, tinggi gelombang berkisar antara 30 sampai 60 sentimeter hanya menimbulkan gerakan turun-naik secara lembut pada permukaan laut sehingga tidak terlihat oleh kapal laut atau kapal terbang yang melintasinya. Saat gelombang memasuki perairan dangkal pada daerah pantai, kecepatannya berkurang, panjang gelombang semakin kecil, dan tinggi gelombang meningkat secara tajam. Beberapa hal penting yang berpengaruh terhadap dampak kerusakan yang ditimbulkan oleh tsunami adalah

konfigurasi garis pantai, bentuk dasar laut, dan karakteristik gelombang yang mencapai pantai. Sebuah gelombang tsunami dapat diabaikan pada suatu titik pantai tertentu tetapi mempunyai ukuran yang sangat besar pada titik pantai yang lain.

Melihat banyaknya kerugian yang ditimbulkan akibat bencana tsunami, maka sangat diperlukan informasi yang lengkap mengenainya sebagai usaha mitigasi bencana dan sebagai bahan pelajaran untuk menghadapi bencana serupa di masa mendatang.

1.2 Perumusan Masalah

Pemodelan fisik dari fenomena tsunami yang telah dilakukan perlu diinterpretasikan ke prototip . Dalam penulisan tugas akhir ini akan dilakukan analisa dan pengujian secara teoritis terhadap hasil percobaan yang berupa data tinggi gelombang maksimal yang tercatat oleh sensor, dalam hal ini tinggi gelombang tersebut merupakan run up yang terjadi pada pemodelan. Dari percobaan tersebut diketahui bahwa model gelombang yang sesuai dengan gelombang tsunami yang terjadi di Teluk Rajegwesi adalah gelombang cnoidal, sehingga dalam pembahasan tugas akhir ini hanya akan dilakukan analisa terhadap gelombang tersebut.

1.3 Metodologi Penelitian

Metodologi dan analisa yang akan dikerjakan dalam penulisan ini ditempuh dalam beberapa tahapan, untuk tahap pertama akan dicari besarnya kemiringan sudut (slope) pantai di Teluk Rajegwesi dari data berupa kontur yang dikeluarkan oleh U.S Army Investigation dimana sensor-sensor diletakkan. Selanjutnya dicari besarnya

run-up dengan memperhitungkan nilai slope yang telah diperoleh, run-up yang didapat ini merupakan run-up dari model terdistorsi. Kemudian dicari juga run up dari model yang tidak terdistorsi. Setelah itu, hasil keduanya diperbandingkan dan dikalikan dengan skala tinggi gelombang pada model tidak terdistorsi sehingga didapat besarnya run up yang terjadi pada prototip. Kemudian hasil dari perhitungan ini diperbandingkan dengan hasil perhitungan yang tidak menggunakan faktor skala model tidak terdistorsi.

1.4 Batasan Masalah

Gelombang tsunami Banyuwangi yang dibangkitkan pada koordinat 10.5 LS; 113.0 BT , dalam penjarannya ke perairan pantai akan mengalami berbagai fenomena penjaran diantaranya proses refleksi, refraksi, difraksi, shoaling, dan run-up. Pembahasan lebih jauh dalam tugas akhir ini dibatasi hanya pada run-up tsunami khususnya run-up yang terjadi pada pemodelan. Dalam hal ini akan dilakukan analisa dan pengujian secara teoritis terhadap hasil dari pemodelan fisik yang telah dilaksanakan.

Dalam pelaksanaan uji model akan ditentukan beberapa asumsi dan batasan masalah yang disesuaikan dengan kondisi dan fasilitas laboratorium yang tersedia. Batasan masalah yang melingkupi penelitian ini adalah :

1. Gelombang yang dibangkitkan adalah gelombang teratur, dimana akan dibangkitkan jenis gelombang solitary dan gelombang cnoidal.
2. Tipe pemodelan yang dilakukan adalah model dasar tetap (fixed-bed model) sehingga perubahan kontur bathimetri akibat mekanisme gempa pembangkit tsunami tidak dimodelkan.

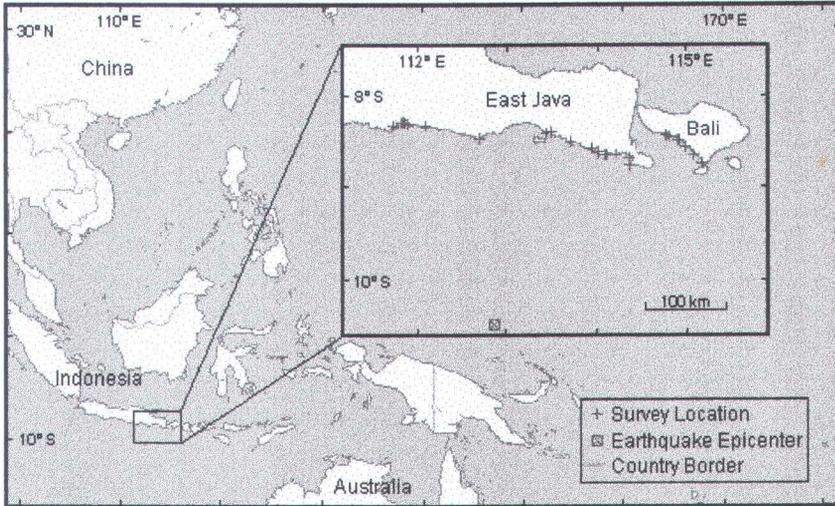
3. Transpor sedimen pada daerah di sekitar pantai yang terjadi pada model tidak ditinjau.
4. Pembangkitan gelombang diambil dari kedalaman air maksimum pada kolam gelombang (wave basin) karena disesuaikan dengan kondisi kolam dan pembangkit gelombang yang tersedia.
5. Stabilitas model garis pantai akibat hempasan gelombang yang dibangkitkan tidak ditinjau.
6. Perubahan muka air laut akibat pengaruh pasang surut tidak dimodelkan.
7. Ketinggian paras muka air pada saat percobaan dianggap sama pada saat terjadinya tsunami.

1.5 Tujuan

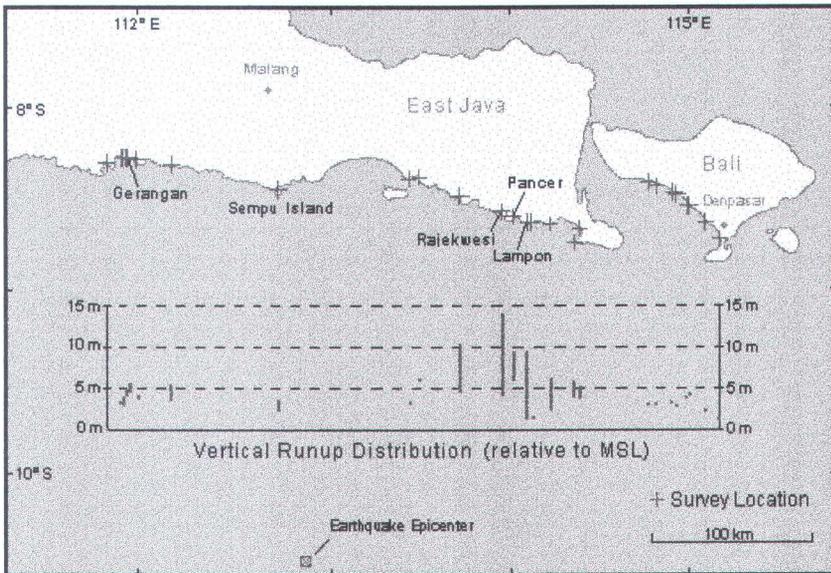
Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk mendapatkan nilai atau besarnya run up gelombang tsunami pada prototip, dalam hal ini gelombang tsunami yang terjadi pada pantai di Teluk Rajegwesi.

1.6 Manfaat

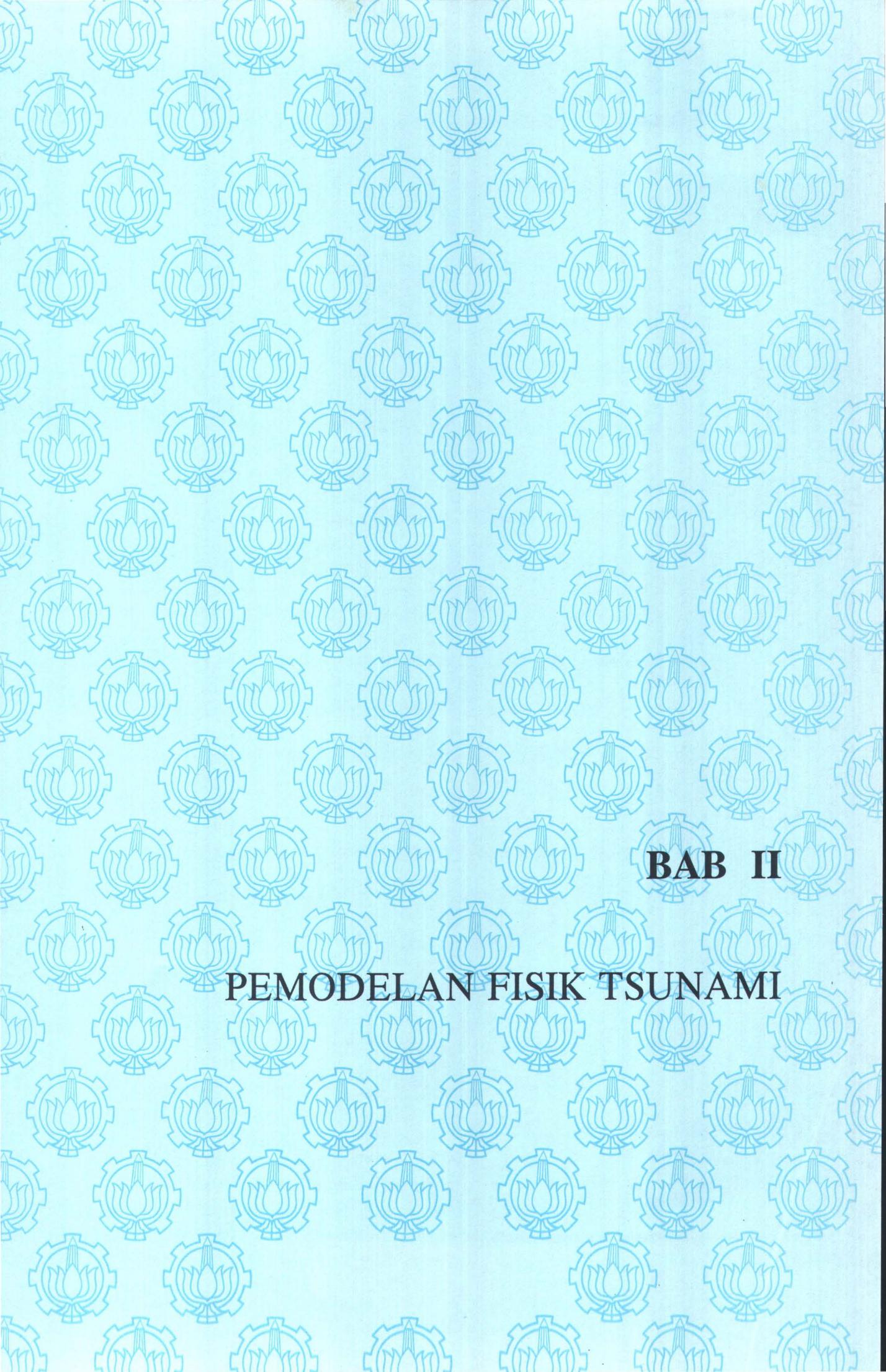
Dari penulisan ini dapat memberikan manfaat dalam hal menginterpretasikan hasil dari pemodelan fisik terdistorsi ke prototip, sehingga dapat diambil langkah-langkah yang sesuai untuk memperoleh hasil interpretasi yang tepat dari pemodelan yang dilakukan.



Gambar 1.1 Lokasi episenter gempa di Samudera Indonesia



Gambar 1.2 Lokasi dampak tsunami di Banyuwangi dan pantai di sekitarnya serta distribusi run up gelombang



BAB II

PEMODELAN FISIK TSUNAMI

B A B II

PEMODELAN FISIK TSUNAMI

2.1 Pengertian Model Fisik

Penyelesaian masalah-masalah teknik pantai memerlukan pengertian akan fenomena kelautan dan daerah pantai. Studi mengenai masalah-masalah teknik pantai dapat dilakukan dalam tiga kelompok yaitu studi teoritis dan matematis, studi di laboratorium, dan studi lapangan. Ketiga jenis studi tersebut akan saling mendukung dan berkaitan antara satu dengan yang lainnya.

Pengetahuan teoritis tentang teknik pantai merupakan dasar yang harus dikuasai di dalam menyelesaikan masalah-masalah pantai, misalnya sifat-sifat gelombang, tekanan dan gaya gelombang yang bekerja pada bangunan, proses perubahan bentuk gelombang selama penjalaran dari laut dalam ke pantai, interaksi antara gelombang dan arus di daerah pantai serta transpor sedimen di daerah pantai. Model matematis dilakukan dengan menyelesaikan persamaan-persamaan yang menggambarkan fenomena yang diteliti (semua fenomena alam bisa digambarkan dengan tiga persamaan dasar hidraulika yaitu persamaan kontinuitas, persamaan energi, dan persamaan momentum) dengan menggunakan metode beda hingga (*finite differences methode*) atau metode elemen hingga (*finite element methode*). Model matematis diselesaikan dengan menggunakan bantuan komputer.

Dalam perencanaan pekerjaan rekayasa pantai, banyak persoalan dan permasalahan yang tidak dapat dipecahkan dengan rumus-rumus yang ada, hal ini mengingat beberapa rumus yang ada diturunkan dari suatu kondisi tertentu yang belum tentu keadaannya sama dengan kondisi yang sebenarnya di lapangan. Dalam

keadaan ini penggunaan model fisik hidraulik untuk menyelesaikan permasalahan sangat tepat dan bermanfaat. Model fisik yang dilakukan di laboratorium akan sangat mendukung penyelesaian masalah-masalah yang ada dalam bidang teknik pantai. Karena kekompleksan dan banyaknya faktor yang berpengaruh pada masalah-masalah pantai, sering studi analitis dan matematis tidak bisa menjawab dengan tuntas masalah-masalah yang ada di daerah studi. Dengan membuat model fisik, yang merupakan bentuk miniatur dari prototip, masalah yang ada di daerah studi dapat digambarkan dalam bentuk yang lebih kecil di laboratorium. Contoh dari studi model fisik adalah penjalaran gelombang di kolam pelabuhan, model erosi dan sedimentasi di daerah pantai, model stabilitas pemecah gelombang terhadap serangan gelombang, dan sebagainya.

Masalah yang tidak dapat diselesaikan secara analitis berarti harus diselidiki dengan mengumpulkan data di lapangan. Studi di lapangan dilakukan, misalnya, untuk menurunkan suatu rumus berdasarkan data lapangan; misalnya pembangkitan gelombang oleh angin, transpor sedimen tegak lurus dan sejajar pantai, pengaruh bangunan pantai terhadap proses pembentukan pantai, dan sebagainya. Studi ini dilakukan dengan melakukan pengukuran di beberapa tempat dalam periode yang panjang.

Pemilihan model fisik hidraulik (*hydraulic scale model, physical modelling*) dilakukan apabila fenomena fisik dari permasalahan yang ada di prototipe dapat dibuat dengan skala yang lebih kecil dengan kesebangunan (*similaritas*) yang cukup memadai.

Untuk beberapa kasus, model fisik juga membutuhkan model matematik yang diperlukan sebagai masukan (input) dalam menggerakkan (*excitation move*) suatu alat. Seperti misalnya alat pembangkit gelombang (*wave generator*) memerlukan program matematik untuk mengatur gerak piston, agar gelombang yang dibangkitkan sesuai dengan yang diharapkan. Selain itu, model matematis dapat dilakukan sebelum model fisik dibuat untuk menyelesaikan permasalahan secara teoritis.

Dalrymple (1985) menyatakan bahwa studi lapangan dapat menyediakan data yang akurat tetapi biasanya mahal dan banyak mengandung variabel alami yang dapat menyebabkan kesulitan dalam interpretasi data. Sebaliknya dalam model fisik, biaya yang dikeluarkan lebih kecil, mudah untuk dipelajari, dan lebih sedikit variabel yang ada, tentunya dengan mengasumsikan beberapa hal. Kamphuis (1991) menyatakan bahwa pembuatan model fisik akan memerlukan banyak sekali kalibrasi dalam verifikasi data.

2.2 Jenis Pemodelan Fisik

Menurut karakter fisiknya, model fisik yang digunakan untuk mempelajari proses-proses yang terjadi di daerah pantai dibagi menjadi dua macam, yaitu :

1. Model Dasar Tetap (*fixed - bed models*)

Model dasar tetap mempunyai batas yang solid dan tidak dapat dimodifikasi oleh proses hidrodinamis model secara terus menerus. Model dasar tetap digunakan untuk mempelajari gelombang, arus atau fenomena hidrodinamis sejenis yang lain di dalam lingkungan yang terkontrol. Model jenis ini juga digunakan untuk mempelajari interaksi antara gaya hidrodinamis

dengan struktur-struktur pantai atau lepas pantai, seperti tiang pancang, breakwaters, kolam pelabuhan dan lain sebagainya. Efek-efek skala yang berkaitan dengan model dasar tetap dapat ditoleransi dan lebih memberikan hasil yang meyakinkan. Contoh penggunaan model dasar tetap untuk dua dimensi termasuk penggunaan wave basin untuk mempelajari penyebaran dan transformasi gelombang, pembangkitan arus oleh angin dalam wave flume, pengujian stabilitas breakwater, interaksi gelombang atau arus, pengukuran gaya gelombang pada struktur dan pengkajian kinematika fluida.

Model tiga dimensi dari model dasar tetap lebih melibatkan pada masalah-masalah mengenai penetrasi gelombang pada pelabuhan, respon pelabuhan terhadap gelombang pendek, transformasi gelombang irregular, interaksi gelombang-arus yang tidak sejajar dan stabilitas struktur pantai yang kompleks.

2. **Model Dasar Bergerak** (*movable – bed models*)

Sesuai namanya mempunyai komposisi material lantai yang dapat bereaksi (respon) terhadap gaya hidrodinamis yang bekerja. Efek skala pada model ini digunakan untuk mempelajari permasalahan sedimentasi, yang mana akan lebih sulit diamati dibandingkan dengan menggunakan model dasar tetap. Sebagai konsekuensinya hasil dari model ini harus diteliti ulang dengan cermat. Contoh penggunaan model dasar bergerak untuk dua dimensi meliputi kajian masalah evolusi profil pantai, erosi bukit pasir (dune), penggerusan pada dasar struktur pantai, respon material pantai terhadap badai dan translasi dasar karena arus tak searah.

Model tiga dimensi untuk dasar bergerak lebih jarang digunakan karena tingginya biaya yang dikeluarkan untuk menjalankan percobaan jenis ini, misalkan pada penelitian erosi pasir selama proses pengeboran minyak, lithoral drift karena gelombang tidak sejajar, formasi dari hamburan pasir, formasi ripple tiga dimensi serta lubang penggerusan pada struktur lepas pantai.

Model dasar tetap dan model dasar bergerak dapat digunakan bergantian pada beberapa kasus jika menggunakan penjejak sedimen material pada model lantai diam sebagai indikator kualitatif dari erosi sedimen dan pendangkalan area.

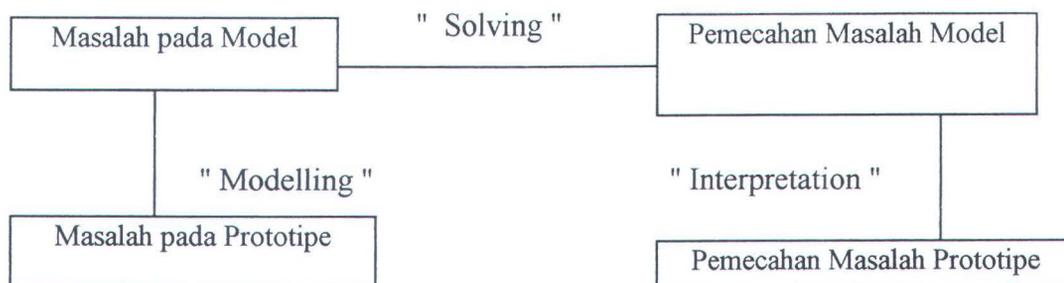
Karakteristik pemodelan lain yang dapat menggunakan model dasar tetap maupun dasar bergerak yaitu apakah model tersebut “short-term” atau “long-term”. Model short-term mempelajari dan menyelidiki respon dari sistem fisik yang berdurasi pendek dan intensitas kejadian yang tinggi (hitungan jam sampai hari), misalnya fenomena badai. Sedangkan model long-term menentukan perubahan sistem yang terjadi pada periode waktu yang panjang (hitungan hari sampai tahun). Jadi model fisik short-term lebih praktis untuk dipakai dalam percobaan penelitian.

2.3 Prinsip Modelisasi

Dalam modelisasi terdapat tiga kegiatan yang saling terkait, yaitu :

1. Modelling : proses pembuatan model
2. Solving : proses pemecahan masalah
3. Interpretation : menjabarkan hasil penelitian dari model ke prototip

Penggunaan model untuk keperluan pengujian pada kenyataannya menggunakan cara melingkar .



Gambar 2.1 Bagan penyelesaian masalah lewat modelisasi

Agar penelitian penggunaan uji model tersebut dapat memberikan hasil yang baik maka ketiga kegiatan tersebut harus memenuhi kaidah-kaidah yang benar, artinya harus memenuhi persyaratan-persyaratan tertentu.

" *Modelling* " adalah proses peniruan masalah yang ada di prototipe dengan skala yang lebih kecil dan dilakukan dengan cara yang benar. Untuk melakukan modelisasi , harus dicermati penentuan fenomena-fenomena yang terdapat dalam permasalahan, dengan demikian model yang dihasilkan akan merupakan model yang bermanfaat dan hasil-hasil yang didapatkan dari penelitian model dapat diinterpretasikan lagi ke prototipe dengan baik.

" *Solving* " adalah usaha penyelesaian masalah yang ada pada model, jadi penyelesaian ini sesungguhnya hanya berlaku di model tersebut. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, teknik analisa dan pemahaman masalah serta pemecahan masalah yang baik sangat diperlukan, karena model itu sendiri tidak menyelesaikan permasalahan.

" *Interpretation* " adalah suatu usaha untuk memindah cara penyelesaian masalah yang ada di model untuk keperluan pemecahan masalah yang berlaku di prototipe. Proses interpretasi ini dilakukan dengan mengingat bagaimana cara membawa permasalahan tersebut ke model ("modelling").

Agar pada proses pembuatan model tersebut terdapat keseksamaan yang tinggi maka perlu adanya dua tahap pengecekan model yaitu kalibrasi dan verifikasi.

Kalibrasi adalah pengaturan model agar supaya data-data yang ada di prototipe sesuai dengan yang ada pada model. Setelah model memenuhi syarat kalibrasi lalu dilakukan pengecekan tahap kedua yang disebut verifikasi.

Verifikasi adalah pembuktian bahwa model sudah sesuai dengan yang ada di prototipe tanpa merubah atau mengatur model lagi. Untuk keperluan verifikasi dibutuhkan data seperti yang dipergunakan pada kalibrasi, tetapi pada kondisi yang lain dapat dimasukkan koefisien yang berkesesuaian.

Kalibrasi dan verifikasi suatu model merupakan suatu keharusan, namun pada kasus-kasus tertentu kalibrasi dan verifikasi tidak dapat dilakukan mengingat benda-benda yang ada di prototipe belum ada atau belum dibuat.

2.4 Prinsip Penskalaan

Dasar-dasar penskalaan model adalah membentuk kembali masalah atau problema yang ada di prototipe dalam skala yang lebih kecil (model), sehingga fenomena yang ada di model tersebut sebangun dengan yang ada di prototipe.

Kesebangunannya meliputi beberapa aspek, yaitu :

1. Sebangun Geometrik

2. Sebangun Kinematik

3. Sebangun Dinamik

Hubungan antara model dan prototipe diturunkan dengan skala, untuk masing-masing parameter mempunyai skala tersendiri dan besarnya tidak sama. Skala dapat didefinisikan sebagai rasio antara nilai parameter yang ada di prototipe dengan nilai parameter yang terdapat pada model.

2.4.1 Sebangun Geometrik

Kesebangunan geometrik dipenuhi apabila model dan prototipe mempunyai bentuk yang sama tetapi mempunyai ukuran yang berbeda. Hal ini berarti bahwa perbandingan antara semua ukuran geometrik adalah sama.

Dua kesebangunan geometrik yaitu :

- Sebangun geometrik sempurna (undistorted)
- Sebangun geometrik terdistorsi (distorted)

Pada undistorted model skala panjang dan lebar (horisontal) serta skala tinggi (vertikal) adalah sama. Untuk distorted model, skala ke arah horisontal dan ke arah vertikal tidak sama. Apabila dimungkinkan model dibuat tanpa distorsi, sedangkan pada permasalahan khusus model dapat dilakukan dengan distorsi namun harus memenuhi persyaratan tertentu.

Skala panjang diberi notasi N_L dan skala tinggi diberi notasi N_H ,

$$N_L = \frac{L_P}{L_M} = \frac{\text{panjang pada prototipe}}{\text{panjang pada model}} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$N_H = \frac{H_P}{H_M} = \frac{\text{tinggi pada prototipe}}{\text{tinggi pada model}} \dots\dots\dots (2.2)$$

Pada undistorted model dapat ditentukan :

$$1. \text{ skala luas} \quad : N_A = \frac{A_P}{A_M} = \frac{(\text{panjang} \times \text{lebar})_P}{(\text{panjang} \times \text{lebar})_M} = (N_L)^2 \dots\dots\dots (2.3)$$

$$2. \text{ skala volume} \quad : N_V = \frac{V_P}{V_M} = (N_L)^3 \dots\dots\dots (2.4)$$

Untuk distorted model ditentukan sebagai berikut :

1. a. skala luas posisi horisontal,

$$N_A = \frac{A_P}{A_M} = \frac{(\text{panjang} \times \text{lebar})_P}{(\text{panjang} \times \text{lebar})_M} = (N_L)^2 \dots\dots\dots (2.5)$$

b. skala luas posisi vertikal,

$$N_A = \frac{A_P}{A_M} = \frac{(\text{panjang} \times \text{tinggi})_P}{(\text{panjang} \times \text{tinggi})_M} = N_L \times N_H \dots\dots\dots (2.6)$$

2. skala volume :

$$N_V = \frac{V_P}{V_M} = (N_L)^2 \times N_H \dots\dots\dots (2.7)$$

2.4.2 Sebangun Kinematik

Sebangun kinematik terjadi antara prototipe dan model jika prototipe dan model sebangun geometri dan perbandingan kecepatan dan percepatan di dua titik yang bersangkutan pada prototipe dan model pada arah yang sama adalah sama besar (Hudson, 1979). Untuk model tak terdistorsi, pada seluruh arah, kecepatan dan percepatan mempunyai perbandingan yang sama,

sedangkan pada model terdistorsi perbandingan yang sama hanya berlaku pada arah tertentu saja, yaitu pada arah vertikal atau pada arah horisontal. Dengan demikian pada permasalahan yang menyangkut aliran tiga dimensi hanya dapat diterapkan untuk undistorted model.

Skala kecepatan biasanya diberi notasi N_u , skala percepatan N_a , dan skala debit adalah N_Q .

$$N_u = \frac{U_p}{U_m} = \frac{N_L}{N_T} \text{ atau } \frac{N_h}{N_T} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$N_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{N_L}{N_T^2} \text{ atau } \frac{N_h}{N_T^2} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$N_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{N_L^3}{N_T} \text{ atau } \frac{N_h^2 N_h}{N_T} \dots\dots\dots (2.10)$$

2.4.3 Sebangun Dinamik

Jika prototipe dan model sebangun geometrik dan kinematik, serta perbandingan gaya-gaya yang bersangkutan pada model dan prototipe untuk seluruh aliran pada arah yang sama adalah sama besar, maka dapat dikatakan bahwa keduanya sebangun dinamik (Warnock, 1950). Gaya-gaya tersebut meliputi gaya inersia, gaya tekanan, gaya berat, gaya gesek (viskositas), gaya kenyal dan gaya tegangan permukaan.

- Gaya Inersia

$$F_i = \rho L^2 v^2 \dots\dots\dots (2.11)$$

- Gaya Berat

$$F_g = \rho L^3 g \dots\dots\dots (2.12)$$

- Gaya Gesek

$$F_{\mu} = \mu v L \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

- Gaya Tegangan Permukaan

$$F_{\sigma} = \sigma L \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

- Gaya Kenyal

$$F_e = E L^2 \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

- Gaya Tekanan

$$F_{pr} = p L^2 \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

dimana,

ρ : densitas fluida

L : panjang

v : kecepatan

g : percepatan gravitasi

μ : viskositas dinamik

σ : tegangan permukaan

E : modulus elastisitas

P : tekanan (pressure)

Kesebangunan dinamik dapat diekspresikan sebagai perbandingan gaya – gaya tersebut di atas sebagai bilangan tak berdimensi dan dinyatakan dalam kriteria-kriteria sebagai berikut :

$$1. \text{ Froude Number } \left(\frac{v}{\sqrt{gL}} \right)_p = \left(\frac{v}{\sqrt{gL}} \right)_m$$

$$2. \text{ Reynolds Number } \left(\frac{\rho v L}{\mu} \right)_p = \left(\frac{\rho v L}{\mu} \right)_m$$

$$3. \text{ Euler Number } \left(\frac{p}{\rho v^2} \right)_p = \left(\frac{p}{\rho v^2} \right)_m$$

$$4. \text{ Weber Number } \left(\frac{\rho v^2 L}{\sigma} \right)_p = \left(\frac{\rho v^2 L}{\sigma} \right)_m$$

$$5. \text{ Cauchy Number } \left(\frac{\rho v^2}{E} \right)_p = \left(\frac{\rho v^2}{E} \right)_m$$

2.5 Model Hidraulik Terdistorsi

Dalam pemodelan hidraulik, apabila satu atau lebih dari kriteria kesebangunan yang tak terpenuhi maka model tersebut dikatakan sebagai model terdistorsi. Pada pemodelan hidraulik tak terdistorsi, besaran phi yang tak berdimensi dari variabel-variabel penting yang independen pada model harus sama dengan yang ada di prototip. Untuk masalah aliran fluida dalam teknik pantai, kesebangunan pada seluruh besaran phi yang tak berdimensi adalah tidak mungkin. Meskipun hanya mempertimbangkan kriteria Froude dan Reynold karena pemodelan hidraulik dibuat pada skala yang diperkecil, kemungkinan akan cenderung tidak memenuhi kriteria kedua kesebangunan secara simultan. Sehingga ditekankan bahwa semua model hidraulik pantai adalah model terdistorsi.

Para ahli model hidraulik telah memilih untuk mendefinisikan model terdistorsi dengan membatasi kata distorsi pada pertimbangan kesebangunan geometrik. Pemodelan yang dapat mempertahankan kesebangunan geometriknya disebut sebagai model tidak terdistorsi. Sedangkan model terdistorsi adalah

pemodelan fisik dengan skala horisontal dan skala vertikal yang berbeda. Dengan kata lain, suatu model yang terdistorsi tidak mempunyai kesebangunan geometrik yang sama dengan yang ada pada prototip.

Dalam (rekayasa) teknik pantai, model terdistorsi umumnya memiliki skala horisontal lebih besar daripada skala vertikal. Hal ini mengakibatkan berkurangnya kebutuhan akan ruang horisontal untuk pemodelan dengan menambah kemiringan (slope) pada model.

Munson, et al. (1990) menyatakan bahwa keberhasilan penggunaan model terdistorsi sangat tergantung pada keahlian dan pengalaman dari ahli pemodelan serta interpretasi terhadap hasil yang didapat dari pemodelan terdistorsi.

2.6 Keuntungan Model Fisik

Model fisik dibuat dan dioperasikan pada skala yang lebih kecil sebagai alternatif untuk menguji fenomena-fenomena pantai yang dihasilkan dalam perhitungan analitis. Dalrymple (1985) menyatakan ada dua keuntungan yang didapat dengan menggunakan model fisik :

1. Dalam pemodelan fisik, persamaan yang digunakan tanpa penyederhanaan asumsi yang biasanya digunakan untuk model analitis atau model numerik.
2. Adanya model dalam skala kecil akan mempermudah pencatatan data dan pengurangan biaya. Bila dibandingkan dengan pengumpulan data lapangan tentu lebih sulit dan lebih mahal dan juga pengukuran data lapangan yang simultan sulit dicapai.

Selanjutnya dapat disebutkan lagi keuntungan lain dari pemodelan fisik yaitu kebebasan dalam melakukan percobaan yang memungkinkan dibuat simulasi keadaan yang ada di alam yang sangat bervariasi. Dari keadaan yang jarang terjadi sampai yang sering terjadi dapat disimulasikan dengan baik. Keuntungan berikutnya adalah kemudahan untuk mendapatkan gambaran visual dari model yang dibuat.

Le Mehaute (1990) memberikan enam alasan mengapa digunakan model fisik untuk mempelajari dan menyelesaikan masalah-masalah yang berkaitan dengan rekayasa teknik pantai :

1. Teknologi skala model berkaitan dengan efektifitas penggunaan model. Hal ini berkaitan dengan dimensi pantai dan hal detail yang berkaitan dengan aktifitas lepas pantai. Model fisik dapat menambah keandalan dan kredibilitas para pembuat keputusan dalam menentukan hal yang sulit untuk dicapai dengan observasi lapangan.
2. Teknik-teknik percobaan laboratorium selalu merupakan salah satu alat yang bermanfaat di dalam bidang rekayasa teknik pantai, karena aliran fluida yang turbulen sehingga secara sistematis sulit untuk menentukan batasan yang diperlukan.
3. Teknik-teknik baru yang ada sekarang ini memungkinkan untuk menentukan hubungan fisik aliran fluida selain hal-hal yang telah diketahui sebelumnya. Kemajuan teknik pemrosesan data juga turut mempermudah untuk mengolah data dalam jumlah banyak sehingga pengolahan data dengan variabel yang lebih kompleks dapat dilakukan.

4. Ketepatan model matematis ditentukan oleh ketepatan penggunaan fungsi-fungsi matematis dalam pemodelan. Dalam model matematis ada beberapa penyederhanaan yang digunakan, sedangkan dalam model fisik memberikan kesempatan untuk mengamati dan mengukur hal-hal fisik dalam kondisi yang terkendali.
5. Model skala bersifat seperti komputer analog, dimana model skala dapat merupakan replika kondisi batas yang kompleks dalam langkah penyelesaian permasalahan beda hingga dan efek-efek non linier, sehingga kesulitan utama dalam pemodelan matematis juga dapat dimodelkan mendekati hal yang sebenarnya.
6. Efek-efek fisis antara elemen fluida juga merupakan hal yang sangat berpengaruh untuk penelitian mengenai karakter fluida. Dengan model fisik hal tersebut dapat divisualisasikan dan dapat dijamin keakuratannya. Hasil dari visualisasi tersebut mungkin saja merupakan hal yang tidak dapat dihasilkan secara teoritis atau dengan perhitungan komputer.

Penggunaan model fisik dalam skala kecil sampai saat ini tetap merupakan metode terbaik untuk meneliti dan memverifikasi penyelesaian-penyelesaian dalam bidang rekayasa pantai.

2.7 Kerugian Model Fisik

Meskipun ada beberapa keuntungan dalam penggunaan model fisik dalam bidang rekayasa, khususnya bidang teknik pantai tetapi kita juga harus

memperhatikan bahwa dalam percobaan laboratorium atau pemodelan fisik terdapat beberapa kerugian yang mungkin terjadi, antara lain :

1. Efek Skala

Skala model yang tentunya lebih kecil dari keadaan sebenarnya, tentu tidak mensimulasikan semua variabel yang relevan dalam hubungan yang tepat antara satu dengan yang lainnya. Le Mehaute (1990) menyatakan bahwa kesalahan karena efek skala yang terjadi pada para rekayasawan yang sedang melaksanakan percobaan model fisik sama artinya dengan kesalahan yang terjadi karena penyederhanaan asumsi para ahli teori. Efek skala yang paling sering terjadi pada rekayasa model hidraulik adalah gaya viscous.

2. Efek Laboratorium

Efek ini dapat berpengaruh pada proses simulasi secara keseluruhan, dimana pendekatan yang lain tidak dapat dilakukan. Beberapa efek laboratorium timbul karena ketidakmampuan untuk menciptakan kondisi beban yang realistis dan model kondisi batas selama simulasi. Efek laboratorium yang lazim terjadi ketika gelombang acak dibangkitkan pada model untuk memperkirakan gelombang yang terjadi di alam. Kalau hal tersebut terjadi, maka kita harus dapat menentukan apakah hal tersebut merupakan pendekatan yang masuk akal atau tidak.

3. Kadang kala semua fungsi beban dan kondisi batas alamiah yang terjadi tidak dimasukkan dalam pemodelan fisik, jadi fungsi dan kondisi batas harus disertakan pada evaluasi hasil akhir model. Sebagai contoh gaya

gesek akibat angin diperhitungkan pada permukaan bebas di prototipe, hal tersebut mungkin ditiadakan pada pemodelan yang hanya menggunakan pembangkit gelombang mekanis.

4. Meskipun sedikit berpegaruh, model fisik lebih mahal untuk dilakukan daripada model numerik. Dalam suatu kondisi dimana model numerik menghasilkan hasil yang lebih dapat diandalkan menurut perhitungan rekayasa, sehingga model numerik lebih tepat digunakan. Dalam kenyataan, meskipun efek laboratorium dan efek skala sering dihadapi, merupakan suatu hal yang mungkin untuk menguji model dengan variasi kondisi masukan yang berbeda-beda, dan kemudian didapat hasil interpretasi model yang lebih baik (Kamphuis, 1991).

2.8 Pembangkitan Gelombang

Dalam lingkup pengetahuan yang terbatas, secara praktis semua laboratorium pembangkit gelombang menggunakan asumsi gelombang amplitudo kecil (*small - amplitude wave*) yang sangat membantu dalam penurunan teori pembangkit gelombang orde 1 (*first - order wavemaker*). Hasil ini tidak diharapkan dalam gelombang non linier yang diberikan saat penguatan gelombang terjadi di samping kejadian natural non linier lainnya. Meskipun demikian teori pembangkit gelombang orde 1 telah merupakan suatu sarana yang digunakan untuk penelitian di laboratorium dalam beberapa kasus akibat tumbukan secara kumulatif dari gelombang non linier yang tidak dikenal, sedikit sekali pertimbangan yang berkaitan dengan efek-efek lain dari laboratorium seperti skala yang akan mempengaruhi hasil



percobaan. Ada banyak cara untuk memperoleh gelombang yang tepat sesuai dengan teori gelombang matematika orde tinggi, selain validitas teori-teori analitis terhadap perkembangan yang berkaitan dengan teori-teori dan fenomena-fenomena yang lebih kompleks, misalnya permasalahan transport sedimen.

Seiring dengan berkurangnya kedalaman air dan bertambahnya panjang gelombang, maka teori stoke orde 2 menjadi kurang layak digunakan untuk menjelaskan gelombang bentuk tetap oleh karena itu dalam perkembangan selanjutnya dikenal teori gelombang cnoidal dan solitary.

Raichlen (1970) menerangkan pembangkitan gelombang solitary dalam studi gelombang tsunami yang dibangkitkan oleh gerakan impulsif dasar laut. Fasilitas gelombang 2-D dilengkapi dengan piston yang ditempatkan secara vertikal ke atas dari dasar wave tank. Hammack dan Segur (1974) menunjukkan secara teoritis dan eksperimental bahwa gelombang solitary dapat dibangkitkan dengan beberapa batas pergerakan yang dihasilkan oleh displacemen positif bersih dari volume air. Sebagai gelombang yang dihasilkan oleh gangguan perambatan dari arah sumber, sedikitnya satu gelombang solitary dan berikutnya diikuti bentuk penjalaran dari gelombang solitary. Gelombang solitary bergerak dengan kecepatan lebih cepat dari kenyataan terakhir jejak gelombang di wave tank.

Metode ini dapat digunakan untuk membangkitkan gelombang solitary dalam laboratorium wave flume yang menghendaki panjang tangki yang cukup untuk gelombang solitary yang timbul. Keberadaan rambatan jejak gelombang solitary tidak akan mengganggu selama percobaan.

$$Sh = \frac{H}{k} \text{ atau } \frac{H}{S} = kh \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

persamaan tersebut di atas adalah untuk jenis piston, sedangkan untuk jenis flap (engsel) adalah :

$$\frac{H}{S} = \frac{kh}{2} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

dimana H adalah tinggi gelombang yang dibangkitkan, S adalah stroke (jarak gerakan) papan pembangkit gelombang, k adalah angka gelombang dan h adalah kedalaman perairan.

2.8.2 Persamaan Umum Wavemaker

Goring (1979) melakukan penelitian tentang propagasi gelombang tsunami melintasi lempengan plat dan menggunakan gelombang cnoidal dan solitary untuk penyajian secara teoritis dan secara eksperimental di laboratorium. Pembangkitan gelombang solitary dengan displacement positif dari volume air tidak mencukupi karena jejak gelombang solitary akan bercampur dengan pengukuran gelombang solitary yang direfleksikan. Wavemaker jenis piston diperlukan untuk membangkitkan gelombang tanpa meninggalkan jejak sisa gelombang. Selanjutnya perkembangan teori wavemaker ini dapat digunakan untuk menghasilkan profil gelombang solitary dan cnoidal yang dapat diterima.

Dasar dari teori wavemaker untuk perairan dangkal adalah menggabungkan kecepatan papan pembangkit gelombang dan kecepatan partikel air dari gelombang yang diinginkan sebagai gerakan papan

Pertimbangan kontinuitas menunjukkan bahwa kecepatan kedalaman rata-rata untuk gelombang perairan dangkal bentuk tetap dapat dituliskan (Svendsen, 1974)

$$\bar{u}(X_o,t) = \frac{C\eta(x,t)}{h + \eta(x,t)} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

dimana C adalah celerity gelombang, h kedalaman perairan tenang dan $\eta(x,t)$ adalah elevasi permukaan perairan.

Substitusi dengan persamaan (2.21) akan memberikan :

$$\frac{dX_o(t)}{dt} = \frac{C\eta(X_o,t)}{h + \eta(X_o,t)} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

dimana $\eta(X_o,t)$ adalah elevasi permukaan air pada posisi papan gelombang bergerak. Goring dan Raichlen (1980) mengasumsikan bahwa $\eta(X_o,t)$ dapat disajikan sebagai tinggi gelombang dikalikan dengan beberapa fungsi dari sudut fase berikut :

$$\eta(X_o,t) = Hf(\theta) \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

dengan sudut fase diberikan sebagai

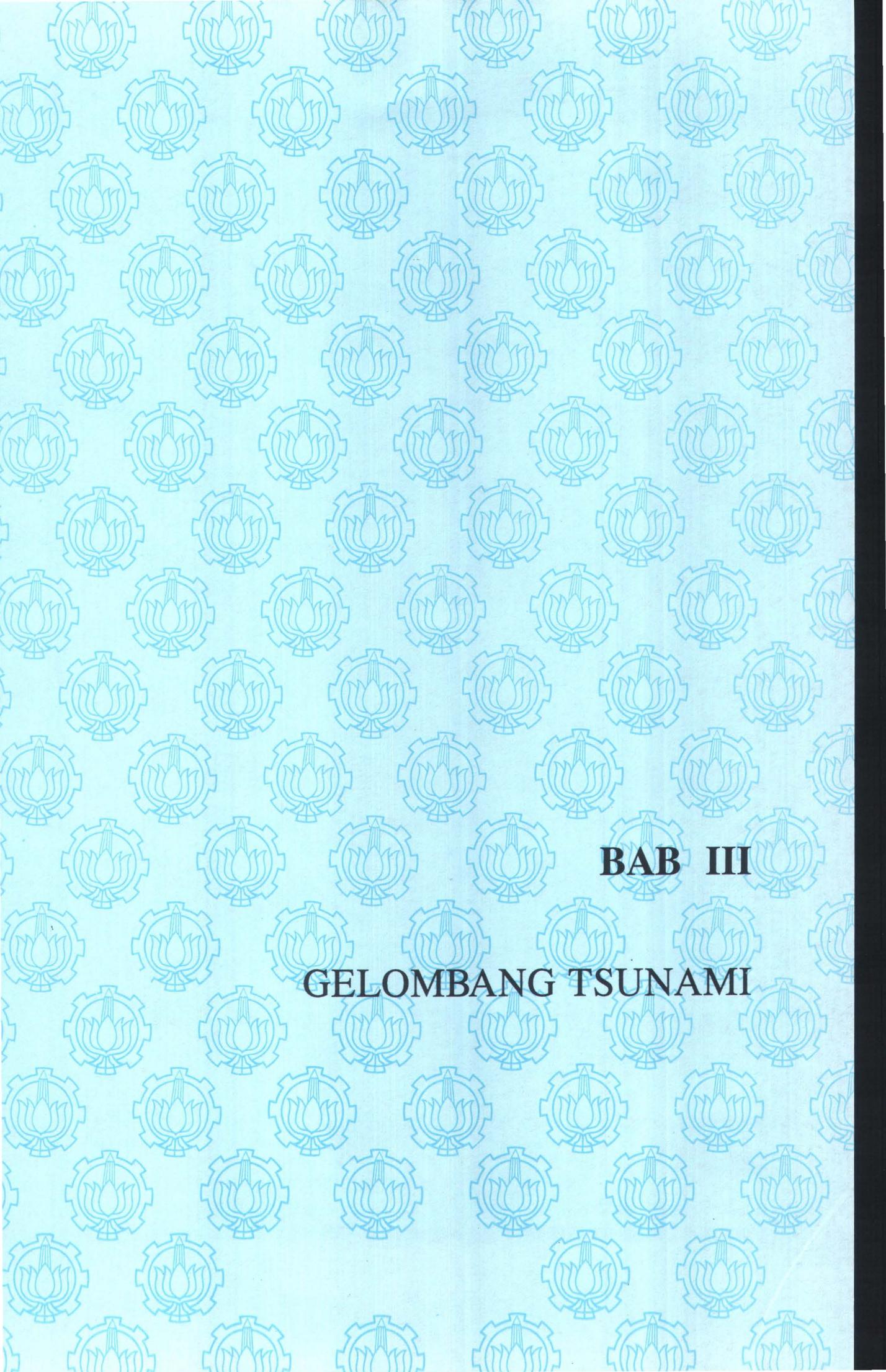
$$\theta = k(Ct - X_o) \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

Substitusi dari persamaan (2.24) ke dalam persamaan (2.23) akan menghasilkan

$$\frac{dX_o(t)}{dt} = \frac{CHf(\theta)}{h + Hf(\theta)} \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

dengan memperhatikan persamaan (2.25)

$$\frac{d\theta}{dt} = k \left(C - \frac{dX_o}{dt} \right) \quad \dots\dots\dots (2.27)$$



BAB III

GELOMBANG TSUNAMI

B A B III

GELOMBANG TSUNAMI

3.1 Pengertian Gelombang Tsunami

Istilah tsunami berasal dari bahasa Jepang, dimana kata Tsu berarti pelabuhan dan kata Nami berarti gelombang besar atau gelombang panjang sehingga tsunami berarti gelombang besar yang terjadi di pelabuhan.

Tsunami adalah gelombang yang terjadi karena gempa tipe thrust di bawah permukaan laut, longsoran, tabrakan meteor, atau letusan gunung berapi di laut. Tinggi gelombang yang terjadi bervariasi dari 0,5 sampai 30 meter dengan periode dari beberapa menit sampai sekitar satu jam. Berbeda dengan gelombang (yang disebabkan oleh angin) yang hanya menggerakkan air laut bagian atas, pada tsunami seluruh kolom air dari permukaan sampai dasar laut bergerak dalam segala arah. Cepat rambat gelombang tsunami tergantung pada kedalaman laut. Semakin besar kedalaman semakin besar kecepatan rambatnya. Pada kedalaman 5000 meter cepat rambat tsunami mencapai 230 m/d (sekitar 830 km/jam), pada kedalaman 4000 meter sebesar 200 m/d dan pada kedalaman 40 meter cepat rambatnya 20 m/d. Di lokasi pembentukan (daerah episentrum gempa), tinggi gelombang tsunami diperkirakan antara 1 – 2 meter. Selama perjalanan dari tengah laut (pusat terbentuknya tsunami) menuju pantai, tinggi gelombang menjadi semakin besar karena pengaruh perubahan kedalaman laut. Setelah sampai di pantai, gelombang naik (run up) ke daratan dengan kecepatan tinggi yang bisa menghancurkan kehidupan di daerah pantai. Kembalinya air ke laut setelah mencapai puncak gelombang (run down) bisa menyeret segala sesuatu kembali ke laut. Gelombang tsunami dapat

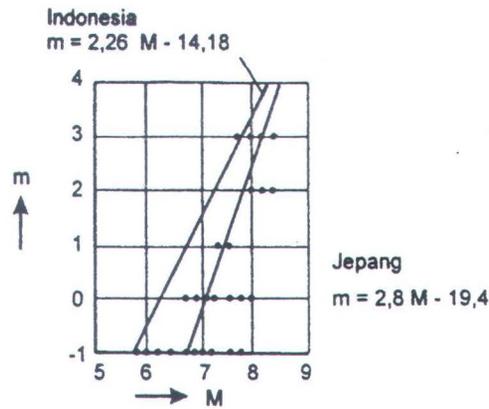
menimbulkan bencana di daerah yang sangat jauh dari pusat terbentuknya. Sebagai contoh, gelombang tsunami yang disebabkan oleh letusan gunung Krakatau di Selat Sunda pada tahun 1883, pengaruhnya menjalar sampai ke pantai timur Afrika. Bencana yang ditimbulkan adalah 36.000 jiwa tewas, terutama di pantai Sumatra dan Jawa yang berbatasan dengan Selat Sunda. Tsunami yang terjadi karena gempa bumi di Flores pada tahun 1992 mengakibatkan lebih dari 2.000 orang meninggal.

Pencatatan gelombang tsunami di Indonesia belum banyak dilakukan. Jepang sebagai negara yang sering mengalami serangan tsunami telah banyak melakukan penelitian dan pencatatan gelombang ini. Telah dikembangkan suatu hubungan antara tinggi gelombang tsunami di daerah pantai dan besaran tsunami m . Besaran tsunami bervariasi mulai dari $m = -2,0$ yang memberikan tinggi gelombang kurang dari 0,3 meter sampai $m = 5$ untuk gelombang lebih besar dari 32 meter seperti diberikan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Hubungan antara besaran gempa dan tinggi tsunami di pantai

m	H (meter)
5,0	>32
4,5	24,0 - 32,0
4,0	16,0 - 24,0
3,5	12,0 - 16,0
3,0	8,0 - 12,0
2,5	6,0 - 8,0
2,0	4,0 - 6,0
1,5	3,0 - 4,0
1,0	2,0 - 3,0
0,5	1,5 - 2,0
0,0	1,0 - 1,5
-0,5	0,75 - 1,0
-1,0	0,5 - 0,75
-1,5	0,3 - 0,5
-2,0	< 0,3





Gambar 3.1 Hubungan antara kekuatan gempa dan besaran tsunami

Kejadian tsunami yang disebabkan oleh gempa bumi di laut tergantung pada beberapa faktor berikut ini:

1. Kedalaman pusat gempa (episentrum) di bawah dasar laut, h (km).
2. Kekuatan gempa M yang dinyatakan dalam skala Richter.
3. Kedalaman air di atas episentrum, d (m).

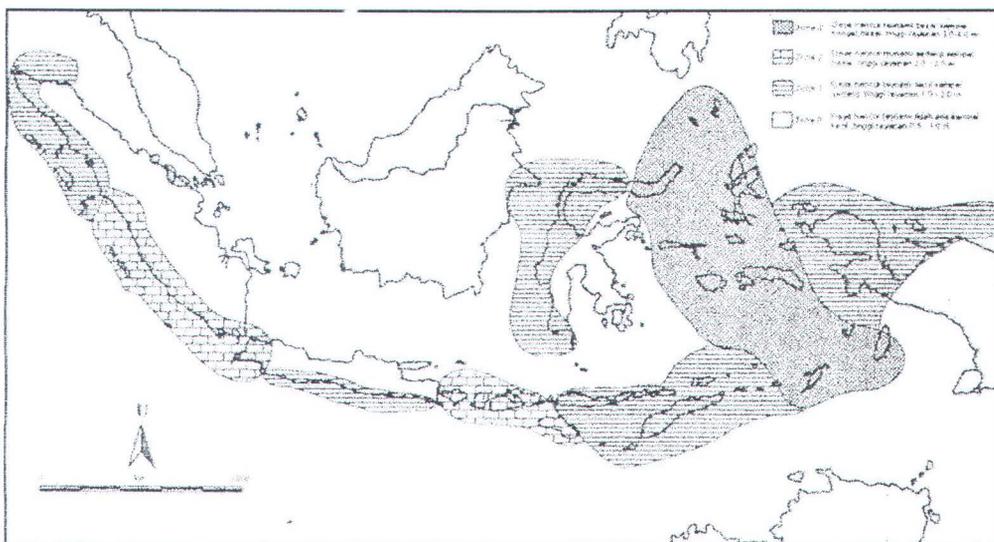
Besaran tsunami (m) berkaitan erat dengan kekuatan gempa M seperti diberikan dalam gambar 3.1. Garis sebelah kanan adalah garis yang dikembangkan di Jepang berdasarkan pencatatan tsunami yang cukup banyak. Sedangkan garis sebelah kiri adalah perkiraan dari hubungan antara kedua parameter untuk tsunami di Indonesia, berdasarkan data yang terbatas. Kedua garis tersebut dapat dinyatakan dalam dua bentuk persamaan untuk tsunami di Jepang dan di Indonesia :

$$\text{Jepang : } m = 2,8 M - 19,4 \dots\dots\dots (3.1)$$

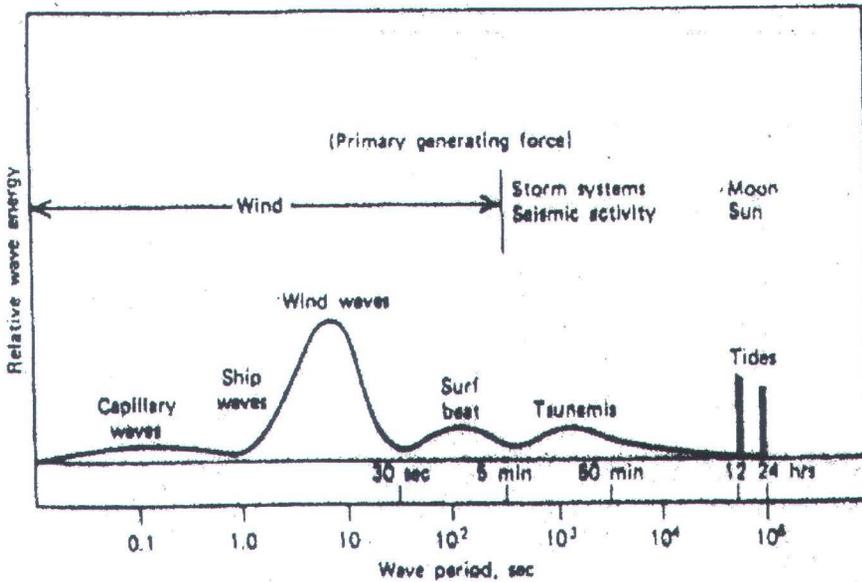
$$\text{Indonesia : } m = 2,26 M - 14,18 \dots\dots\dots (3.2)$$

Najoan, T.F. (1995) membagi kepulauan Indonesia dalam empat daerah (zona) rawan tsunami seperti ditunjukkan dalam gambar 3.3. Terlihat bahwa daerah pantai yang rawan terhadap tsunami (zona 1, 2, dan 3) cukup luas, dengan daya hancur dari kecil sampai sangat besar. Dari pengalaman bencana tsunami di Indonesia, upaya penanggulangan terutama diarahkan untuk menekan jumlah korban jiwa. Beberapa langkah penanggulangan dapat dilakukan sebagai berikut :

1. Daerah sempadan pantai harus cukup lebar dan ditanami dengan tanaman keras.
2. Daerah pemukiman ditempatkan di lokasi yang aman, yang ditetapkan berdasar tinggi gelombang tsunami dan topografi daerah.
3. Dibuat bangunan pelindung tsunami yang berupa tanggul di sepanjang pantai.
4. Fasilitas pelabuhan sebaiknya dipisahkan dari pemukiman, untuk mencegah benda-benda terapung seperti perahu, drum, dan benda lainnya dapat menjadi tenaga penghantam yang merusak bila terjadi tsunami.



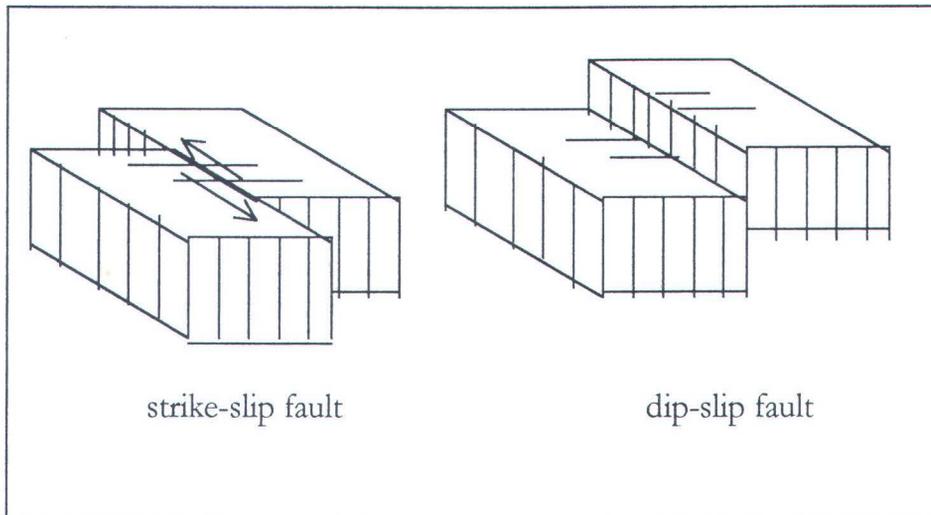
Gambar 3.3 Daerah rawan tsunami di Indonesia



Gambar 3.4 Klasifikasi gelombang menurut gaya pembangkitnya (Munk, 1950)

3.2 Pembangkit Gelombang Tsunami

Tsunami yang menyebabkan naik turunnya muka air laut secara mendadak berkaitan erat dengan aktivitas vulkanik kulit bumi di dasar laut yang terus menerus bergerak dinamis. Sebagian besar tsunami dibangkitkan oleh deformasi vertikal dasar laut yang berasosiasi dengan pensesaran, gempa bumi dan letusan gunung berapi bawah laut. Parameter-parameter sesar seperti panjang dan lebar bidang sesar, energi (magnitudo), kedalaman pusat gempa, slip dan mekanisme fokus (strike, dip dan sudut slip) merupakan parameter utama dari sumber gempa (Mahargono, 1986).



Gambar 3.5 Pergerakan sepanjang garis patahan

Tsunami biasanya terjadi pada gempa-gempa dangkal yang mengakibatkan deformasi kerak bumi yang selanjutnya memberikan pengaruh kuat terhadap perubahan dasar laut. Perubahan-perubahan tersebut dapat berupa struktur sesar naik (thrusting fault) atau sesar normal (normal fault), yaitu dua macam struktur sesar yang menimbulkan tsunami secara signifikan.

Berdasarkan data tsunami di Jepang (Iida, 1970) menunjukkan bahwa gempa yang menimbulkan tsunami kebanyakan berupa gempa yang mempunyai mekanisme fokus dengan komponen dip-slip, dan terbanyak adalah tipe thrust, dengan sebagian kecil tipe normal. Untuk gempa dengan mekanisme fokus tipe strike-slip kecil sekali kemungkinannya untuk menimbulkan tsunami. Hal ini disebabkan sesar normal dan sesar naik mengakibatkan perubahan kerak bumi dalam arah vertikal yang dimanifestasikan oleh komponen dip-slip. Komponen vertikal inilah yang membangkitkan tsunami, hal ini disebabkan pergerakan vertikal lantai samudera

dapat mengakibatkan perubahan massa air di atas lantai samudera yang bergerak tersebut.

3.3 Perambatan Gelombang Tsunami

3.3.1 Gelombang Amplitudo Kecil

Teori gelombang amplitudo kecil untuk gelombang dua dimensi, bebas dan gelombang gravitasi periodik dikembangkan dengan persamaan-persamaan linier yang dibatasi dengan kondisi batas permukaan bebas. Dengan kondisi batas ini dan kondisi batas dasar perairan, kecepatan potensial periodik banyak digunakan karena memenuhi persyaratan aliran irrotational. Kecepatan potensial ini kemudian digunakan untuk menurunkan persamaan karakteristik gelombang lainnya (misalnya: cepat rambat gelombang, kecepatan partikel, percepatan partikel dan tekanan).

Asumsi-asumsi yang digunakan dalam teori gelombang amplitudo kecil adalah :

1. Fluida dianggap homogen, incompressible dan gaya tegangan permukaan diabaikan. Selanjutnya gaya gravitasi dalam dan tekanan gelombang yang mempengaruhi aliran dianggap tidak ada dan permukaan gelombang dapat dianggap lebih besar daripada ukurannya dimana efek kapilaritas sangat penting.
2. Aliran irrotasional, shear stress bidang pertemuan antara udara dan air laut serta dasar laut dianggap tidak ada. Gelombang-gelombang yang disebabkan oleh angin tidak diperhitungkan dan gesekan

dengan lantai dasar samudera atau bidang permukaan solid lainnya dapat diabaikan. Selanjutnya potensial kecepatan ϕ harus ada dan memenuhi persamaan Laplace (persamaan kontinuitas untuk aliran irrotasional).

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

Dasar perairan tidak bergerak, impermeable dan mendatar horisontal. Oleh karena itu dasar perairan tidak menambah atau mengurangi energi dari aliran atau memantulkan energi gelombang. Gelombang-gelombang yang mengalami efek shoaling pada kemiringan dasar perairan dapat ditentukan jika slope kecil.

3. Tekanan sepanjang batas permukaan udara dan air adalah konstan. Tidak ada gaya tekanan angin dan perbedaan tekanan hidrostatik yang disebabkan oleh beda kedalaman diabaikan.
4. Amplitudo gelombang sangat kecil jika dibandingkan panjang gelombangnya dan kedalaman perairan. Karena kecepatan partikel berkaitan dengan amplitudo gelombang dan celerity gelombang (kecepatan phase) berkaitan dengan kedalaman perairan dan panjang gelombang hal ini mengimplikasikan bahwa kecepatan partikel sangat kecil dibandingkan dengan celerity gelombang. Asumsi ini menunjukkan bahwa satu linierisasi dari persamaan batas permukaan bebas dengan derajat yang lebih tinggi dapat digunakan untuk mendapatkan penyelesaian yang mudah.

Asumsi-asumsi ini menunjukkan teori gelombang linier hanya dapat dipakai terbatas pada perairan dangkal dimana kecepatan partikel pada puncak dan lembah gelombang mendekati kecepatan phasanya.

Profil muka air merupakan fungsi dari posisi dan waktu, seperti diekspresikan persamaan dibawah ini (Sorensen, 1991)

$$\eta = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \dots\dots\dots (3.5)$$

atau,

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \dots\dots\dots (3.6)$$

dimana,

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (\text{angka gelombang})$$

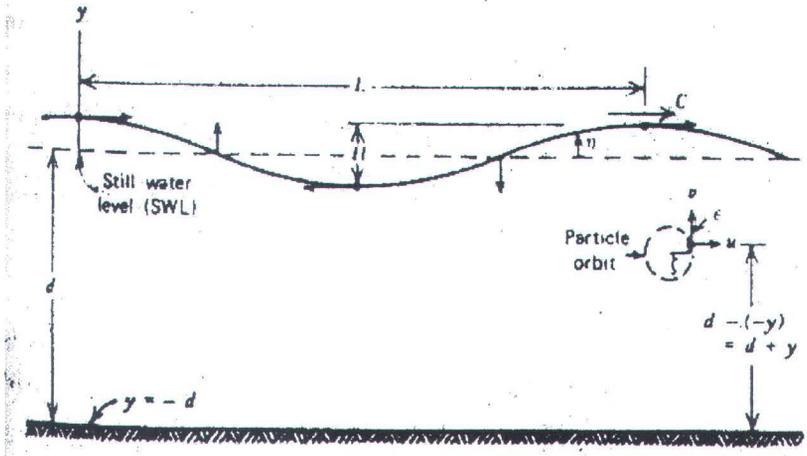
$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{frekwensi angular gelombang})$$

Kecepatan partikel air akan berkurang sesuai dengan bertambahnya kedalaman dan orbitalnya akan berbentuk circular sesuai dengan kondisi batas yang diekspresikan dalam persamaan (3.7) dan pada dasar perairan tidak terdapat normal flow ke arah bawah (vertikal). Kondisi batas tersebut yaitu :

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad \text{pada } y = -d \dots\dots\dots (3.7)$$

Persamaan Bernoulli yang berlaku pada aliran unsteady untuk gerakan fluida irrotasional dapat dituliskan

$$\frac{1}{2} (u^2 + v^2) + gy + \frac{\rho}{\rho} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (3.8)$$



Gambar 3.6 Sketsa sederhana gelombang amplitudo kecil

dimana g adalah percepatan gravitasi, p adalah tekanan dan ρ adalah densitas fluida. Jika persamaan (3.8) dilinierkan dengan menempatkan suku kecepatan menjadi nol dan selanjutnya mengaplikasikan persamaan pada permukaan perairan dimana tekanan sama dengan nol, maka kita akan mendapatkan

$$y = \eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{pada } y = \eta \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

Persamaan (3.9) mengekspresikan kondisi batas permukaan perairan yang mana pendekatannya sama dengan kondisi pada air tenang jika amplitudo gelombang kecil, sebagaimana diperlukan dalam proses linierisasi. Selanjutnya kondisi batas kedua adalah

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{pada } y = 0 \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

Jika potensial kecepataannya berubah terhadap posisi horisontal dan waktu yang bervariasi terhadap kedalaman, dapat diasumsikan sebagai berikut :

$$\Phi = Y \sin(kx - \sigma t) \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

dimana $Y = f(y)$, substitusi persamaan (3.11) ke dalam persamaan Laplace (persamaan 3.4)

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} - k^2 y = 0 \dots\dots\dots (3.12)$$

penyelesaian umum untuk persamaan diferensial parsial ini, sebagaimana yang dijelaskan oleh Kreyszig (1962)

$$Y = Ae^{ky} + Be^{-ky}$$

dimana A dan B adalah konstanta sembarang, dan selanjutnya dari persamaan (3.11)

$$\Phi = (Ae^{ky} + Be^{-ky}) \sin(kx - \sigma) \dots\dots\dots (3.13)$$

yang memenuhi persamaan Laplace, dan akan dibuat agar memenuhi kondisi batas (persamaan 3.7 dan 3.10) untuk mengevaluasi konstanta A dan B

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = k(Ae^{-kd} - Be^{kd}) \sin(kx - \sigma) = 0$$

jika k dan $\sin(kx - \sigma)$ sama dengan nol

$$Ae^{-kd} - Be^{kd} = 0$$

atau,

$$A = \frac{Be^{kd}}{e^{-kd}}$$

dengan beberapa operasi matematis akan didapatkan

$$\Phi = Be^{kd} [e^{k(d+y)} + e^{-k(d+y)}] \sin(kx - \sigma)$$

jika suku dalam bracket sama dengan $2 \cosh k(d+y)$, ekspresi untuk potensial kecepatan dapat dituliskan

$$\Phi = 2Be^{kd} \cosh k(d + y) \sin(kx - \sigma) \dots\dots\dots (3.14)$$

jika,

$$\frac{\sigma}{k} = \frac{L}{T} = C$$

maka,

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}} \dots\dots\dots (3.17)$$

persamaan (3.17) adalah persamaan dasar yang berhubungan dengan celerity gelombang, panjang gelombang dan kedalaman perairan. Celerity gelombang tidak tergantung dari tinggi gelombang hal ini sesuai dengan teori gelombang amplitudo kecil, persamaan (3.17) dapat juga dituliskan

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \dots\dots\dots (3.18)$$

dan,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \dots\dots\dots (3.19)$$

karena gelombang menempuh perjalanan dari laut dalam menuju ke pantai, maka panjang gelombang, cepat rambat gelombang, tinggi gelombang, profil permukaan gelombang dan internal pressure serta daerah kecepatannya berubah meskipun periode gelombang tetap konstan.

3.3.2 Perambatan Jarak Jauh

Ketika tsunami menjalar dengan jarak yang jauh melintasi lautan mengelilingi bumi, harus dipertimbangkan pengaruh tsunami di sepanjang garis pantai. Gelombang yang menyebar di dekat sumbernya akan mengumpul

lagi di titik pada bidang yang berhadapan dengan laut. Sebagai contoh kejadian tsunami tahun 1969 yang mempunyai sumber di garis pantai Chilean, 39,5° S; 74,5° W (Pararas-Carayannis, 1969). Suatu pantai di Jepang yang terletak antara 30° dan 45° N dan kira-kira 135° sampai 140° E , suatu perbedaan yang kita lihat dengan garis bujur dari 145° ke 150° dari daerah sumber. Sebagai hasil konvergen dari aliran gelombang tak terefraksi, pantai di Jepang mengalami kerusakan besar dan banyak yang menjadi korban akibat tsunami tersebut.

Chao (1970) memberikan persamaan refraksi gelombang pada koordinat spherical sebagai berikut :

$$\frac{dx}{ds} = -\frac{1}{C} \left(\frac{dC}{dW} \right) - \frac{\cos \alpha \tan \psi}{R_e} \dots\dots\dots (3.20)$$

Pemisahan aliran diekspresikan oleh persamaan :

$$\frac{d\beta}{ds^2} + p \frac{d\beta}{ds} + q\beta = 0 \dots\dots\dots (3.21)$$

koefisien p dan q didefinisikan sebagai berikut :

$$p = \frac{1}{C} \left(\frac{dC}{ds} \right) - \frac{1}{R_e} \sin \alpha \tan \psi \dots\dots\dots (3.22)$$

$$q = \left(\frac{\sin \alpha}{R_e \cos \psi} \right)^2 \left(\frac{1}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial \phi^2} \right) - \left(\frac{\sin 2\alpha}{R_e^2 \cos \psi} \right)^2 \left(\frac{1}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial \psi \partial \phi} \right) +$$

$$+ \left(\frac{\cos \alpha}{R_e} \right)^2 \left(\frac{1}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial \psi^2} \right) + \left(\frac{2 \cos \alpha \tan \psi}{R_e} \right) \left(\frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial \psi} \right) +$$

$$+ \left(\frac{\cos \alpha \tan \psi}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{\tan \psi \sec \psi}{R_e^2} \right) \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \phi} \right)$$

\dots\dots\dots (3.23)

t = waktu

f_c = parameter coriolis ($=2\Omega \cos\theta$)

Ω = kecepatan rotasional bumi dalam radian per detik

Pada persamaan gelombang panjang linier, komponen percepatan dalam arah radial merupakan pertimbangan yang tidak berarti. Persamaan kontinuitasnya adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{1}{R_e \sin \theta} \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} [(d + \eta)u \sin \theta] + \frac{\partial}{\partial \phi} [(d + \eta)v] \right\} + \frac{\partial \xi}{\partial t} \dots\dots\dots (3.28)$$

dimana ξ merupakan waktu yang tergantung dengan vertikal bottom displacement dalam daerah pembangkitan dan sama dengan nol di tempat lainnya.

Pada displacement dasar yang mendadak, gelombang awal diasumsikan sebagai displacement dari permukaan air yang ekuivalen dengan displacement dasar dan $\partial \xi / \partial t = 0$.

Jika suatu gelombang dibangkitkan dekat garis pantai, yaitu pada perairan yang relatif dangkal, parameter u awalnya menjadi besar. Sedangkan untuk perambatan gelombang yang jauh dari garis pantai, diasumsikan bahwa persamaan gelombang panjang linier bisa digunakan untuk perambatan awal dan kesalahan hasil pengukuran merupakan ukuran yang dapat diterima.

3.3.3 Persamaan Gelombang Panjang

Penyelesaian numerik persamaan gelombang panjang dapat dinyatakan dalam berbagai bentuk persamaan diferensial parsial untuk

meningkatkan keakuratan dalam perhitungan. Seperti yang diberikan oleh Peregrine (1970) berupa persamaan untuk perambatan gelombang 2-D pada kedalaman yang konstan, dan ditulis dalam koordinat rectangular sebagai berikut :



Persamaan linier :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.29)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + d \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.30)$$

Persamaan finite-amplitude :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.31)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [(d + \eta)u]}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.32)$$

Persamaan Boussinesq :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{3} d^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (3.33)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [(d + \eta)u]}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.34)$$

Untuk penjalaran gelombang dalam satu arah, persamaan Boussinesq diturunkan ke dalam persamaan Korteweg-deVries yang selanjutnya dituliskan sebagai berikut :

$$2 \frac{\partial u}{\partial t} + 2\sqrt{gd} \frac{\partial u}{\partial x} + 3u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{3} d^2 \sqrt{gd} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0 \quad \dots\dots\dots (3.35)$$

$$\eta = \sqrt{(d/g)}u + \frac{u^2}{4g} - \frac{d^3}{6\sqrt{gd}} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3.36)$$

Karena tsunami termasuk gelombang panjang, maka dalam penjalaran gelombang periode panjang parameter U didefinisikan sebagai berikut :

$$U = \frac{H}{d} \left(\frac{L}{d} \right)^2 \dots\dots\dots (3.37)$$

Tetapi parameter U biasanya mengambil parameter Stokes atau Ursell. Parameter penting ini pertama kali ditulis oleh Stokes (1847) yang menetapkan bahwa parameter itu harus menjadi kecil jika persamaannya masih valid untuk gelombang-gelombang panjang. Murty (1977) menyatakan bahwa nilai dari $(L/d)^2$ merupakan suatu ukuran dispersi frekwensi, sedangkan harga H/d merupakan ukuran dispersi amplitudo. Murty menunjukkan bahwa persamaan gelombang panjang linier menjadi valid ketika $U \ll 1$, jika H/d kecil maka dispersi amplitudo diabaikan.

Ketika U merupakan orde 1 [$U=O(1)$] maka amplitudo dan frekwensi dispersi adalah penting. Jika demikian maka persamaan Boussinesq atau Korteweg-deVries seharusnya digunakan. Jika $U \gg 1$ maka dispersi amplitudo mendominasi penyelesaian ini dan finite-amplitude persamaan gelombang panjang nonlinier digunakan. Zabusky dan Galvin (1971) menunjukkan bahwa persamaan Korteweg-deVries sesuai untuk menguraikan penjalaran gelombang dengan $U < 800$ dalam beberapa bentuk.

Untuk gelombang tsunami dengan periode panjang, kondisi pada $U \ll 1$ biasanya tidak pernah memenuhi. Bagaimanapun, kesalahan hasil dari

penggunaan persamaan linier sungguh kecil selama harga H/d tetap kecil. Batasan harga H/d ini dapat diterima (dimana kesalahan dalam perhitungan menjadi signifikan) tergantung pada sebagian kecepatan shoaling gelombang, meliputi kemiringan topografi dasar laut menuju pantai.

Dalam penelitian lebih lanjut, parameter U telah didefinisikan ulang sebagai U^* dimana:

$$U^* = \left(\frac{H}{d} \right) \frac{1}{(\eta_x)_{\max}^2} \dots\dots\dots (3.38)$$

dan

$$\eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x} \dots\dots\dots (3.39)$$

Masalah ini dibahas oleh Peregrine (1970) yang menunjukkan bahwa batasan nonlinier yang diabaikan dalam persamaan-persamaan linier menyebabkan kesalahan kumulatif yang cukup besar dalam penyelesaian numerik diberikan oleh persamaan di bawah ini :

$$t = \frac{d^{3/2}}{H\sqrt{g}} \dots\dots\dots (3.40)$$

Oleh karena itu rapid shoaling meliputi gelombang yang lewat di atas kedalaman air dengan perubahan kedalaman yang besar dalam periode waktu yang relatif singkat. Kesalahan yang terakumulasi akan menjadi lebih kecil untuk slow shoaling, dimana gelombang lewat di atas kedalaman air dengan perubahan kedalaman yang sama dalam periode waktu yang relatif lama. Persamaan finite-amplitude valid selama $U^* > 1$ tetapi biasanya menjadi tidak valid setelah terbatasnya waktu pada bagian depan gelombang yang curam.

BAB IV

PEMODELAN RUN UP GELOMBANG TSUNAMI

4.1 Run Up Gelombang

Apabila gelombang bergerak ke arah pantai dengan kemiringan (slope) tertentu dan kemudian membentur dinding pantai tersebut, gelombang akan pecah dan dipantulkan di daerah tersebut. Sebagian dari momentum gelombang tersebut akan diubah menjadi gerakan air yang meluncur ke atas lereng, yang disebut dengan run up (*wave run up*). Tinggi run up dapat didefinisikan sebagai elevasi vertikal maksimum yang dapat dicapai oleh gerakan air tersebut diukur dari muka air tenang (SWL). Run up gelombang tergantung pada bentuk dan kekasaran struktur pantai, kedalaman air pada kaki struktur, kemiringan pada dasar struktur, dan karakteristik gelombang datang. Penjelasan yang lengkap mengenai fenomena run up dalam variabel geometrik dan kondisi gelombang tidak tersedia, karena banyaknya variabel yang ada. Beberapa penelitian di laboratorium mengenai run up telah dilakukan, tetapi sebagian besar untuk run up pada kemiringan yang halus (smooth) dan kedap air atau tidak berporous (impermeable). Hall dan Watts (1953) meneliti run up gelombang Solitary pada kemiringan yang kedap air. Saville (1956) meneliti run up gelombang periodik. Savage (1958) mempelajari pengaruh kekasaran struktur dan permeabilitas pada kemiringan (slope). Keller et al. (1960), Ho dan Meyer (1962), serta Shen dan Meyer (1963) mempelajari pergerakan gelombang yang pecah seutuhnya dan run up gelombang tersebut pada pantai dengan kemiringan tertentu. LeMehaute (1963) dan Freeman dengan LeMehaute (1964) mempelajari run up

4.2.2 Contoh Perhitungan Run Up

Berikut ini akan ditunjukkan beberapa contoh perhitungan run up dengan menggunakan grafik 4.1. Perhitungan ini terdiri dari model yang terdistorsi dan yang tidak terdistorsi sehingga dapat dilihat perbandingannya. Skala yang digunakan dalam perhitungan untuk model terdistorsi adalah skala yang dipakai dalam pemodelan. Sedang skala untuk model tidak terdistorsi diberikan oleh tabel 4.2.

Tabel 4.2 Parameter skala model pengujian untuk model tak terdistorsi

No	Parameter	Simbol	Skala Model
1.	Skala panjang horisontal	N_x	900
2.	Skala panjang vertikal	N_z	900
3.	Skala panjang spesifik	N_L	900
4.	Skala kedalaman air	N_d	900
5.	Skala tinggi gelombang	N_H	900
6.	Skala percepatan	$N_a = \frac{N_g N_z}{N_x}$	1
7.	Skala kecepatan	$N_v = \sqrt{N_g N_z}$	17,321
8.	Skala waktu	$N_t = \frac{N_x}{\sqrt{N_g N_z}}$	30
9.	Skala periode gelombang	$N_T = N_t$	30

Tabel 4.3 Perhitungan analitis run up model terdistorsi

No.	H' _{0p}	T _p	N _h	N _t	cotg θ	H' ₀ (m)	T _m (det)	H' ₀ / gT ²	R/H' ₀	R _m
1	25	50	300	51,962	3	0,0833	0,9622	0,009171	0,685	0,0571
2	25	45	300	51,962	3	0,0833	0,8660	0,011322	0,6	0,04998
3	20	50	300	51,962	3	0,0667	0,9622	0,007344	0,785	0,05236
4	20	45	300	51,962	3	0,0667	0,8660	0,009066	0,68	0,04536

Tabel 4.4 Perhitungan analitis run up model tidak terdistorsi

No	H' _{0p}	T _p	N _h	N _t	cotg θ	H' ₀ (m)	T _m (det)	H' ₀ / gT ²	R/H' ₀	R _m
1	25	50	900	30	9	0,0278	1,667	0,001020	1,35	0,03753
2	25	45	900	30	9	0,0278	1,5	0,001259	1,21	0,033638
3	20	50	900	30	9	0,0222	1,667	0,000815	1,6	0,03552
4	20	45	900	30	9	0,0222	1,5	0,001005	1,4	0,03108

Tabel 4.5 Hasil perhitungan analitis run up prototip (terdistorsi dan tidak terdistorsi)

No	H' ₀	T _p	Run up prototip (m)	
			terdistorsi	tidak terdistorsi
1	25	50	17,13	33,78
2	25	45	14,99	30,27
3	20	50	15,71	31,97
4	20	45	13,61	27,97

4.3 Pelaksanaan Uji Run Up Tsunami di Laboratorium

Seluruh kegiatan uji model dilakukan di Laboratorium Pengkajian Teknik Pantai – Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi Yogyakarta menggunakan kolam gelombang (*wave basin*) yang besar. Pengukuran run up yang terjadi di laboratorium dilakukan dengan menempatkan sensor (*wave probe*) sebanyak 30 buah, dengan 5 buah sensor yang diidentifikasi sebagai sensor A (A1, A2, A3, A4, dan A5) diletakkan di depan papan pembangkit gelombang sejajar antara masing-masing sensor dalam satu garis lurus. Posisi sensor A ini sama dengan di perairan laut dalam pada prototip seperti pada gambar 4.2.

Khusus untuk daerah Rajegwesi sebagai konsentrasi penelitian ditempatkan 25 sensor yang diidentifikasi sebagai sensor B dengan susunan 5 baris melintang dan 5 baris membujur, sehingga untuk baris pertama terdapat 5 sensor, demikian seterusnya untuk baris kedua sampai dengan baris kelima. Dengan demikian pada daerah ini terekam data pada 25 posisi seperti pada gambar 4.3.

Secara umum pemodelan di laboratorium dapat digambarkan sebagai berikut:

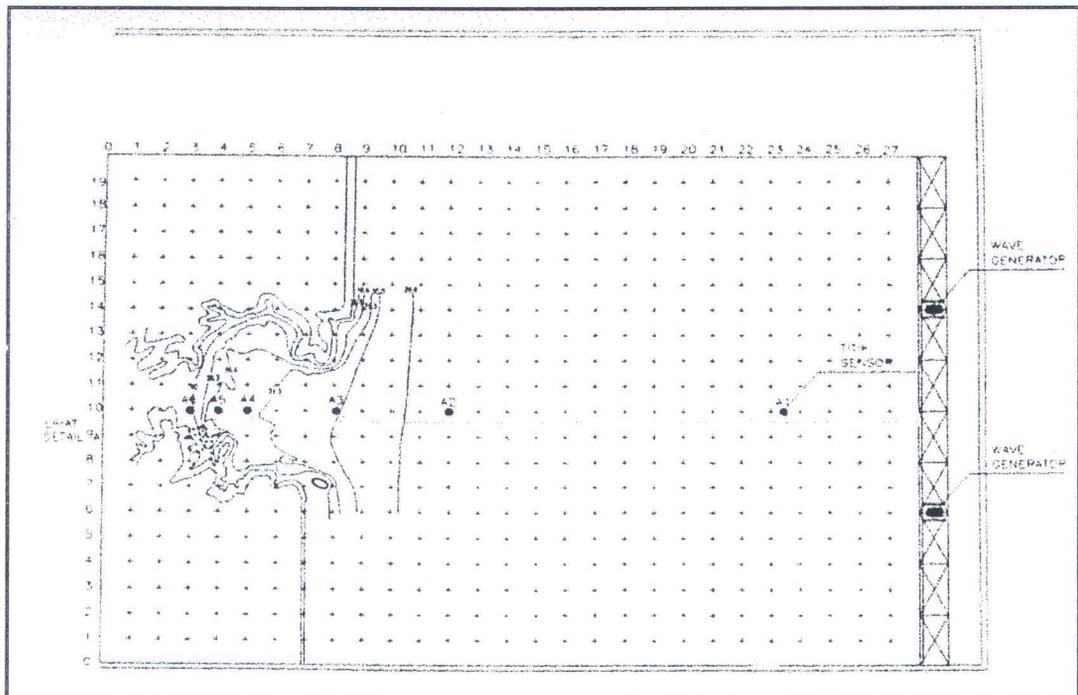
1. Pembangkitan gelombang awal,
 - a. Dari kedalaman (h) untuk model = 40 cm, untuk prototip = 120 m.
 - b. Jarak dari pantai untuk model = 24,5 m, untuk prototip = 22,05 km.
2. Daerah tinjauan (Teluk Rajegwesi),
 - a. Panjang melintang (arah Barat – Timur) untuk model = 11 m, untuk prototip = 9,9 km.
 - b. Panjang membujur (arah Utara – Selatan) untuk model = 10 m, untuk prototip = 9 km.

Dalam uji model ini akan digunakan model gelombang Solitary dengan variasi tinggi gelombang dan model gelombang cnoidal dengan variasi tinggi gelombang dan periode serta harga Ursell number yang memenuhi (Goring dan Raichlen, 1980). Beberapa variasi jenis gelombang perlu diujikan untuk mendapatkan hubungan antara jenis gelombang dengan tinggi gelombang yang terjadi sehingga pada pelaksanaan pembangkitan gelombang dapat memenuhi dan mencakup fenomena tsunami yang sebenarnya terjadi.

4.3.1 Pengujian Jenis Gelombang Solitary

Dalam pelaksanaan uji run up tsunami di laboratorium, untuk model gelombang solitary akan dilakukan 8 seri pengujian untuk tiap baris sensor B (terdapat 5 baris) sehingga total pengujian sebanyak 40 seri. Pembangkitan model

gelombang pengujian divariasikan tinggi gelombangnya, mulai dari 0,5 – 4,0 cm dengan increment 0,5 cm.

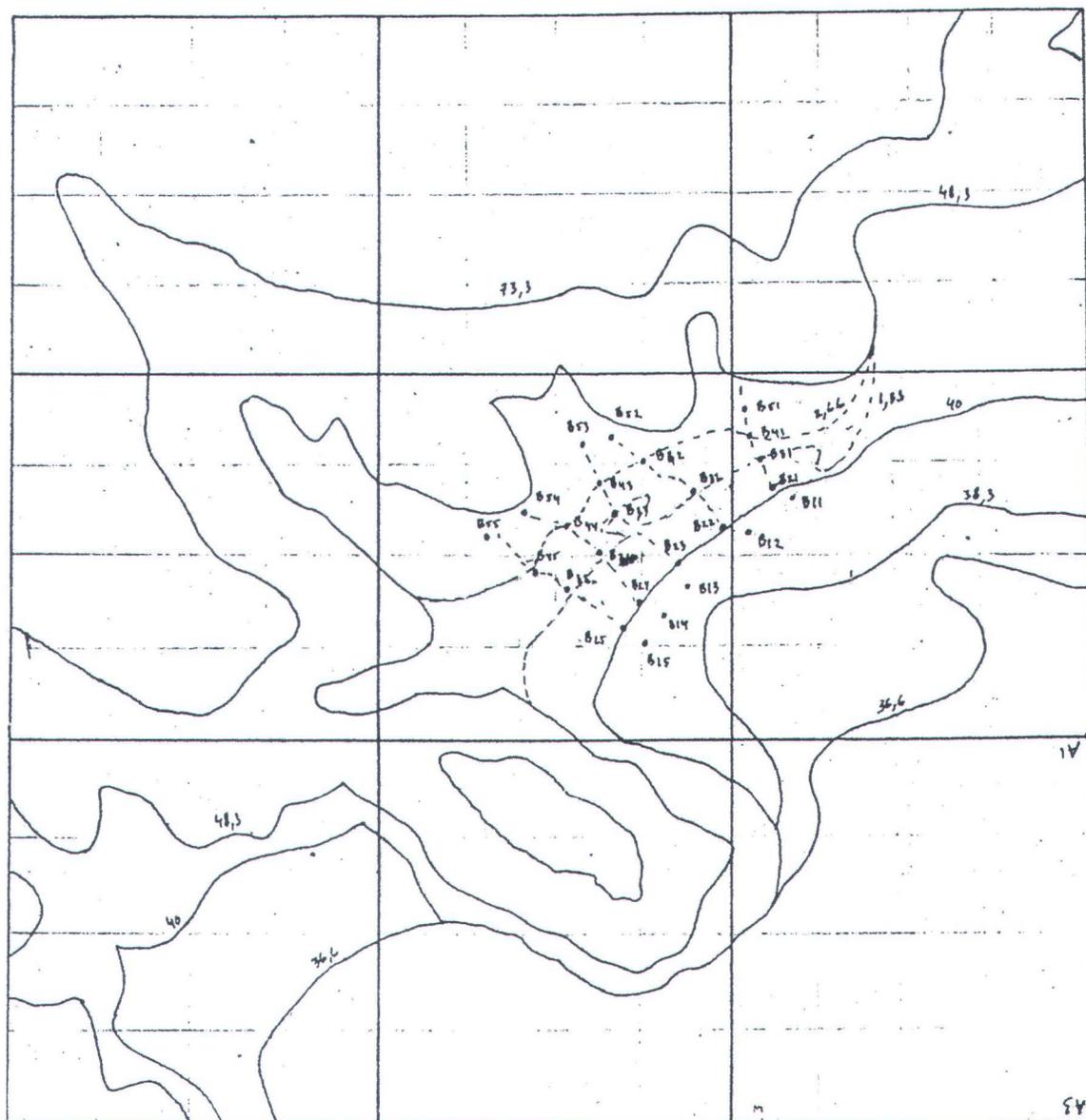


Gambar 4.2 Lokasi penempatan titik sensor A

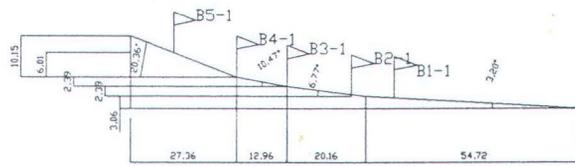
Frekwensi data akuisisi diatur pada 20 Hz dan pembangkitan gelombang awal pada kedalaman 40,5 cm skala model dengan durasi selama 120 detik.

Tabel 4.6 Karakteristik gelombang pengujian jenis gelombang solitary

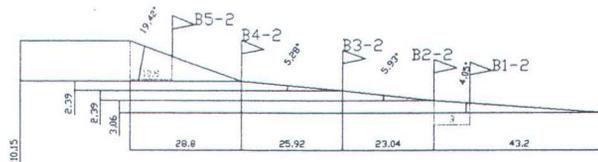
Model		Prototip	
H (cm)	T (detik)	H (m)	T (menit)
0,5	-	1,5	-
1,0	-	3,0	-
1,5	-	4,5	-
2,0	-	6,0	-
2,5	-	7,5	-
3,0	-	9,0	-
3,5	-	10,5	-
4,0	-	12,0	-



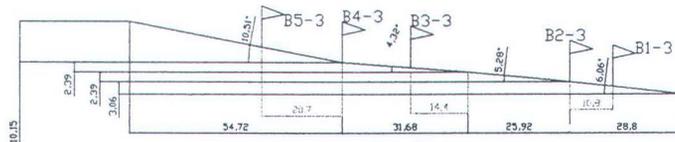
Gambar 4.3 Lokasi penempatan titik sensor B



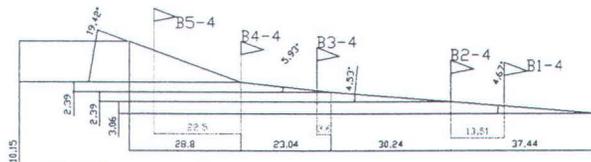
SENSOR
B11 - B51



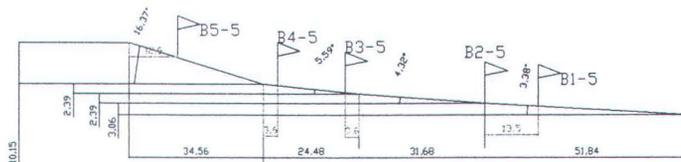
SENSOR
B12 - B52



SENSOR
B13 - B53



SENSOR
B14 - B54



SENSOR
B15 - B55

Gambar 4.4 Penempatan titik sensor B pada penampakan potongan kontur

4.3.2 Teori Pembangkitan Gelombang Solitary

Profil gelombang solitary pada posisi papan gelombang jenis piston diberikan pada jarak $-\infty < t < +\infty$ dengan,

$$\eta_s(x,t) = H \operatorname{sech}^2 [k(Ct - X_0)] \text{ atau,}$$

$$\eta_s(x,t) = H \operatorname{sech}^2 (\theta) \dots\dots\dots (4.1)$$

dimana,

$$\theta = k(Ct - X_0)$$

$$k = \sqrt{\frac{3H}{4h^3}}$$

$$C = \sqrt{g(h + H)}$$

Untuk gelombang solitary, $f(\theta) = \operatorname{sech}^2 (\theta)$ disubstitusikan ke dalam persamaan $X_0(t) = \frac{H}{kh} \int_0^\theta f(\omega) d\omega$, memberikan persamaan implisit untuk time history papan gelombang

$$X_0(t) = \frac{H}{kh} \tanh k(Ct - X_0) \dots\dots\dots (4.2)$$

lintasan papan gelombang yang merupakan fungsi waktu $X_0(t)$ dapat diperoleh dengan menggunakan hukum Newton seperti yang direkomendasikan oleh Goring dan Raichlen (1980).

Langkah pertama yaitu menyusun kembali persamaan (4.2) ke dalam bentuk suatu fungsi baru,

$$F = X_0 - \frac{H}{kh} \tanh k(Ct - X_0) = 0 \dots\dots\dots (4.3)$$

Penerapan hukum Newton :

$$X_o^{(i+1)} = X_o^{(i)} - \frac{F(X_o^{(i)})}{\left(\frac{dF(X_o^{(i)})}{dX_o}\right)} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

dimana $X_o^{(i)}$ menunjukkan iterasi ke-i , dengan mengoperasikan hasil ini ke dalam persamaan iteratif untuk X_o , maka didapatkan

$$X_o^{(i+1)} = X_o^{(i)} - \frac{\left[X_o^{(i)} - \frac{H}{kh} \tanh k(Ct - X_o^{(i)}) \right]}{\left[1 + \frac{H}{h} \operatorname{sech}^2(Ct - X_o^{(i)}) \right]} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

Penyimpangan papan gelombang positif dan negatif maksimum untuk gelombang solitary diperoleh dengan mengevaluasi persamaan (4.3) pada $t = \pm\infty$

$$X_o(\pm\infty) = \pm \frac{H}{kh} = \pm \sqrt{\frac{4Hh}{3}} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

Stroke total adalah jarak antara displacement maksimum dan minimum

$$S_s = \sqrt{\frac{16Hh}{3}} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

dimana persamaan (4.6) akan dapat memberikan tinggi gelombang terhadap rasio stroke untuk gelombang solitary,

$$\frac{H}{S_s} = \sqrt{\frac{3H}{16h}} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

pada saat $t = 0$ penyelesaian iteratif persamaan (4.4) akan memberikan hasil lokasi awal papan gelombang yang diberikan secara pendekatan, yaitu :

$$X_o(0) = -\frac{H}{kh} = -\sqrt{\frac{4Hh}{3}} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

Goring dan Raichlen (1980) merekomendasikan bahwa lamanya waktu kayuh total ditetapkan sebagai waktu papan gelombang untuk memperoleh 0,999 kali posisi terakhir (diberikan sebagai $+H/kh$) yang didapat dari

$$\tanh\left[k\left(Ct_f - 0,999\frac{H}{kh}\right)\right] = 0,999 \quad \dots\dots\dots (4.10)$$



dimana t_f adalah durasi stroke, yang diekspresikan

$$t_f \approx \frac{1}{kC}\left(3,80 + \frac{H}{h}\right) \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

Karena lintasan papan gelombang merupakan fungsi tangen hiperbolik dengan displacement hanya dalam arah x positif, papan gelombang ini biasanya digerakkan ke posisi sandar awal yang diberikan oleh $Xo(0) = -\sqrt{4Hh/3}$ dan kemudian menggerakkan dalam gerakan maju sampai pada $Xo(t_f) = +\sqrt{4Hh/3}$

Goring (1979) dan Goring dan Raichlen (1980) membandingkan gelombang solitary yang dibangkitkan di laboratorium dengan teori gelombang klasik dan menyatakan setuju atas semua bentuk gelombang solitary yang mempunyai amplitudo kecil ($H/h \approx 0,15$) dan kurang setuju dengan gelombang yang mempunyai amplitudo lebih besar ($H/h \approx 0,6$). Selain itu juga ditetapkan bahwa durasi stroke optimum agak sedikit lebih panjang dari yang diperkirakan pada persamaan (4.9) dan menggabungkan perbedaan ini sehingga didapatkan distribusi kecepatan aktual gelombang solitary yang tidak seragam.

Goring dan Raichlen (1980) membandingkan harga yang diukur H/S pada ekspresi teoritis persamaan (4.6) yang kemudian akan ditambahkan harga

terendah dari H/h , serta harga-harga terukur dari H/S yang di bawah harga perkiraan teoritis.

4.3.3 Pengujian Jenis Gelombang Cnoidal

Dalam pengujian jenis gelombang cnoidal akan dilakukan 40 seri pengujian pada tiap baris sensor B (terdapat 5 baris) sehingga total pengujian sebanyak 200 seri. Pembangkitan model gelombang pengujian divariasikan tinggi gelombangnya, mulai dari 0,5 – 4,0 cm dengan increment 0,5 cm. Periode gelombang mulai dari 10 menit sampai 50 menit pada prototip dengan increment 10 menit, dan Ursell number yang didapat otomatis sesuai dengan input tinggi gelombang dan periode. Frekwensi data akuisisi diatur pada 20 Hz dan pembangkitan gelombang awal pada kedalaman 40,5 cm skala model dengan durasi 120 detik. Pada seri pengujian yang tidak memenuhi harga Ursell number, tidak dilakukan pengujian kecuali untuk tinggi gelombang pembangkitan 1,0 cm dan 4,0 cm.

Tabel 4.7 Karakteristik gelombang pengujian jenis gelombang cnoidal

Model		Prototip	
H (cm)	T (detik)	H (m)	T (menit)
0,5	11,55	1,5	10
	23,09		20
	34,64		30
	46,19		40
	57,74		50
1,0	11,55	3,0	10
	23,09		20
	34,64		30
	46,19		40
	57,74		50
1,5	11,55	4,5	10
	23,09		20
	34,64		30
	46,19		40
	57,74		50
2,0	11,55	6,0	10
	23,09		20
	34,64		30
	46,19		40
	57,74		50
2,5	11,55	7,5	10
	23,09		20
	34,64		30
	46,19		40
	57,74		50
3,0	11,55	9,0	10
	23,09		20
	34,64		30
	46,19		40
	57,74		50
3,5	11,55	10,5	10
	23,09		20
	34,64		30
	46,19		40
	57,74		50
4,0	11,55	12,0	10
	23,09		20
	34,64		30
	46,19		40
	57,74		50

4.3.4 Teori Pembangkitan Gelombang Cnoidal

Teori pembangkitan gelombang cnoidal menggunakan wavemaker jenis piston juga dikembangkan oleh Goring (1979) dan disajikan dalam Goring dan Raichlen (1980). Gelombang cnoidal diekspresikan secara matematis sebagai berikut :

$$\eta_c(x,t) = (h_t - h) + Hcn^2(\theta_c, m) \dots\dots\dots (4.12)$$

$$\theta_c = 2K(m) \left(\frac{t}{T} - \frac{X_0}{L} \right) \dots\dots\dots (4.13)$$

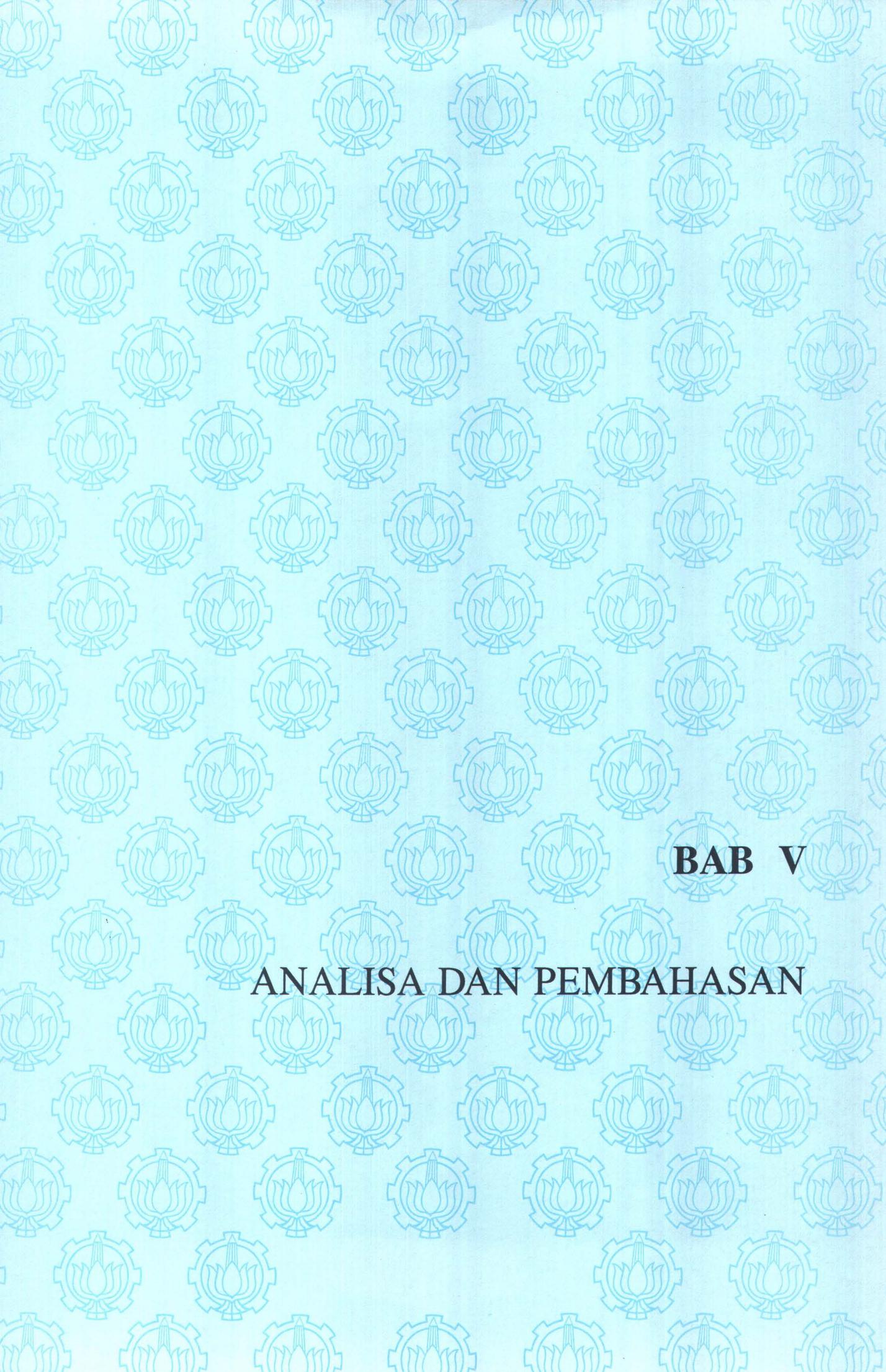
dimana,

- η_c : elevasi permukaan air gelombang cnoidal
- h_t : jarak gelombang cnoidal terhadap dasar kolam
- h : kedalaman perairan
- t : waktu
- H : tinggi gelombang cnoidal
- T : periode gelombang cnoidal
- L : panjang gelombang cnoidal
- X_0 : posisi wavemaker saat itu
- $K(m)$: integral eliptic jenis pertama
- cn : fungsi eliptic Jacobian
- m : parameter eliptic

Jika diasumsikan bahwa $\eta_c = Hf(\theta)$, maka persamaan (4.11) akan memberikan,

$$f(\theta) = \frac{(h_t - h)}{H} + cn^2(\theta_c, m) \dots\dots\dots (4.14)$$

kemudian substitusi persamaan (4.14) untuk $f(\theta)$ ke dalam persamaan



BAB V

ANALISA DAN PEMBAHASAN

BAB V

ANALISA DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil dan Analisa Uji Laboratorium

5.1.1 Interpretasi Hasil Pengujian di Laboratorium

Data-data hasil pengujian di laboratorium masih merupakan data digital yang perlu dikonversikan terlebih dulu dengan suatu offset pengukuran dan faktor kalibrasi sensor. Hal ini dilakukan karena pada saat pelaksanaan pengujian, material sensor yang digunakan berbeda antara satu dengan yang lainnya dan juga nilai kapatansi yang tidak konstan karena sudah sering digunakan.

Dalam pelaksanaan pengujian terdapat beberapa sensor yang rusak, yaitu:

- Sensor B1 pada baris 2
- Sensor B4 pada baris 2
- Sensor B2 pada baris 4

Formula konversi yang digunakan untuk memperoleh nilai data pembacaan sensor ke dalam skala prototip adalah:

$$H_p = (S_{\max} - S_{\text{ave}}) \times k \times N_H \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

dimana

H_p = tinggi gelombang pada prototip (m)

S_{\max} = nilai maksimum pembacaan sensor

S_{ave} = nilai rata-rata pembacaan sensor

k = faktor kalibrasi

Nh = skala tinggi gelombang

Tabel 5.1 Hasil pengujian run up terdistorsi di laboratorium untuk sensor B1-5 sampai B5-5 dalam satuan cm

H ₀ (cm)	T (det) dist	Sensor B1-5	Sensor B2-5	Sensor B3-5	Sensor B4-5	Sensor B5-5
0,5	11,55	0,00861236	0,005274315	0,00366502	0,001343398	0,000467629
	23,09	n.a.	0,004600924	0,004390355	n.a.	0,010304295
	34,64	0,00026641	0,00130136	0,000534169	0,00162343	0,001106126
1,0	11,55	0,01943166	0,0106317	0,00706636	0,003947814	0,004139987
	23,09	0,02063183	0,009661316	0,007505484	n.a.	0,017411107
	34,64	0,00028446	0,00550822	0,003057984	0,00040346	0,005819095
1,5	11,55	0,03069959	0,016112099	0,012130578	0,006973107	0,008479712
	23,09	0,02941052	0,014803996	0,010898835	n.a.	0,003136104
	34,64	0,00021811	0,00757134	0,00611138	0,002084517	0,001303613
2,0	11,55	0,03438618	0,021026065	0,01550221	0,009174825	0,00912593
	23,09	0,03179804	0,019445767	0,009714194	n.a.	0,00482674
	34,64	0,00035570	no test	no test	no test	no test
2,5	11,55	0,03944494	0,022455357	0,018986366	0,010532067	0,009875914
	23,09	0,03719373	0,023420954	0,010455401	n.a.	0,00543890
	34,64	no test				
3,0	11,55	0,04186761	0,024108154	0,021132947	0,011122174	0,012861971
	23,09	0,03808933	0,024300586	0,013205657	n.a.	0,005947501
	34,64	no test				
3,5	11,55	0,04594434	0,027519185	0,019634151	0,014014398	0,012177477
	23,09	0,04150605	0,026489688	0,017454395	n.a.	0,006431838
	34,64	no test				
4,0	11,55	0,05034873	0,031277231	0,020326856	0,014268119	0,01322098
	23,09	0,03783978	0,033092652	0,02416769	n.a.	0,053388314
	34,64	0,01994070	0,01709610	0,021731235	0,01138324	0,036581829

Hasil pengujian di atas merupakan hasil pengujian untuk jenis gelombang cnoidal, karena dari percobaan tersebut diketahui bahwa jenis gelombang yang lebih mencerminkan keadaan prototip adalah jenis gelombang cnoidal. Sedangkan untuk analisa dengan menggunakan metode numerik, diambil satu lajur sensor yaitu sensor B1-5, B2-5, B3-5, B4-5, dan B5-5.

5.1.2 Perhitungan dengan Metode Numerik

Perhitungan run up gelombang dengan menggunakan grafik 4.1 mengalami hambatan karena variabel yang ada dalam perhitungan berada di luar domain grafik tersebut. Oleh karena itu, digunakan metode matematik atau numerik untuk menghitung run up gelombang.

Persamaan matematik yang digunakan adalah persamaan hidrodinamika gelombang panjang dengan menggunakan metode karakteristik. Persamaan yang digunakan adalah:

- Persamaan Kontinuyitas

$$\xi_p = \bar{\xi} - (Uhx + hUx)\Delta t + \left\{ 1 - 2(c^2 + u^2) \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 \right\} (\xi - \bar{\xi}) \dots\dots\dots (5.2)$$

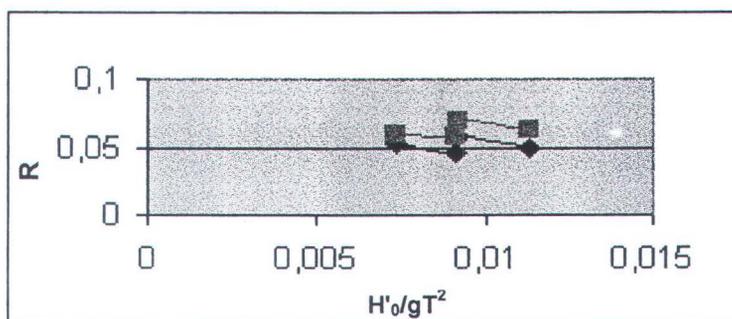
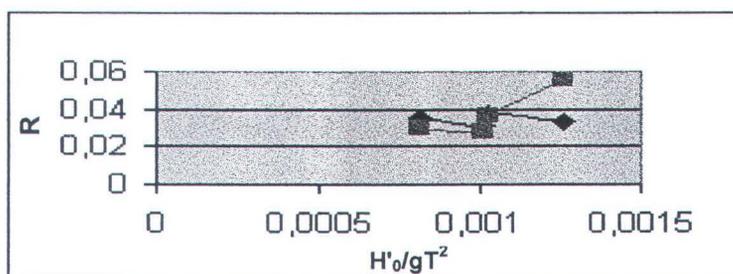
- Persamaan Momentum

$$U_p = U - g\xi_x\Delta t - UU_x\Delta t + \left[\left\{ \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} \right)^2 - 2(c^2 + u^2) \right\} (U - \bar{U}) \right] \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 - \frac{gU|U|}{Cz^2h} \Delta t \dots\dots\dots (5.3)$$

Verifikasi metode numerik dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan numerik dengan hasil analitis menggunakan grafik 4.1. Data yang digunakan adalah seperti pada sub bab 4.2.2 Contoh Perhitungan Run up. Hasil perhitungan dengan menggunakan kedua metode tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 5.2 Hasil perhitungan run up secara analitis dan dengan metode numerik

No.	H ₀ (m)	Tp (det)	H ₀ /gT ²		R dist.		R undist.	
			terdistorsi	tidak terdistorsi	analitis	numerik	analitis	Numerik
1	20	50	0,007344	0,000815	0,0524	0,060	0,0355	0,030
2	20	45	0,009066	0,001005	0,0454	0,057	0,0311	0,028
3	25	50	0,009171	0,001020	0,0571	0,070	0,0375	0,036
4	25	45	0,011322	0,001259	0,0499	0,063	0,0336	0,056

**Grafik 5.1** Hasil perhitungan run up terdistorsi secara analitis dan dengan metode numerik**Grafik 5.2** Hasil perhitungan run up tidak terdistorsi secara analitis dan dengan metode numerik

Berdasarkan hasil perhitungan dan kedua grafik di atas, maka penggunaan metode numerik cukup baik untuk melakukan simulasi run up gelombang dengan variabel yang berada di luar domain grafik 4.1.

Hasil perhitungan numerik untuk variabel data yang sesuai dengan data pengukuran laboratorium adalah sebagai berikut:

Tabel 5.3 Hasil simulasi numerik run up terdistorsi

H' ₀ (cm)	T (det)	Run up gelombang terdistorsi (cm)				
		B1-5	B2-5	B3-5	B4-5	B5-5
4	11,55	8,0	8,0	8,0	6,5	3,7
	23,09	4,4	3,8	2,1	0,3	-
	34,64	3,2	2,6	1,1	-	-
3	11,55	6,0	6,0	6,0	4,2	1,2
	23,09	3,0	2,5	1,1	-	-
	34,64	2,0	1,4	-	-	-
2	11,55	4,0	4,0	3,0	0,8	-
	23,09	1,5	1,0	-	-	-
	34,64	0,9	0,3	-	-	-
1	11,55	1,4	1,0	-	-	-
	23,09	-	-	-	-	-
	34,64	-	-	-	-	-

Tabel 5.4 Hasil simulasi numerik run up tidak terdistorsi

H' ₀ (cm)	T (det)	Run up gelombang tdk terdistorsi (cm)				
		B1-5	B2-5	B3-5	B4-5	B5-5
1,333	20	2,7	2,7	2,7	2,1	1,1
	40	1,5	1,3	0,7	-	-
	60	1	0,8	0,3	-	-
1,0	20	2	2	2	1,4	0,3
	40	1	0,8	0,3	-	-
	60	0,7	0,5	-	-	-
0,667	20	1,1	1	-	-	-
	40	0,6	0,4	-	-	-
	60	-	-	-	-	-
0,333	20	0,3	0,2	-	-	-
	40	-	-	-	-	-
	60	-	-	-	-	-

Tinggi gelombang pada model terdistorsi dikalikan dengan skala tinggi gelombang $N_H = 300$, sehingga:

H' ₀ model (cm)	H' ₀ prototip (m)
1	3
2	6
3	9
4	12

Data yang ada pada kedua tabel di atas (tabel 5.3 dan 5.4) digunakan untuk menginterpretasikan data hasil laboratorium ke prototip. Caranya, data laboratorium yang diuji dengan model terdistorsi dibawa ke model tidak terdistorsi dengan membandingkan nilai run up-nya, kemudian dikalikan faktor skala model tidak terdistorsi dan selanjutnya dikalikan dengan data hasil pengukuran di laboratorium, seperti contoh berikut:

- Run up pada titik sensor B5-5 dengan tinggi gelombang model = 3 cm dan T = 11,55 atau pada prototip dengan tinggi gelombang = 9 m dan T = 10 menit adalah:

$$R \text{ prototip} = \frac{0,3}{1,2} \times 900 \times \text{data laboratorium (tabel 5.1)} = \dots\dots$$

$$= \frac{0,3}{1,2} \times 900 \times 0,012862 = 2,89395 \text{ m}$$

Run up pada titik sensor B1-5 sampai B5-5 disajikan dalam tabel-tabel berikut:

Tabel 5.5 Hasil perhitungan run up dengan metode numerik pada sensor B1-5

H ₀ (cm)	T (det) dist	R model		faktor skala	Sensor B1-5	R prototip (m)
		Dist.	undist.			
4,0	11,55	8,0	2,7	900	0,050349	15,293427
	23,09	4,4	1,5	900	0,037840	11,609932
	34,64	3,2	1	900	0,019941	5,608321
3,0	11,55	6,0	2	900	0,041868	12,560282
	23,09	3,0	1	900	0,038089	11,426798
	34,64	2,0	0,7	900	no test	-
2,0	11,55	4,0	1,1	900	0,034386	8,510580
	23,09	1,5	0,6	900	0,031798	11,447294
	34,64	0,9	-	900	0,000356	-
1,0	11,55	1,4	0,3	900	0,019432	3,747534
	23,09	-	-	900	0,020632	-
	34,64	-	-	900	0,000284	-

Tabel 5.6 Hasil perhitungan run up dengan metode numerik pada sensor B2-5

H ₀ (cm)	T (det) dist	R model		faktor skala	Sensor B2-5	R prototip (m)
		dist.	undist.			
4,0	11,55	8,0	2,7	900	0,031277	9,500459
	23,09	3,8	1,3	900	0,033093	10,189053
	34,64	2,6	0,8	900	0,017096	4,734305
3,0	11,55	6,0	2	900	0,024108	7,232446
	23,09	2,5	0,8	900	0,024301	6,998569
	34,64	1,4	0,5	900	no test	-
2,0	11,55	4,0	1	900	0,021026	4,730865
	23,09	1,0	0,4	900	0,019446	7,000476
	34,64	0,3	-	900	no test	-
1,0	11,55	1,0	0,2	900	0,010632	1,913706
	23,09	-	-	900	0,009661	-
	34,64	-	-	900	0,005508	-

Tabel 5.7 Hasil perhitungan run up dengan metode numerik pada sensor B3-5

H ₀ (cm)	T (det) dist	R model		faktor skala	Sensor B3-5	R prototip (m)
		dist.	undist.			
4,0	11,55	8,0	2,7	900	0,020327	6,174282
	23,09	2,1	0,7	900	0,024168	7,250306
	34,64	1,1	0,3	900	0,021731	5,334030
3,0	11,55	6,0	2	900	0,021133	6,339884
	23,09	1,1	0,3	900	0,013206	3,241389
	34,64	-	-	900	no test	-
2,0	11,55	3,0	0,3	900	0,015502	1,395199
	23,09	-	-	900	0,009714	-
	34,64	-	-	900	no test	-
1,0	11,55	-	-	900	0,007066	-
	23,09	-	-	900	0,007505	-
	34,64	-	-	900	0,003058	-

Tabel 5.8 Hasil perhitungan run up dengan metode numerik pada sensor B4-5

H ₀ (cm)	T (det) dist	R model		faktor skala	Sensor B4-5	R prototip (m)
		dist.	undist.			
4,0	11,55	6,5	2,1	900	0,014268	4,148730
	23,09	0,3	-	900	n.a.	-
	34,64	-	-	900	0,011383	-
3,0	11,55	4,2	1,4	900	0,011122	3,336652
	23,09	-	-	900	n.a.	-
	34,64	-	-	900	no test	-
2,0	11,55	0,8	-	900	0,009175	-
	23,09	-	-	900	n.a.	-
	34,64	-	-	900	no test	-
1,0	11,55	-	-	900	0,003948	-
	23,09	-	-	900	n.a.	-
	34,64	-	-	900	0,000403	-

Tabel 5.9 Hasil perhitungan run up dengan metode numerik pada sensor B5-5

H ₀ (cm)	T (det) dist	R model		faktor skala	Sensor B5-5	R prototip (m)
		dist.	undist.			
4,0	11,55	3,7	1,1	900	0,013221	3,537505
	23,09	-	-	900	0,053388	-
	34,64	-	-	900	0,036582	-
3,0	11,55	1,2	0,3	900	0,012862	2,893943
	23,09	-	-	900	0,005948	-
	34,64	-	-	900	no test	-
2,0	11,55	-	-	900	0,009126	-
	23,09	-	-	900	0,004827	-
	34,64	-	-	900	no test	-
1,0	11,55	-	-	900	0,004140	-
	23,09	-	-	900	0,017411	-
	34,64	-	-	900	0,005819	-

Hasil perhitungan dengan metode numerik di atas kemudian diperbandingkan dengan hasil perhitungan dengan menggunakan formulasi konversi (pers. 5.1). Sebelumnya hasil formulasi konversi tersebut dibawa ke skala prototip dengan mengalikan data dengan skala tinggi gelombang $N_H = 300$.

Tabel 5.10 Hasil perhitungan run up prototip dengan metode numerik dan di laboratorium

H (cm)	T (dt)	B1-5		B2-5		B3-5		B4-5		B5-5	
		numerik	lab	numerik	lab	numerik	Lab	numerik	lab	numerik	lab
4,0	11,55	15,104619	15,293427	9,383169	9,500459	6,098057	6,174282	4,280436	4,148730	3,966293	3,53750492
	23,09	11,351933	11,609932	9,927795	10,189053	7,250306	7,250306	-	-	16,016494	-
	34,64	5,982209	5,608321	5,128830	4,734305	6,519371	5,334030	3,414973	-	10,974549	-
3,0	11,55	12,560282	12,560282	7,232446	7,232446	6,339884	6,339884	3,336652	3,336652	3,858591	2,89394345
	23,09	11,426798	11,426798	7,290176	6,998569	3,961697	3,241389	-	-	1,784250	-
	34,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,0	11,55	10,315854	8,510580	6,307820	4,730865	4,650662	1,395199	2,752447	-	2,737779	-
	23,09	9,539412	11,447294	5,833730	7,000476	2,914258	-	-	-	1,448022	-
	34,64	0,106710	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,0	11,55	5,829498	3,747534	3,189510	1,913706	2,119907	-	1,184344	-	1,241996	-
	23,09	6,189549	-	2,898395	-	2,251645	-	-	-	5,223332	-
	34,64	0,085337	-	1,652465	-	0,917395	-	0,121038	-	1,745728	-



5.2 Pembahasan

Dalam perhitungan analitis run up gelombang pada model terdistorsi dan tidak terdistorsi (Tabel 4.3 dan 4.4), memberikan hasil run up yang berbeda pada prototip, sebagai contoh:

Run up pada prototip dengan tinggi gelombang prototip = 25 meter dan T prototip = 50 detik adalah sebesar 17, 13 meter untuk model terdistorsi.

Sedangkan run up pada prototip untuk model tidak terdistorsi = 33,78 meter.

Hal ini berarti besarnya run up pada model tidak terdistorsi hampir dua kali lipat dari besarnya run up pada model terdistorsi.

Dengan demikian dalam menginterpretasikan hasil pengujian dari model ke prototip, perlu dilakukan langkah dengan membawa data pengujian model terdistorsi ke dalam model tidak terdistorsi. Selanjutnya hasil pengujian model tidak terdistorsi dibandingkan dengan hasil pengujian model terdistorsi dan dikalikan dengan skala model tidak terdistorsi, kemudian dikalikan juga dengan data hasil pengukuran di laboratorium.

Proses perhitungan run up gelombang mengalami hambatan karena variabel yang terdapat pada pengujian berada di luar domain grafik hubungan antara kemiringan (slope), tinggi gelombang laut dalam dan periode gelombang serta perbandingan run up dengan tinggi gelombang laut dalam (grafik 4.1). Oleh karena itu digunakan metode numerik untuk menghitung run up gelombang. Sebelumnya dilakukan verifikasi metode numerik dengan membandingkan hasil perhitungan numerik dengan hasil perhitungan analitis yang menggunakan grafik 4.1. seperti contoh berikut :

- **Model terdistorsi**

Run up dengan tinggi gelombang prototip = 20 meter dan T prototip = 50 detik melalui perhitungan analitis adalah 0.0524 meter.

Untuk run up hasil perhitungan numerik dengan tinggi gelombang dan periode yang sama = 0,060 meter.

- **Model tidak terdistorsi**

Hasil perhitungan analitis run up dengan tinggi gelombang prototip dan periode gelombang prototip yang sama dengan model terdistorsi = 0,0355 meter, sedangkan pada perhitungan numerik run up gelombang = 0,030 meter.

Dari contoh perhitungan tersebut, maka penggunaan metode numerik cukup baik untuk melakukan simulasi run up gelombang.

Hasil simulasi metode numerik berupa data run up pada setiap titik sensor B1-5 sampai B5-5 untuk model terdistorsi dan tidak terdistorsi. Data – data hasil simulasi ini digunakan untuk menginterpretasikan data hasil laboratorium (model) ke prototip, dengan cara membandingkan nilai run up pada model tidak terdistorsi dengan model terdistorsi. Kemudian mengalikan dengan faktor skala model tidak terdistorsi dan data hasil pengukuran di laboratorium. Hasil dari perhitungan ini merupakan run up yang terjadi di prototip.



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

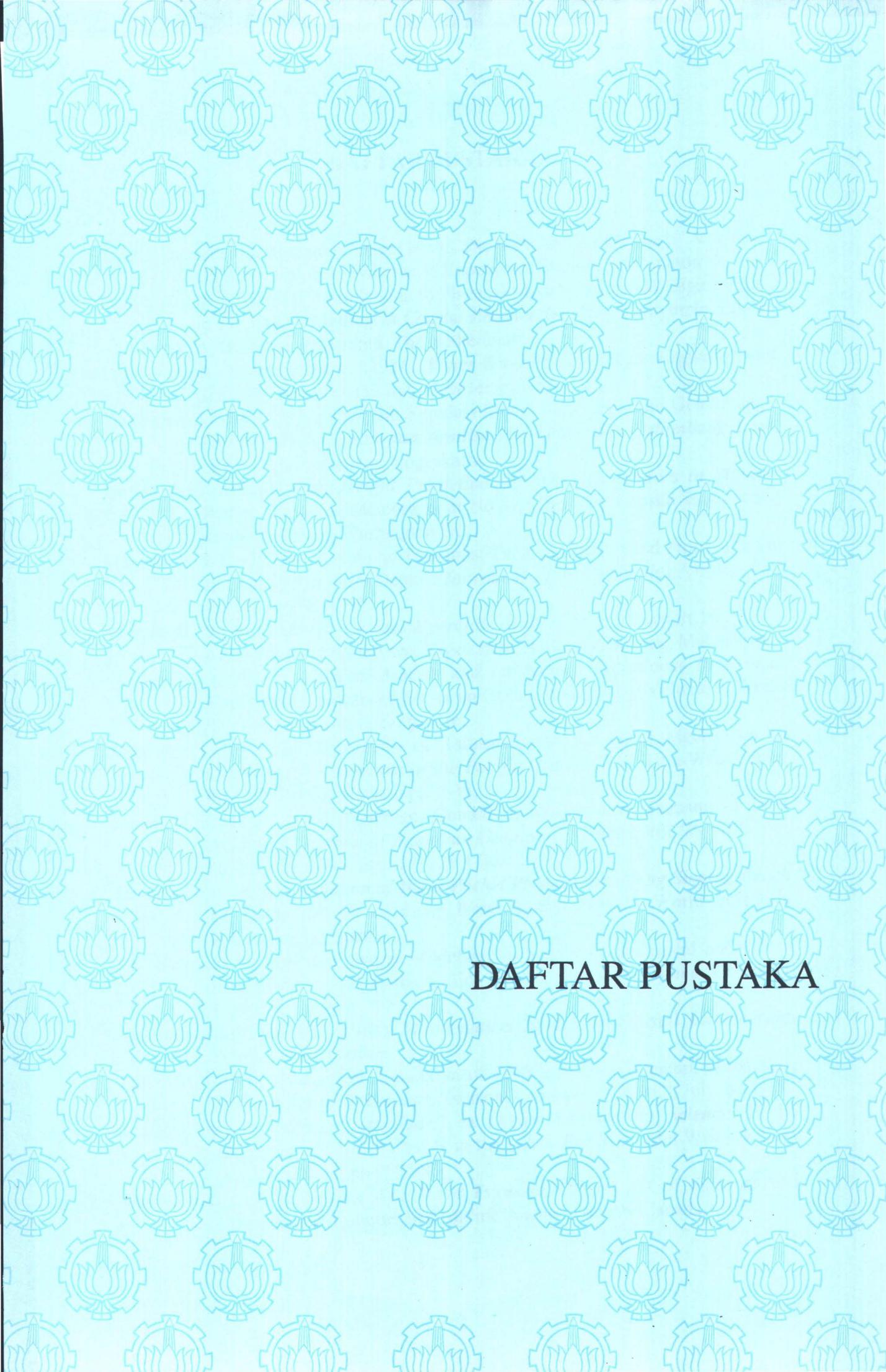
Dari analisa perhitungan dan uraian pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. Pada hasil perhitungan run up gelombang secara analitis antara model terdistorsi dengan model tidak terdistorsi (tabel 4.3 dan 4.4) terdapat perbedaan nilai run up yang cukup signifikan.
2. Proses perhitungan run up prototip dengan menggunakan pembanding model tidak terdistorsi melalui metode numerik memberikan hasil perhitungan run up yang berbeda dengan proses perhitungan yang mengalikan data hasil pengujian dengan skala tinggi gelombang secara langsung, meskipun mempunyai trend yang sama.
3. Dengan adanya perbedaan yang cukup signifikan antara hasil pemodelan terdistorsi dengan hasil dari pemodelan tidak terdistorsi maka dalam menginterpretasikan hasil pengujian model terdistorsi, sebaiknya data hasil pengujian tersebut terlebih dahulu dibawa ke dalam model tidak terdistorsi. Dari proses ini, data hasil perhitungan yang diperoleh merupakan data yang ada di prototip.

6.2 Saran

Perhitungan run up gelombang tsunami di Teluk Rajegwesi dengan menggunakan grafik 4.1 tidak dapat dilakukan karena variabel yang terdapat pada pengujian berada di luar domain grafik tersebut. Karena itu, perlu adanya kajian lebih lanjut tentang run up gelombang dengan variabel yang lebih luas khususnya run up gelombang yang terjadi pada pantai di Indonesia.

Dalam pengujian dengan menggunakan model fisik terdistorsi perlu diperhatikan adanya ketidaksesuaian keadaan di prototip dengan keadaan yang dibuat pada pemodelan sehingga dalam mendapatkan hasil pengujian pada prototip, sebaiknya data pengujian model terdistorsi dibawa ke dalam model tidak terdistorsi dengan memasukkan faktor skala model tidak terdistorsi.

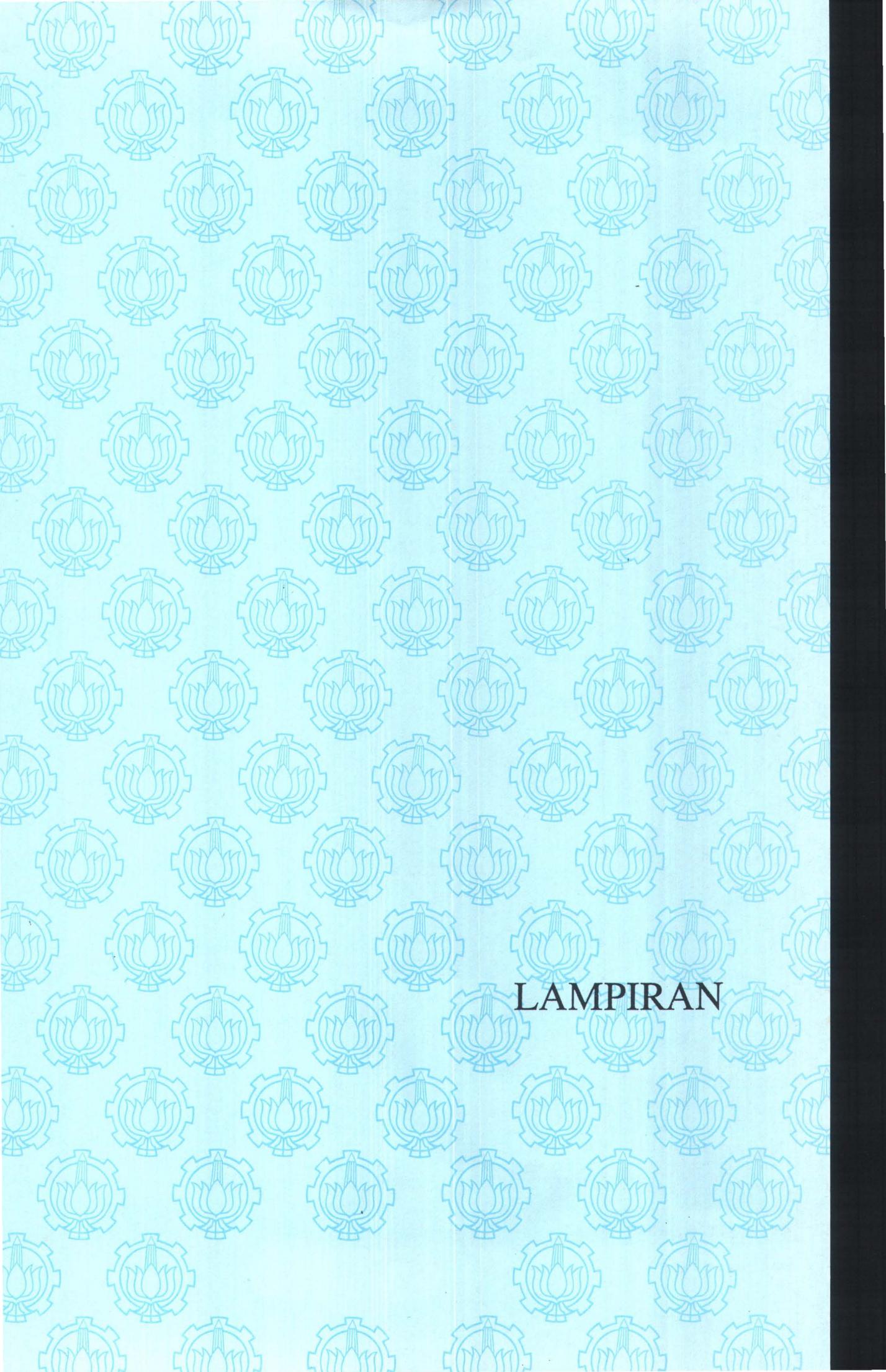


DAFTAR PUSTAKA

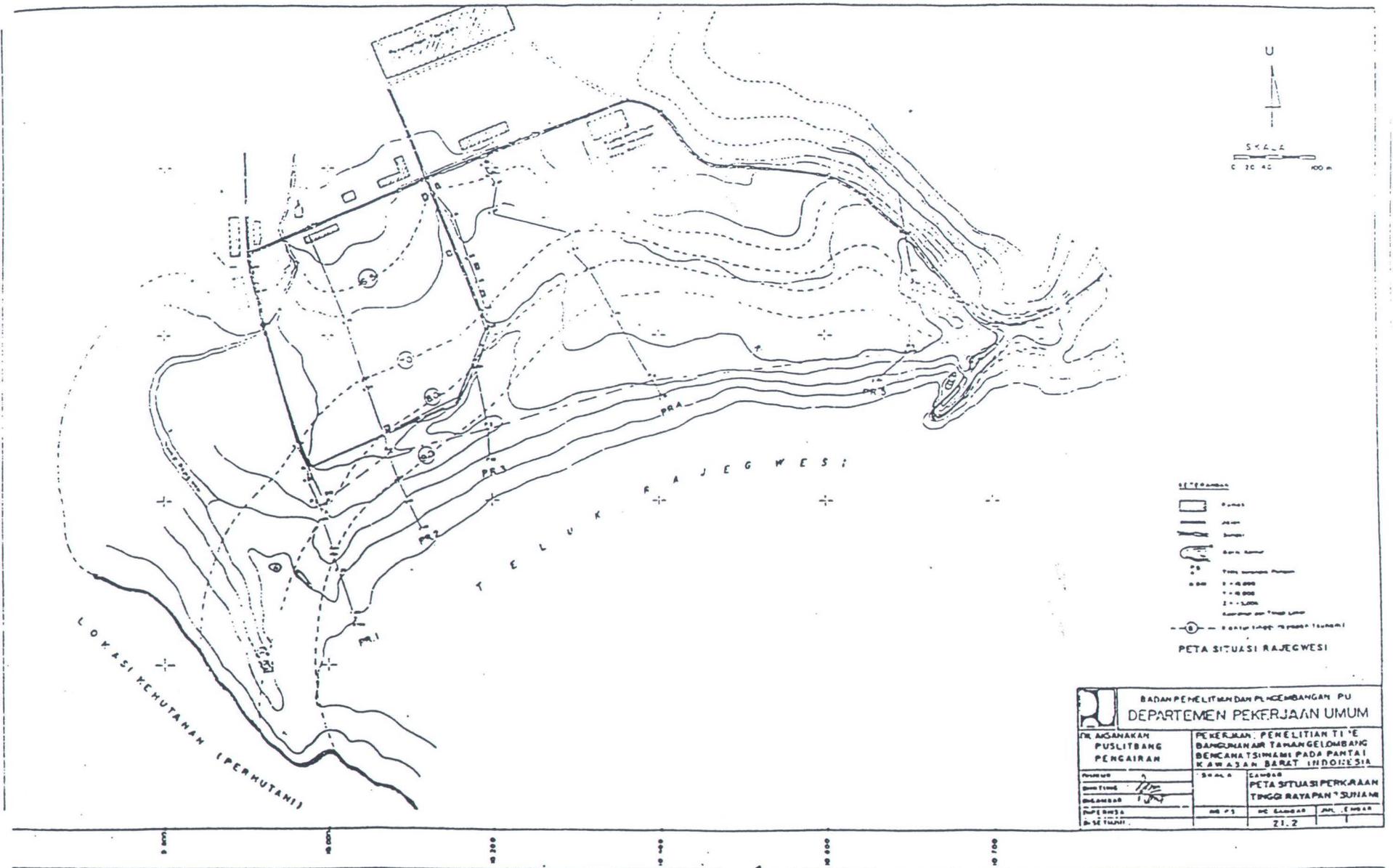
DAFTAR PUSTAKA

- Coastal Engineering Research Center (1984), *Shore Protection Manual*, Vol. 2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Washington DC.
- Dalrymple, R. A. (1985), "Introduction to Physical Models in Coastal Engineering", in *Physical Modelling in Coastal Engineering*, R.A. Dalrymple. Ed., A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Dean, R. G. & Dalrymple, R. A. (1984), *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist*, Prentice-Hall Inc., New Jersey USA.
- Fachrudin, I., dkk (1997), "Program Simulasi Model Fisik Spektrum Gelombang", *Training Pengukuran dan Analisa Hidrodinamika Gelombang Laut*, LPTP - BPP Teknologi, Yogyakarta.
- Galvin, C. J. (1964), *Wave-Height Prediction for Wave Generators in Shallow Water*, Technical Memorandum No. 4, US Army Coastal Engineering Research Center, Washington DC.
- Hammack, J. L. (1973), "A Note on Tsunamis: Their Generation and Propagation in an Ocean of Uniform Depth", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 60, Part 4, 1973, pp. 769-799
- Hudson, R. Y., et al (1979), *Coastal Hydraulic Models*, Special Report No. 5, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- Hughes, S. A. (1993), *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*, Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 7, World Scientific Publishing, Singapore.
- Iida, K. (1970), "The Generation of Tsunamis and the Focal Mechanism of Earthquakes", *Tsunamis in the Pacific Ocean*, Ch. 1, East-West Center Press, Honolulu, Hawaii, pp. 3-18.
- Imamura, F., et al (1995), "Damage, Conditions of East Java Tsunami of 1994 Analyzed", *Journal of American Geophysical Union*, Vol. 76, No. 26, June 27, 1995, page 257, 26 1-262.
- Imamura, F. (1995), *Simulation of Wave-Packet Propagation Along Sloping Beach by Tsunami-Code in Long Wave Runup Models*, World Scientific Publishing, Singapore.
- Kamphuis, J. W. (1991), *Physical Modeling*, in handbook of Coastal and Ocean Engineering, J.B. Herbich, Ed., Vol 2, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- Koutitas, Christopher G., (1988), *Mathematical Models in Coastal Engineering*, Pentech Press London.
- Latief, H. (1997), "Numerical Simulation of 1994 East Java Tsunami, Indonesia", *Proceedings of D-Seminar*, Tsunami Laboratory (DCRC), July, pp 1-15.
- Le Mehaute, B. (1990), "Similitude", in *Ocean Engineering Science*, B. Le Mehaute, Ed., Vol 9, Part B in the series *The Sea*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp 955-980.
- Murty, I. S. (1977), *Seismic Sea Wave Tsunami*, Department of Fisheries and Environment, Fisheries and Marine Science, Ottawa, Canada.

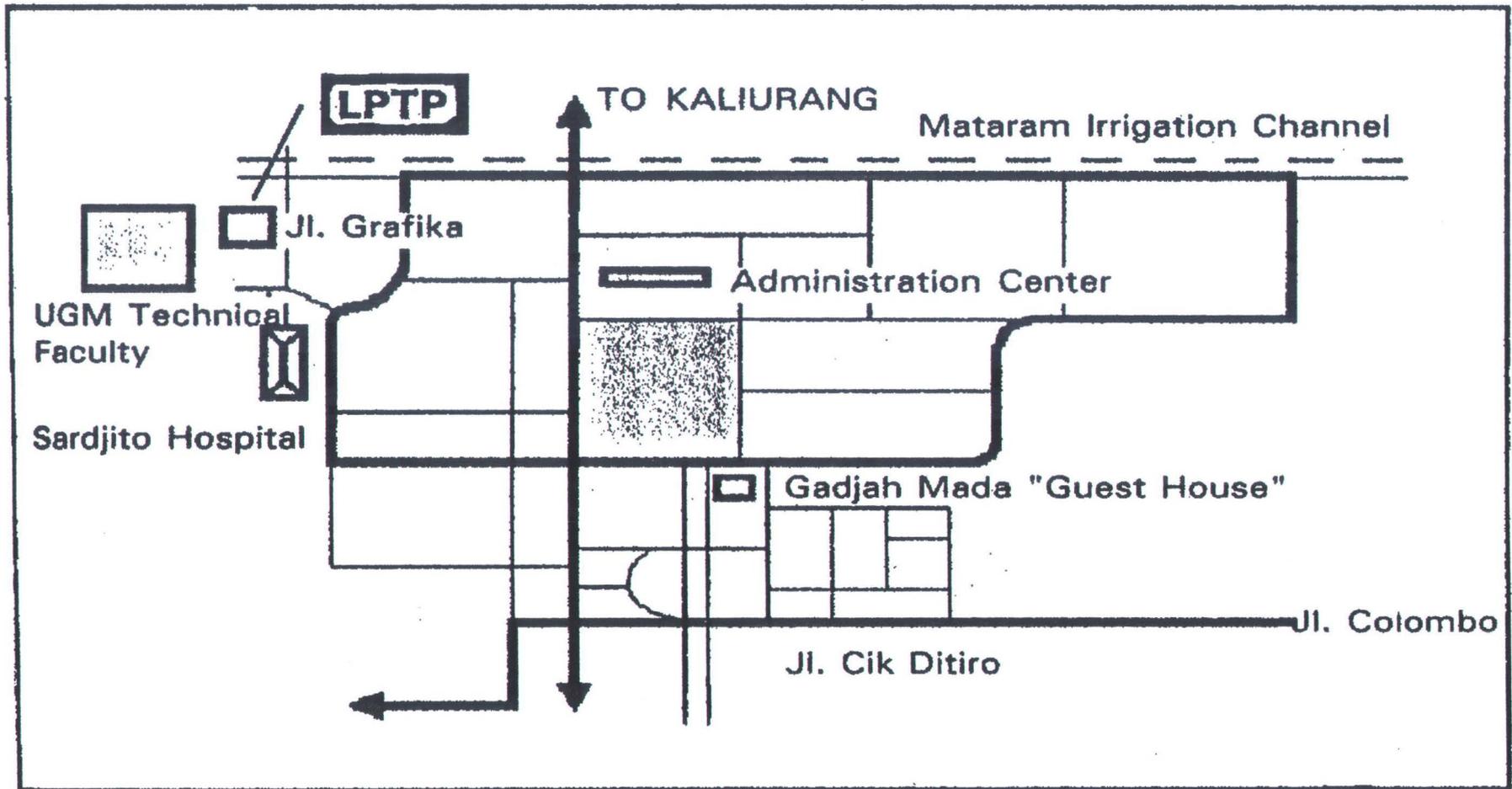
- Pararas-Carayamiis, G. (1969), *Catalogue of Tsunamis in the Hawaiian Island*, Report WDCA-T 69-2, ESSA - Coast and Geodetic Survey, Boulder, Colo.
- Pratikto W. A., Subandono D., Sambodho K. (1997), "Numerical Model of the June 3, 1994 Banyuwangi, East Java Tsunami", *Proceeding of Tsunami Modelling and Prevention Seminar*, ITS, November, pp.20-31.
- Pratikto, W. A. (1998), "Perencanaan Perlindungan Pantai dari Bahaya Tsunami", *Laporan Riset Unggulan Terpadu V (1997-1998)*, Kantor Menteri Negara Riset dan Teknologi, Dewan Riset Nasional.
- Pratikto, W. A., dkk (1997), *Perencanaan Fasilitas Pantai dan Lautan*, Edisi Pertama, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Puspito, N. T., & Trioso, W. (1994), *Aspek Kegempaan Tsunami di Indonesia*, Makalah Seminar Sehari Masalah Tsunami di Indonesia dan Aspek-Aspeknya, hal 167-172.
- Sorensen, R. M. (1991), *Basic Coastal Engineering*, US Army Coastal Engineering Research Center, John Wiley & Sons Inc., Singapore.
- Warnock, J. E. (1950), "Hydraulic Similitude", in *Engineering Hydraulics*, edited by H. Rouse, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Wiegel, R. L. (1964), *Oceanographical Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, new Jersey.
- Yeh, H., Liu, P. & Synolakis, C. E. (1995), *Long Wave Runup Models*, World Scientific Publishing, Singapore.
- Yuwono, N. (1985), *Perencanaan Model Hidraulik (Hydraulic Modelling)*, Laboratorium Hidraulik dan Hidrologi, Fakultas Pasca Sarjana, Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.



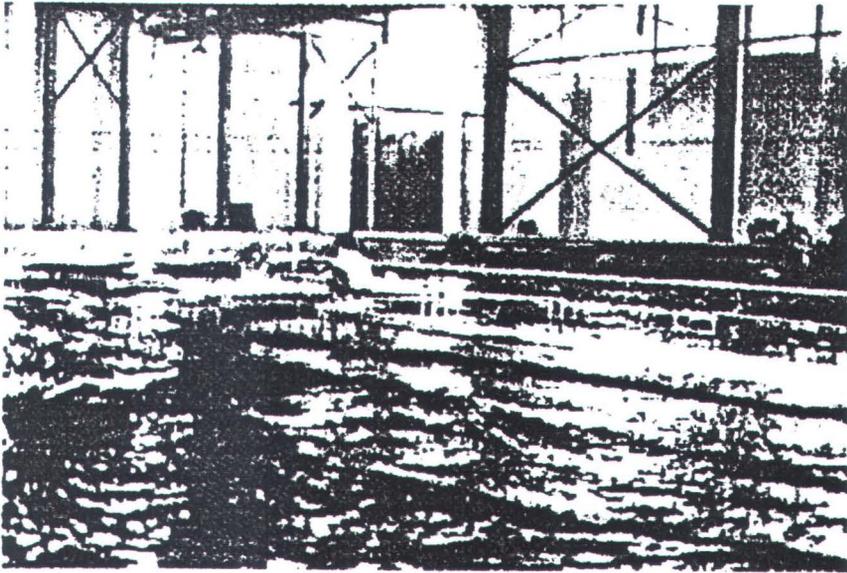
LAMPIRAN



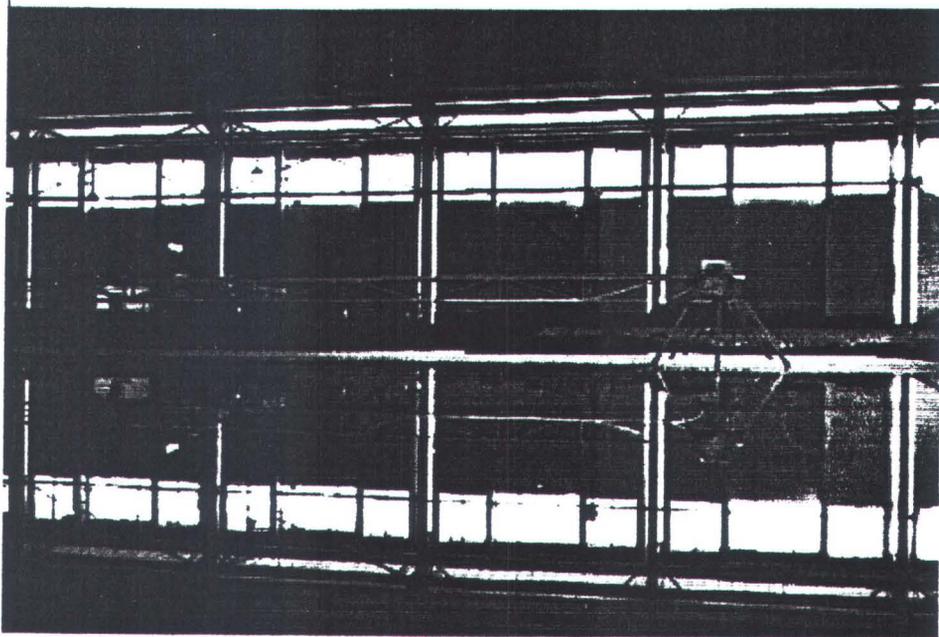
Peta Perkiraan Tinggi Rayapan Tsunami Di Pantai Rajegwesi Banyuwangi



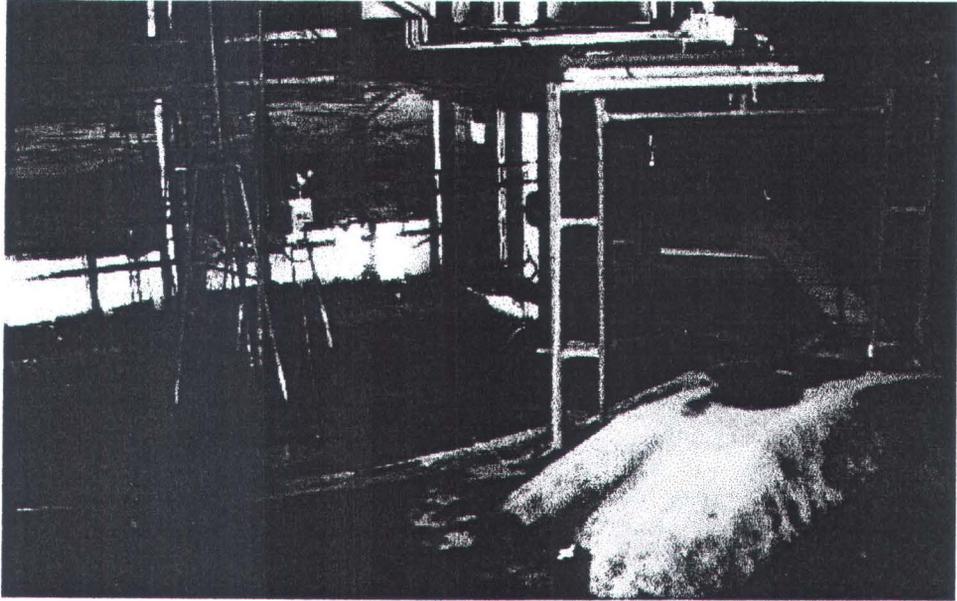
Gambar denah lokasi percobaan, LPTP-BPPT, Yogyakarta.



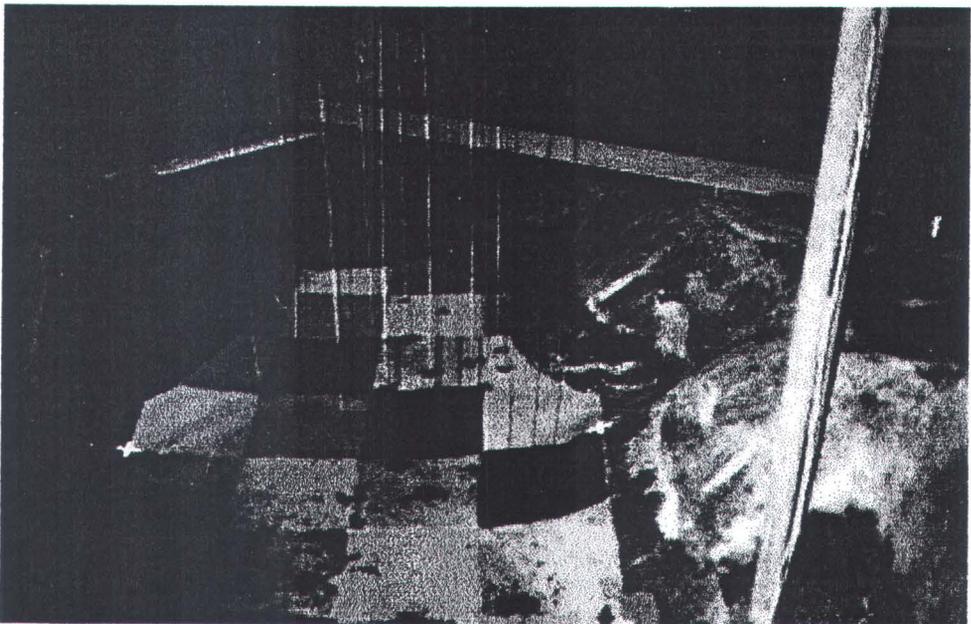
Gambar *wave generator* di LTP-BPPT Yogyakarta



Gambar peletakan sensor percobaan di LTP-BPPT Yogyakarta



Gambar peletakan titik sensor A



Gambar peletakan titik sensor B

Statistical Hasil Pembacaan Sensor Model Gelombang Cnoidal

H (cm)	Input		H max (m)	H min (m)	H average (m)	Std Dev
	T (dt)	Ursell Number				
0,5	11,55	39,9	16,57019752	0,07699629	3,07144828	3,886954381
1,0	11,55	80,2	8,31954931	0,15461268	2,81694741	2,452408467
1,5	11,55	121,3	12,57642333	0,25805279	4,55130559	3,441636367
2,0	11,55	163,2	17,11147017	0,51069183	6,05071294	4,326611609
2,5	11,55	205,8	23,61738308	1,22631016	7,30817039	5,300679617
3,0	11,55	249,3	14,64324824	0,81321484	6,76500309	4,255888788
3,5	11,55	293,6	16,18430624	1,05455522	7,43458703	4,617105925
4,0	11,55	338,8	17,33329903	1,93210342	8,00184522	4,816491429

H (cm)	Input		H max (m)	H min (m)	H average (m)	Std Dev
	T (dt)	Ursell Number				
0,5	23,09	160,3	6,68399223	0,79722598	2,21263403	1,453351643
1,0	23,09	323,7	10,69842317	2,05830505	4,24320287	2,212392541
1,5	23,09	490,5	13,83253569	0,27631861	4,86960998	3,904141965
2,0	23,09	660,7	9,66445549	0,93190373	4,99220410	3,390882959
2,5	23,09	834,6	11,57392777	1,50934805	6,07187223	3,837592393
3,0	23,09	1012,0	11,42679847	1,72587524	6,19152962	3,622441636
3,5	23,09	1193,1	12,58173998	1,92955133	6,96895623	3,810207647
4,0	23,09	1377,9	34,95597943	5,47184358	11,36016191	6,563449026

H (cm)	Input		H max (m)	H min (m)	H average (m)	Std Dev
	T (dt)	Ursell Number				
0,5	34,64	361,6	0,93962973	0,06087812	0,25548595	0,188402713
1,0	34,64	730,8	1,74572841	0,06701993	0,45840892	0,489480518
1,5	34,64	1108,0	5,94634401	0,06543290	1,01076786	1,329478638
2,0	34,64	1493,5	0,31287935	0,10670968	0,19737667	0,086396394
2,5	34,64	1887,2	no test	no test	no test	no test
3,0	34,64	2289,4	no test	no test	no test	no test
3,5	34,64	2699,9	no test	no test	no test	no test
4,0	34,64	3118,9	23,90929527	2,94067221	6,35438078	4,311285776

Statistical Hasil Pembacaan Sensor Model Gelombang Cnoidal

H (cm)	T (dt)	Ursell Number	(m)	(m)	(m)	
0,5	46,19	643,7	1,91296822	0,10366310	0,54764896	0,617794336
1,0	46,19	1301,5	0,53340901	0,15988084	0,31901836	0,124071533
1,5	46,19	1973,9	no test	no test	no test	no test
2,0	46,19	2661,1	no test	no test	no test	no test
2,5	46,19	3363,4	no test	no test	no test	no test
3,0	46,19	4080,8	no test	no test	no test	no test
3,5	46,19	4813,4	no test	no test	no test	no test
4,0	46,19	5561,3	7,01666837	1,95835140	3,76539398	1,757800526

H (cm)	Input		H max (m)	H min (m)	H average (m)	Std Dev
	T (dt)	Ursell Number				
0,5	57,74	1006,6	2,96478185	0,02734170	0,63175283	0,738811219
1,0	57,74	2036,6	0,57382449	0,08662318	0,32416140	0,181902948
1,5	57,74	3087,9	no test	no test	no test	no test
2,0	57,74	4061,3	no test	no test	no test	no test
2,5	57,74	5076,6	no test	no test	no test	no test
3,0	57,74	6091,9	no test	no test	no test	no test
3,5	57,74	7107,2	no test	no test	no test	no test
4,0	57,74	8405,1	10,55115579	1,88417911	4,71888194	2,404295951