

**DISERTASI**

**PEMANFAATAN GERAKAN VERTIKAL GELOMBANG  
UNTUK PEMOMPAAN AIR LAUT**

*(Utilization of vertical wave motion for seawater pumping)*

**HAMZAH AL IMRAN**

**D013171018**



**PROGRAM STUDI S3 TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

PEMANFAATAN GERAKAN VERTIKAL GELOMBANG  
UNTUK PEMOMPAAN AIR LAUT

*UTILIZATION OF VERTICAL WAVE MOTION  
FOR SEAWATER PUMPING*

Disusun dan Diajukan oleh

**HAMZAH AL IMRAN**  
**NIM. D013171018**

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi  
Pada tanggal 13 Januari 2023  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui  
Komisi Penasehat

  
**Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT,**  
Promotor

  
**Dr. Eng. Ir. H. Mukhsan Putra Hatta, ST., MT**  
Co-Promotor

  
**Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, ST., MT**  
Co-Promotor

Dekan, Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

  
**Prof. Dr. Eng. Ir. M. Idris Ramli, ST., MT, IPM**

Ketua Program Studi  
Teknik Sipil

  
**Dr. Eng. Ir. H. Rita Irmawaty, ST., MT**

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Hamzah Al Imran, dengan ini menyatakan bahwa disertasi yang berjudul "Pemanfaatan Gerakan Vertikal Gelombang untuk Pemompaan Air Laut" adalah karya saya sendiri, dan belum pernah serta tidak sedang diajukan untuk mendapatkan gelar akademik dimanapun. Disertasi ini sepenuhnya karya saya, dan setiap informasi yang ditulis dalam disertasi ini yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yaitu mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam disertasi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam disertasi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Makassar, 27 Januari 2023  
Yang membuat pernyataan,  
Penulis,



Hamzah Al Imran  
NIM. D013171018

## PRAKATA

### *Bismillahirrahmanirrahim*

Puji dan Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis, sehigga dapat menyusun dan menyelesaikan disertasi ini.

Ide yang melatar belakangi pemanfaatan gerakan vertikal gelombang untuk pemompaan air laut dengan model pompa gelombang ini timbul karena potensi energi dari gelombang air laut yang tidak ada habis nya dapat dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi baru terbarukan dengan tujuan untuk mensuplai air laut ke daratan untuk berbagai keperluan seperti untuk irigasi perikanan air asin/payau, untuk tambak udang dan memutar turbin/dinamo listrik yang murah dan ramah lingkungan.

Berbagai kendala yang penulis hadapi selama mengikuti program pendidikan S3 ini terutama dalam melaksanakan penelitian hingga penyusunan disertasi ini, namun semuanya dapat terlewati berkat bantuan baik moril maupun materil dari berbagai pihak. Untuk itu perkenankanlah penulis menyampaikan ungkapan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T sebagai ketua komisi penasehat (Promotor), Bapak Dr. Eng. Ir. Mukhsan Putra Hatta, S.T., M.T. dan Dr. Eng. Ir. Bambang Bakri, S.T., M.T sebagai anggota komisi penasehat (Co-promotor) atas kesediaan

meluangkan waktunya untuk memberikan bantuan, arahan serta bimbingan mulai dari penentuan topik, pelaksanaan penelitian sampai dengan selesainya disertasi ini.

2. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muh. Saleh Pallu, M.Eng, Bapak Prof. Dr. Ir. Luther Sule, M.T, Bapak Dr. Eng. Ir. Farouk Maricar, M.T, serta Bapak Sabaruddin Rahman, S.T., M.T., Ph.D. sebagai penguji internal dan Bapak. Prof. Dr. Ir. H. Tamrin Rahman, ST., MT. sebagai penguji eksternal atas segala saran, masukan dan tanggapan untuk perbaikan disertasi ini.
3. Rektor Universitas Hasanuddin, Dekan Sekolah Pascasarjana Unhas, Dekan Fakultas Teknik Unhas, Ketua Departemen Teknik Sipil Unhas, Ketua Program Studi S3 Teknik Sipil Unhas, Dosen S3 Teknik Sipil Unhas serta staf administrasi Pascasarjana Unhas dan staf administrasi Departemen Teknik Sipil Unhas, Kepala Laboratorium Hidrodinamika Unhas yang telah membantu penulis selama proses perkuliahan, penelitian serta penyusunan disertasi ini.
4. Badan Penyelenggara Harian (BPH) Unismuh Makassar, Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar, Dekan Fakultas Teknik Unismuh Makassar, Ketua Program Studi Teknik Pengairan Unismuh Makassar, yang telah memberikan bantuan dan izin kepada penulis untuk melanjutkan studi pada Program S3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.

5. Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi, Dirjen Sumber Daya Ilmu Pengetahuan, Teknologi dan Pendidikan Tinggi. Dengan memberikan bantuan Beasiswa Unggulan Dosen Indonesia Dalam Negeri (BUDI-DN) Tahun 2017 bekerjasama dengan Lembaga Pengelolaan Dana Pendidikan (LPDP).
6. Rekan-rekan mahasiswa Program S3 Teknik Sipil Unhas, khususnya angkatan 2017 dan rekan-rekan dosen Fakultas Teknik Unismuh Makassar yang telah memberikan dukungan, do'a dan motivasi selama penulis mengikuti perkuliahan, penelitian serta penyusunan disertasi ini. Demikian pula kepada adik-adik mahasiswa Unismuh Makassar yang secara bergantian membantu penulis selama proses pengambilan data di laboratorium, serta semua pihak yang telah membantu yang tidak sempat penulis sebutkan satu persatu, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya.

Ucapan terima kasih setulus-tulusnya penulis haturkan kepada ketiga orang tua tercinta Ayah Prof. Dr. H. Hammado Tantu, M.Pd. (Alm), Ibunda tercinta Hanidja Dg Pa'dja (Alm) dan Ibu Dra. Hj. Rosdiana Sumara, M.S.(Alm) yang telah membesarkan, mendidik, memotifasi dan mendukung penulis untuk melanjutkan pendidikan Program Doktor S3 di Fakultas Teknik Unhas, kedua mertua Bapak Drs. Abd. Karim (Alm) dan Ibu Hj. Kursiah (Alm) yang senantiasa berdoa disetiap sujudnya bagi kesehatan dan keberhasilan studi penulis di saat beliau masih hidup, juga

kepada saudara-saudaraku, ipar-iparku yang telah membantu dan mendoakan, sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan ini.

Akhirnya penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada istriku tercinta Dr. Ir. Nenny, S.T.,M.T., IPM. atas kasih sayang yang mendalam, ketulusan, pengertian dan perhatian yang luar biasa, juga kepada anak-anakku Ahmad Fauzan Fathurrahman, S.Tr.Pt. Nurul Miftahul Qalbi, S.Ars dan Ahmad Maulana Ildhal Rahman atas pengertian, kesabaran, dan keikhlasan yang memberikan semangat dalam segala hal selama penulis mengikuti pendidikan ini.

Penyusunan disertasi ini tentunya belum sempurna dan masih banyak kekurangan yang harus diperbaiki, untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis mohon masukan dan kritik yang membangun demi sempurnanya disertasi ini. Semoga dapat bermanfaat, Amin..

Makassar, 27 Januari 2023

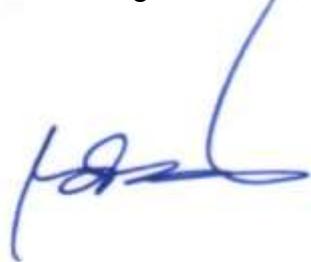
**Hamzah Al Imran**

**ABSTRAK**

**HAMZAH AL IMRAN.** *Pemanfaatan Gerakan Vertikal Gelombang Untuk Pemompaan Air Laut* (dibimbing oleh **Muhammad Arsyad Thaha, Mukhsan Putra Hatta dan Bambang Bakri**).

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan rancangan pompa gelombang dengan piston gerak vertikal, menemukan dan mengenali variabel yang signifikan berpengaruh terhadap debit pemompaan ( $Q$ ) serta menganalisis dan mendapatkan hubungan antar variabel berpengaruh yang diteliti dengan  $Q$ . Penelitian ini adalah penelitian experimental di laboratorium dengan menggunakan saluran kaca yang dilengkapi dengan mesin pembangkit gelombang. Model pompa gelombang tipe pelampung yang bergerak secara vertikal di simulasi dengan tinggi gelombang ( $H_i$ ), Panjang gelombang ( $L$ ), tinggi pemompaan ( $h$ ), dimensi pelampung dan tabung ( $A_1$  &  $A_2$ ), kedalaman air ( $d$ ), lebar pelampung ( $b$ ), berat pelampung ( $W$ ), periode gelombang ( $T$ ) dan berat jenis air ( $\gamma$ ), baik untuk mendapatkan pengaruh masing-masing terhadap debit ( $Q$ ), maupun menemukan rumusan hubungan antar parameter, fungsi dari parameter tersebut yaitu  $Q = f(H_i, L, h, A_1, A_2, d, b, W, T, \gamma)$ . Hasil penelitian menunjukkan kinerja pompa gerak vertikal cukup memuaskan dengan menghasilkan debit ( $Q$ ). Debit pemompaan ( $Q$ ) yang dihasilkan cukup signifikan karena dipengaruhi gabungan parameter tak berdimensi yaitu:  $H_i/L$ ,  $b/L$ ,  $h/H_i$ ,  $d/L$  dan  $W/\gamma H_i^2 A_2$ . Telah ditemukan persamaan empirik yang menghubungkan debit pemompaan ( $Q$ ) dengan semua parameter berpengaruh dan dihasilkan rancangan pompa gelombang dengan piston gerak vertikal untuk digunakan pada kondisi yang sebenarnya.

**Kata kunci** : Debit, Tinggi pemompaan, Pompa gelombang, pelampung gerak vertikal

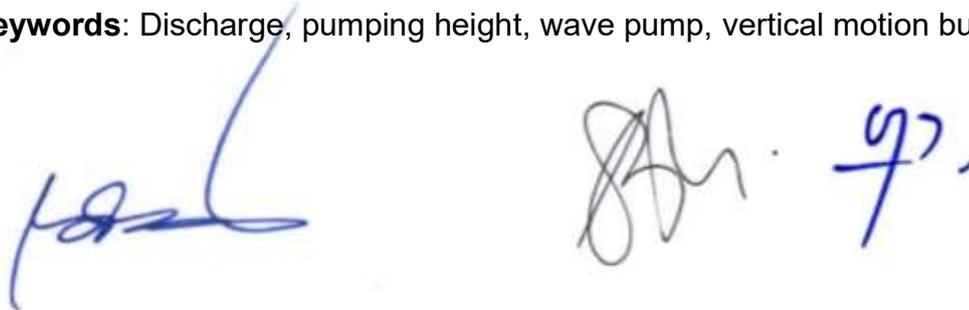


**ABSTRACT**

**HAMZAH AL IMRAN.** *Utilization of vertical wave motion for seawater pumping* (Supervised by **Muhammad Arsyad Thaha, Mukhsan Putra Hatta** and **Bambang Bakri**).

This study aims to produce a wave pump design with vertical piston motion, find and recognize variables that significantly influence pumping discharge ( $Q$ ) and analyze and obtain relationships between influential variables studied with  $Q$ . This study was an experimental study in the laboratory using glass channels equipped with a wave generator. The model of a float-type wave pump that moves vertically is simulated with wave height ( $H_i$ ), wave length ( $L$ ), pumping height ( $h$ ), dimensions of the float and tube ( $A_1$  &  $A_2$ ), water depth ( $d$ ), float width ( $b$ ), buoy weight ( $W$ ), wave period ( $T$ ) and water density ( $\rho$ ), both to get the effect of each on discharge ( $Q$ ), and to find the relationship formula between parameters, the function of these parameters is  $Q = f(H_i, L, h, A_1, A_2, d, b, W, T, \rho)$ . The results showed that the performance of the vertical motion pump was satisfactory by producing a discharge ( $Q$ ) at a certain value of  $h$ . The resulting pumping discharge ( $Q$ ) is significant because it is influenced by a combination of dimensionless parameters, namely:  $H_i/L$ ,  $b/L$ ,  $h/H_i$ ,  $d/L$  and  $W/\rho H_i^2 A_2$ . An empirical equation has been found that relates the pumping discharge ( $Q$ ) with all influential parameters and a wave pump design with a vertical piston motion has been produced for use in actual conditions.

**Keywords:** Discharge, pumping height, wave pump, vertical motion buoy

The image shows two handwritten signatures in blue ink. The signature on the left is a stylized, cursive name. The signature on the right is also cursive and includes a period at the end.

## DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA .....	iii
PRAKATA.....	iv
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT .....	ix
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR NOTASI .....	xvii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN .....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah Penelitian .....	8
C. Maksud dan Tujuan Penelitian .....	8
D. Manfaat Penelitian .....	9
E. Batasan Masalah .....	10
F. Kebaruan Penelitian .....	10
BAB II.....	12
TINJAUAN PUSTAKA .....	12
A. Gelombang .....	12
B. Gelombang Amplitudo Kecil.....	15
C. Persamaan Gelombang.....	17
D. Kecepatan Rambat dan Panjang Gelombang.....	19
E. Klasifikasi Gelombang Menurut Kedalam Relatif.....	21
F. Tekanan Gelombang .....	25
G. Energi dan Tenaga Gelombang .....	25
H. Karakteristik Gelombang .....	30

I. Hukum Dasar Model .....	32
1. Sebangun Geometrik .....	33
2. Sebangun Kinematik.....	34
3. Sebangun Dinamik.....	34
J. Koefisien Seret Gaya Gelombang .....	36
K. Keseimbangan Benda Terapung .....	37
L. Penelitian Terdahulu .....	38
M. Hasil Penelitian Yang Relevan .....	42
N. Pipa dengan Pompa .....	49
O. Bilangan Tak berdimensi .....	51
P. Kerangka Pikir Penelitian.....	52
Q. Parameter Penelitian .....	55
R. Hipotesis Penelitian .....	56
BAB III.....	59
METODE PENELITIAN .....	59
A. Waktu dan Tempat Penelitian .....	59
B. Jenis Penelitian dan Sumber Data .....	59
C. Bahan dan Alat .....	60
D. Variabel Penelitian .....	67
E. Pelaksanaan Studi Model.....	68
F. Pelaksanaan Simulasi .....	75
G. <i>Flow Chart</i> Pelaksanaan Penelitian.....	77
BAB IV .....	78
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	78
A. HASIL .....	78
1. Pengukuran gelombang bangkitan Alat pembangkit Gelombang .....	79
2. Analisis Penerapan Teori Gelombang .....	83
3. Analisis Energi Gelombang.....	84
4. Gerakan vertikal gelombang.....	86
5. Analisis Dimensi Parameter Penelitian .....	87

6. Data Hasil Simulasi .....	91
<b>B. PEMBAHASAN.....</b>	<b>93</b>
1. Analisis hubungan antar parameter.....	93
2. Pengaruh parameter $H_i/L$ , $b/L$ , $W/\gamma H_i^2 A_2$ dan $h/H_i$ terhadap $Q/H_i^2(L/T)$ .....	94
3. Pengaruh parameter kecuraman gelombang $H_i/L$ terhadap debit pemompaan relatif $Q/H_i^2(L/T)$ .....	95
4. Pengaruh lebar pelampung relatif $b/L$ terhadap debit pemompaan relatif $Q/H_i^2(L/T)$ .....	96
5. Pengaruh berat pelampung, berat jenis air, tinggi gelombang dan dimensi pelampung ( $W/\gamma H_i^2 A_2$ ) terhadap debit pemompaan relatif $Q/H_i^2(L/T)$ .....	97
6. Pengaruh tinggi pemompaan relatif $h/H_i$ terhadap debit pemompaan relatif $Q/H_i^2(L/T)$ .....	98
7. Pengaruh kedalaman relatif ( $d/L$ ) terhadap debit pemompaan relatif $Q/H_i^2(L/T)$ .....	99
8. Pengaruh kecuraman gelombang dan lebar pelampung relatif ( $H_i/L \sqrt{b/L}$ ) terhadap debit pemompaan relatif $Q/H_i^2(L/T)$ .....	100
9. Pengaruh bersama berat pelampung, berat jenis air, tinggi gelombang, dimensi pelampung ( $W/\gamma H_i^2 A_2$ ) terhadap debit pemompaan relatif $Q/H_i^2(L/T)$ .....	102
10. Pengaruh bersama berat pelampung, berat jenis air, tinggi gelombang, dimensi pelampung dan tinggi pemompaan relatif ( $h/H_i \sqrt{W/\gamma H_i^2 A_2}$ ) terhadap debit pemompaan relatif $Q/H_i^2(L/T)$ ...	103
11. Pengaruh parameter gabungan ( $\psi$ ) terhadap ( $Q$ ) relatif .....	104
12. Perbandingan Hasil Penelitian Lain .....	106
13. Rancangan Desain Model Pompa Gelombang .....	107
<b>BAB V .....</b>	<b>110</b>
<b>KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>110</b>
A. Kesimpulan.....	110
B. Saran .....	111
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>112</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>116</b>

## DAFTAR TABEL

Nomor urut	halaman
Tabel 1. Hasil penelitian yang relevan.....	42
Tabel 2. Skala Model Penelitian .....	68
Tabel 3. Dimensi rancangan model pompa gelombang.....	70
Tabel 4. Matriks rancangan penelitian $D = 0,02$ m.....	72
Tabel 5. Matriks rancangan penelitian $D = 0,025$ m.....	73
Tabel 6. Matriks rancangan penelitian $D = 0,03$ m.....	74
Tabel 7. Kalibrasi data hasil pengukuran dan data hasil rekaman dari .....	80
Tabel 8. Uji Pendahuluan pada $d = 0,25$ m.....	82
Tabel 9. Uji Pendahuluan pada $d = 0,27$ m.....	82
Tabel 10. Uji Pendahuluan pada $d = 0,29$ m.....	82
Tabel 11. Hasil perhitungan nilai $E$ pada kondisi $d = 0,25$ m.....	85
Tabel 12. Hasil perhitungan nilai $E$ pada kondisi $d = 0,27$ m.....	86
Tabel 13. Hasil perhitungan nilai $E$ pada kondisi $d = 0,29$ m.....	86
Tabel 14. Variabel yang berpengaruh dalam penelitian .....	88
Tabel 15. Penentuan Nilai dari Variabel Bebas .....	89
Tabel 16. Penentuan Parameter Bilangan Tak Berdimensi .....	90
Tabel 17. Data hasil simulasi pada $d = 0,25$ m dengan $h = 0,05$ m ....	92
Tabel 18. Data hasil simulasi pada $d = 0,27$ m dengan $h = 0,05$ m ....	92
Tabel 19. Data hasil simulasi pada $d = 0,29$ m dengan $h = 0,05$ m ...	93
Tabel 20. Dimensi rancangan model pompa gelombang.....	109

Tabel 21. Data hasil simulasi pada $d = 0,25$ m dengan $h = 0,10$ m ...	116
Tabel 22. Data hasil simulasi pada $d = 0,25$ m dengan $h = 0,15$ m ...	116
Tabel 23. Data hasil simulasi pada $d = 0,25$ m dengan $h = 0,20$ m ...	117
Tabel 24. Data hasil simulasi pada $d = 0,25$ m dengan $h = 0,25$ m ...	117
Tabel 25. Data hasil simulasi pada $d = 0,27$ m dengan $h = 0,10$ m ...	118
Tabel 26. Data hasil simulasi pada $d = 0,27$ m dengan $h = 0,15$ m ...	118
Tabel 27. Data hasil simulasi pada $d = 0,27$ m dengan $h = 0,20$ m ...	119
Tabel 28. Data hasil simulasi pada $d = 0,27$ m dengan $h = 0,25$ m ...	119
Tabel 29. Data hasil simulasi pada $d = 0,29$ m dengan $h = 0,10$ m ...	120
Tabel 30. Data hasil simulasi pada $d = 0,29$ m dengan $h = 0,15$ m ...	120
Tabel 31. Data hasil simulasi pada $d = 0,29$ m dengan $h = 0,20$ m ...	121
Tabel 32. Data hasil simulasi pada $d = 0,29$ m dengan $h = 0,25$ m ...	121

## DAFTAR GAMBAR

Nomor urut	halaman
Gambar 1. Sket definisi gelombang (Bambang Triatmodjo, 1999)....	17
Gambar 2. Daerah Penerapan Teori Gelombang Fungsi $H/d$ dan $d/L$	22
Gambar 3. Gerak orbit partikel air di Laut Dangkal, Transisi dan Dalam.....	24
Gambar 4. Distribusi tekanan vertikal gelombang di laut dalam.....	25
Gambar 5. Penurunan energi gelombang (Bambang Triatmodjo, 1999) .....	27
Gambar 6. Sketsa karakteristik gelombang (Nur Yuwono, 1996). ....	31
Gambar 7. Pipa dengan pompa ( <i>Bambang Triatmodjo, 1999</i> ).....	50
Gambar 8. Mekanisme kerja pompa gelombang tipe flap horisontal (l .....	51
Gambar 9. Kerangka Pikir Penelitian.....	54
Gambar 10. Saluran pembangkit gelombang .....	62
Gambar 11. Alat Pembangkit Gelombang ( <i>wave generator</i> ).....	63
Gambar 12. <i>Wave Damper</i> pada ujung saluran gelombang.....	64
Gambar 13. <i>wave probe</i> .....	65
Gambar 14. Tampak atas penempatan model pompa gelombang dalam .....	65
Gambar 15. Tampak samping model pompa gelombang dalam saluran.....	66

Gambar 16. Mistar ukur pada flume .....	66
Gambar 17. Wave oskiloskop monitor yang terhubung ke wave probe .....	67
Gambar 18. Rancangan model pompa gelombang yang digunakan	70
Gambar 19. Flow Chart Pelaksanaan Penelitian.....	77
Gambar 20. Data hasil pengukuran dan data <i>wave oskiloskop</i> monitor .....	80
Gambar 21. Daerah Penerapan Teori Gelombang Fungsi $H/d$ dan $d/L$ .....	84
Gambar 22. Pengaruh masing – masing parameter .....	94
Gambar 23. Hubungan $H_i/L$ dengan $Q/H_i^2(L/T)$ .....	95
Gambar 24. Hubungan $b/L$ dengan $Q/H_i^2(L/T)$ .....	96
Gambar 25. Hubungan $(W/\sqrt{H_i^2 A_2})$ dengan $Q/H_i^2(L/T)$ .....	97
Gambar 26. Hubungan $h/H_i$ dengan $Q/H_i^2(L/T)$ .....	99
Gambar 27. Hubungan $d/L$ dengan $Q/H_i^2(L/T)$ .....	100
Gambar 28. Hubungan $(H_i/L\sqrt{b/L})$ dengan $Q/H_i^2(L/T)$ .....	101
Gambar 29. Hubungan $(W/\sqrt{H_i^2 A_2})$ dengan $Q/H_i^2(L/T)$ .....	102
Gambar 30. Hubungan $(h/H_i\sqrt{W/\sqrt{H_i^2 A_2}})$ dengan $Q/H_i^2(L/T)$ .....	103
Gambar 31. Hubungan $\psi$ dengan $Q/H_i^2(L/T)$ .....	104
Gambar 32. Perbandingan Nilai Tinggi Pemompaan $h$ Terhadap Debit $Q$ .....	106
Gambar 33. Sketsa model pompa gelombang yang dihasilkan .....	108

## DAFTAR NOTASI

$B$	: Lebar bukaan bawah pemusat energi pada breakwater
$B'$	: Lebar bukaan atas pemusat energi pada breakwater
$C$	: Kecepatan rambat gelombang
$d$	: Kedalaman air
$M$	: Model struktur breakwater pemusat energi
$R_c$	: Ketinggian freeboard
$\eta(x,t)$	: Fluktuasi muka air terhadap muka air diam
$g$	: Percepatan gravitasi bumi
$H_i$	: Tinggi gelombang
$H_{max}$	: Tinggi gelombang maximum
$H_{min}$	: Tinggi gelombang minimum
$H_s$	: Tinggi gelombang berdiri
$H_p$	: Tinggi gelombang parsial
$H_r$	: Tinggi gelombang refleksi
$k$	: Bilangan gelombang
$L$	: Panjang gelombang
$E_p$	: Energi potensial gelombang
$E_k$	: Energi kinetik gelombang
$E_t$	: Energi total per satuan panjang gelombang
$E$	: Energi rata-rata gelombang per satuan luas
$P$	: Daya gelombang
$Fr$	: Angka <i>Froude</i> , akar perbandingan antara gaya inersia dan gaya Berat
$n_L$	: skala panjang
$n_h$	: skala tinggi
$L_p$	: ukuran panjang prototipe
$L_m$	: ukuran panjang model
$h_p$	: ukuran tinggi pada prototipe
$h_m$	: ukuran tinggi pada model

$P$	: Transfer energi gelombang rata-rata
$\rho$	: Rapat massa air
$\gamma$	: Berat jenis air
$t$	: Waktu penangkapan gelombang
$T$	: Periode gelombang
$x$	: Jarak penjalaran gelombang
$FG$	: Gaya berat
$FB$	: Gaya Apung
$r$	: Jari-jari/setengah diameter
$h$	: Tinggi tekanan head/Tinggi pemompaan
$Pa$	: Tinggi tekanan piston
$ht$	: Tinggi tabung
$D$	: Diameter tabung
$Di$	: Diameter inlet
$Do$	: Diameter outlet
$Dw$	: Diameter pelampung
$b$	: Lebar pelampung
$Q_1$	: Debit outlet atas
$Q_2$	: Debit outlet bawah
$Q$	: Debit
$Fu$	: Gaya apung pelampung
$A_1$	: Luas penampang tabung
$A_2$	: Luas penampang pelampung
$W$	: Berat pelampung

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **A. Latar Belakang**

Luas daratan Indonesia hanya sekitar sepertiga dari luas seluruh Indonesia sedangkan dua pertiganya berupa lautan. Indonesia mempunyai wilayah yang sangat luas yang membentang dari barat ke timur sepanjang 5.110 km dan membujur dari utara ke selatan sepanjang 1.888 km. Dengan wilayah seluruhnya mencapai 5.193.252 km<sup>2</sup> yang terdiri atas 1.890.754 km<sup>2</sup> luas daratan dan 3.302.498 km<sup>2</sup> luas lautan. Dengan perbandingan itu Indonesia dijuluki sebagai negara maritim atau negara kelautan.

Laut menutupi sekitar 70% permukaan Bumi. Dengan sendirinya, laut bisa menjadi sumber energi terbarukan terbesar. Pemanfaatan sumber energi terbarukan di dunia diprediksi meningkat dari 25% pada 2017 menjadi 85% di tahun 2050. Salah-satu sumber energi yang belum banyak diketahui orang dan punya potensi yang cukup melimpah di Indonesia adalah sumber energi gelombang laut. Sumber energi terbarukan ini banyak dikembangkan oleh negara-negara di eropa, contohnya Portugal, Italia. Energi gelombang laut adalah energi yang dihasilkan dari pergerakan gelombang laut menuju daratan dan sebaliknya. Energi gelombang laut memiliki beberapa keunggulan yaitu densitas energi yang besar, penjaralan gelombang yang konsisten dan

dapat diprediksi, serta dampak lingkungan yang sangat kecil. Gelombang laut umumnya terbentuk secara alami karena adanya angin yang berhembus pada permukaan laut. Bila digambarkan secara rinci, gelombang selalu dimulai sebagai riak kecil, tetapi ukurannya bertambah karena masukan energi yang berkelanjutan dari angin. Angin timbul akibat adanya perbedaan tekanan sebagai respon dari perbedaan suhu udara oleh panas matahari. Menurut BMKG, angin yang bergerak dari wilayah selatan Indonesia mencapai 8-25 knots. Asalkan angin terus bertiup maka gelombang mencapai batas, setelah itu gelombang tidak dapat terus tumbuh karena kehilangan energi dan pecah untuk menyeimbangkan masukan energi dari angin.

Kecepatan angin ini terpantau oleh BMKG tertinggi di perairan utara Sabang, perairan selatan Banten, Selat Sunda bagian selatan, Laut Jawa dan Laut Arafuru bagian timur. Hal ini membentuk gelombang yang cukup berenergi. Pada bagian barat pulau sumatera dan pantai selatan jawa tercatat memiliki potensi energi gelombang laut mencapai 40 kW/m. Data terkait gelombang laut biasanya dikumpulkan oleh stasiun cuaca, *ocean buoys*, dan satelit. Sebagian besar data ini memiliki resolusi grid sekitar 20 km kali 20 km yang membuatnya sesuai untuk menilai. Sementara itu, sifat gelombang bervariasi ketika batimetri berubah dengan cepat dari daerah lepas pantai ke area pantai. Pemanfaatan energi gelombang laut bisa menjadi solusi untuk membangun wilayah pesisir khususnya untuk pulau-pulau terpencil dengan jangkauan listrik yang sulit. Pemanfaatan

energi gelombang laut dapat sangat menguntungkan namun masih perlu banyak penelitian terkait perangkat WEC dan wilayah yang berpotensi menghasilkan energi yang maksimal.

Gelombang yang ada di samudera tersimpan potensi energi baru terbarukan yang sangat besar, energi yang dihasilkan pun ramah lingkungan. Tidak hanya gelombang, energi baru terbarukan juga dapat dihasilkan dari pasang surut air laut, energi yang timbul akibat perbedaan suhu permukaan air dengan dasar laut (*Ocean Thermal Energy Conversion/OTEC*) dan energi arus laut. Dengan luas lautan yang mencapai 5,8 juta Km<sup>2</sup> (perhitungan secara kartografis) Indonesia memiliki potensi sumber energi alternatif berbasis gelombang laut yang sangat melimpah. Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan (P3GL), Subaktian Lubis et al. dalam penelitiannya memaparkan bahwa sumber energi gelombang laut dapat dimanfaatkan dengan mengetahui tinggi, panjang dan periode waktu gelombang. Untuk menangkap energi gelombang tersebut dapat dilakukan dengan tiga cara, menggunakan pelampung, kolom air yang berosilasi (*oscillating water column*), dan *wave surge*. Pemanfaatan potensi energi gelombang ini akan memberikan beberapa keuntungan. Selain merupakan energi bebas (tidak perlu bahan bakar) dan dapat diperbaharui, gelombang juga dapat menghasilkan energi yang besar dan murah, energi gelombang laut ini memberikan ketersediaan hingga mencapai 90% dengan kawasan tidak terbatas selama ada ombak, maka energi listrik bisa didapat. Untuk

memprediksi daya yang dapat dibangkitkan di pantai dilakukan dengan memanfaatkan data angin, karena angin yang bertiup dipermukaan laut merupakan faktor utama timbulnya gelombang, angin yang berhembus dipermukaan akan memindahkan energinya ke air semakin lama dan semakin kuat angin berhembus maka semakin besar gelombang terbentuk. Kecepatan angin minimum yang dapat membangkitkan gelombang yaitu sekitar 10 knot (5 m/det) dan untuk mengkonversi tinggi dan periode gelombang dipergunakan persamaan gelombang untuk perairan dangkal.

Energi merupakan kebutuhan dasar manusia yang tidak dapat dihindari ketercukupannya, dan sangat nyata mempengaruhi kelangsungan hidup suatu bangsa di masa sekarang dan masa yang akan datang. Energi yang bersumber dari energi fosil semakin langka. Oleh karena itu, pilihan yang paling rasional untuk ditempuh dalam mengatasi krisis energi nasional adalah dengan memperkuat kebijakan ketahanan energi melalui pengembangan dan pemanfaatan energi baru dan terbarukan. Untuk memenuhi kebutuhan energi nasional pemerintah perlu memperkuat kebijakan ketahanan energi melalui pengembangan energi baru terbarukan guna mengatasi krisis energi nasional. Pengembangan energi baru terbarukan merupakan langkah yang harus dilaksanakan untuk menghindari krisis energi dan ancaman bagi ketahanan energi nasional kita. Saat ini perkembangan energi di Indonesia masih menitikberatkan pada energi berbasis fosil (minyak bumi, gas alam dan

batubara). Energi terbarukan tersebut lebih sesuai dengan potensi lokal di tanah air, lebih ramah lingkungan, lebih berkelanjutan dalam jangka panjang.

Energi alternatif merupakan sumber energi terbarukan yang akan selalu tersedia, contohnya seperti matahari, angin, air, biomasa, dan panas bumi. Tidak seperti minyak bumi atau batubara merupakan energi fosil yang bisa habis. Selain itu dalam jangka waktu panjang, energi alternatif tidak menghasilkan limbah yang akan membahayakan lingkungan. Apabila biaya produksi tidak menjadi prioritas, maka energi ini tidak perlu dibeli, karena hanya membutuhkan biaya untuk instalasi, yang kemudian dapat dioperasikan tanpa menggunakan bahan bakar. Hal ini tentu saja berbeda dengan pembangkit berbahan bakar fosil dalam pengoperasiannya memerlukan biaya yang cukup besar. Energi air merupakan sumber energi yang murah dan relatif mudah didapat. Energi listrik dan mekanis merupakan wujud pemanfaatan energi air. Energi yang dimiliki air dapat dimanfaatkan dan digunakan dalam wujud energi mekanis maupun energi listrik. Energi yang masuk dalam kategori energi air adalah energi sungai, energi ombak, energi panas laut (OTEC), energi pasang surut air laut, dan energi arus laut.

Berdasarkan wilayah dan karakteristik pantai yang terdapat di wilayah Indonesia wilayah yang paling berpotensi terdapat di wilayah Bali dengan memanfaatkan gelombang laut dan Nusa Tenggara Timur dengan memanfaatkan arus laut. Dan untuk potensi energi panas laut saat ini

masih dalam tahap penelitian karena untuk energi panas laut ini sangat membutuhkan biaya dan memakan waktu yang lama sehingga membutuhkan beberapa uji coba dan pencocokan teknologi yang digunakan. Sedangkan untuk gelombang laut, kekuatan gelombang bervariasi di setiap lokasi, daerah samudera Indonesia sepanjang pantai selatan Jawa sampai Nusa Tenggara adalah lokasi yang memiliki potensi energi gelombang cukup besar berkisar antara 10/20 kW/meter gelombang. Beberapa penelitian menyimpulkan bahwa energi gelombang di beberapa titik di Indonesia mencapai 70 kW/m. Pantai barat Pulau Sumatera bagian selatan dan pantai selatan Pulau Jawa bagian barat juga berpotensi memiliki energi gelombang laut sekitar 40 kW/m. Potensi energi air laut belum banyak diketahui masyarakat pada umumnya sebagai potensi energi baru terbarukan dimana potensi energi gelombang laut dan samudera dapat dimanfaatkan dan menghasilkan energi listrik.

Gelombang atau ombak adalah salah satu bentuk energi yang dapat dimanfaatkan. Energi ini merupakan energi terbarukan yang artinya energi yang tidak akan habis seperti energi fosil. Bila sebuah pelampung diletakan diatas gelombang, maka pelampung tersebut akan bergerak naik turun sesuai dengan gerakan ombak. Gerakan naik turun ini merupakan salah satu faktor yang dapat menghasilkan energi. Faktor lain yang mempengaruhi energi ombak selain gerakan naik turun adalah kecepatan naik turun dan tingginya naik turun tersebut. Agar energi yang terdapat dalam ombak itu dapat dimanfaatkan, maka energi tersebut harus di ubah

menjadi energi bentuk lain seperti energi listrik atau tenaga isap maupun tekan. Untuk mengubah energi gelombang ke energi listrik dan tenaga isap maupun tekan dibutuhkan satu alat yaitu generator listrik dan pompa piston.

Pemanfaatan energi gelombang laut telah dilakukan dengan mengembangkan alat penangkap energi gelombang berupa pompa tenaga gelombang dan generator linier magnetik. Pompa tenaga gelombang dengan papan osilasi sebagai penangkap energi gelombang berfungsi untuk menaikkan air laut ke tempat yang lebih tinggi, dengan tujuan memanfaatkan air laut untuk kepentingan masyarakat sekitar pantai yang bekerja dibidang budidaya ikan laut.

Selain itu pada pompa air yang ada sekarang ini umumnya digerakkan dengan menggunakan tenaga listrik tergantung dari kapasitas pompa dan besarnya tegangan listrik sedangkan untuk pompa tenaga gelombang besarnya tenaga pompa yang berefek terhadap besarnya debit aliran air terganggu dari besarnya gelombang dan tingginya daerah lokasi kontribusi air dari muka air laut.

Untuk itu akan dikaji penggunaan model pompa gelombang yang bergerak secara vertikal dengan menggunakan pelampung dengan pertimbangan bahwa penempatan model pompa gelombang tersebut dapat menaikkan air sampai ketinggian tertentu melalui pipa outlet untuk dimanfaatkan masyarakat baik untuk memutar turbin listrik maupun kebutuhan irigasi tambak.

## **B. Rumusan Masalah Penelitian**

Rumusan masalah yang berkaitan dengan penelitian ini adalah :

1. Bagaimana menghasilkan rancangan pompa gelombang dengan piston gerak vertikal.
2. Bagaimana menemukan pengaruh variabel gelombang, perairan dan pompa.
3. Bagaimana mendapatkan hubungan dalam bentuk persamaan empirik antara variabel berpengaruh dari gelombang, perairan dan pompa dengan besaran debit ( $Q$ ) yang dihasilkan.

## **C. Maksud dan Tujuan Penelitian**

Maksud penelitian ini adalah memberikan solusi pemanfaatan potensi energi gelombang sebagai salah satu energi yang terbarukan , murah dan ramah lingkungan. Tujuan penelitian ini secara umum memberikan solusi berupa inovasi teknologi model pompa gelombang dengan menggunakan pelampung yang bergerak secara vertikal. Tujuan khusus meliputi :

1. Menghasilkan rancangan pompa gelombang dengan piston gerak vertikal.
2. Menemukan pengaruh variabel gelombang, perairan dan pompa.
3. Mendapatkan hubungan dalam bentuk persamaan empirik antara variabel berpengaruh dari gelombang, perairan dan pompa dengan besaran debit ( $Q$ ) yang dihasilkan.

#### **D. Manfaat Penelitian**

Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan yang signifikan bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK), dan juga dapat memberikan masukan atau perbaikan guna melengkapi penelitian-penelitian sejenis.

Secara garis besar manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai bahan acuan dan informasi dalam mengembangkan kinerja pemompaan air laut yang mampu menghasilkan debit lebih besar pada ketinggian tertentu yang dapat menaikkan air laut ke daratan sehingga dapat dimanfaatkan untuk memutar turbin listrik, irigasi tambak sesuai dengan yang diharapkan.
2. Membantu menjawab permasalahan pemanfaatan energi gelombang laut dan mengembangkan model pompa gelombang yang hemat material dan ramah lingkungan.
3. Memberikan acuan konsep dan perencanaan model pompa gelombang tipe pelampung yang bergerak secara vertikal di lapangan.
4. Memberi sumbangan terhadap ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya yang berkaitan dengan rekayasa pompa gelombang.
5. Sebagai wahana bagi penulis untuk menggali dan mendapatkan ilmu pengetahuan baru dibidang ilmu teknik sipil khususnya teknik pantai.

### **E. Batasan Masalah**

Berhubung penelitian ini sangat luas dan kompleks serta penelitian ini dapat berjalan dengan baik dan mencapai sasaran yang diinginkan, maka penelitian ini dibatasi pada :

1. Penelitian ini di lakukan pada saluran kaca dengan menggunakan alat pembangkit gelombang yang mempunyai panjang, lebar dan tinggi disesuaikan dengan model saluran yang ada di laboratorium.
2. Arah datang gelombang tegak lurus terhadap struktur.
3. Gelombang yang dibangkitkan adalah gelombang dengan kondisi belum pecah.
4. Gelombang air yang terjadi hanya ke arah horizontal (merambat).
5. Fluida yang digunakan adalah air tawar, salinitas dan pengaruh mineral air tidak diperhitungkan.
6. Struktur model dianggap kokoh/ tidak bergeser.
7. Variabel penelitian adalah: periode gelombang ( $T$ ), kedalaman air ( $d$ ), panjang gelombang ( $L$ ), berat jenis air ( $\gamma$ ), berat pelampung ( $W$ ), lebar pelampung ( $b$ ), luas penampang tabung ( $A_1$ ), luas penampang pelampung ( $A_2$ ), tinggi gelombang ( $H_i$ ), tinggi pemompaan ( $h$ ), debit ( $Q$ ).

### **F. Kebaruan Penelitian**

Penelitian ini memberikan temuan baru di bidang rekayasa teknik pantai khususnya teknologi peralatan yang memanfaatkan gerak vertikal gelombang untuk pemompaan air laut.

kebaruan (novelty value) yang dapat diperoleh dari hasil penelitian ini adalah :

1. Menemukan model dan sistem kerja alat pemompaan air laut yang memanfaatkan gerak vertikal bolak balik gelombang.
2. Menemukan variabel yang dominan berpengaruh
3. Menemukan persamaan empirik dan valid yang bisa digunakan untuk rancangan atau desain alat pemompaan air laut pada kondisi lapangan.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Gelombang**

Gelombang di laut dapat dibedakan menjadi beberapa macam yang tergantung pada gaya pembangkitnya. Gelombang tersebut adalah gelombang angin yang dibangkitkan oleh tiupan angin dipermukaan laut, gelombang pasang surut dibangkitkan oleh gaya tarik benda-benda langit terutama matahari dan bulan terhadap bumi, gelombang tsunami terjadi karena letusan gunung berapi atau gempa dilaut, gelombang yang dibangkitkan oleh kapal yang bergerak dan sebagainya.

Diantara beberapa bentuk gelombang tersebut yang paling penting dalam bidang teknik pantai adalah gelombang angin (untuk selanjutnya disebut gelombang) dan pasang surut. Gelombang dapat menimbulkan energi untuk membentuk pantai, menimbulkan arus dan transpor sedimen dalam arah tegak lurus sepanjang pantai, serta menyebabkan gaya-gaya yang bekerja pada bangunan pantai. Gelombang merupakan faktor utama di dalam penentuan tata letak (*layout*) pelabuhan, alur pelayaran, perencanaan bangunan pantai dan sebagainya. Oleh karena itu seorang ahli teknik pantai harus memahami dengan baik karakteristik dan perilaku gelombang baik dilaut dalam, selama penjarannya menuju pantai maupun didaerah pantai dan pengaruhnya terhadap bangunan pantai.

Pasang surut juga merupakan faktor penting karena bisa menimbulkan arus yang cukup kuat terutama didaerah sempit, misalkan diteluk, esturi dan muara sungai. Selain itu elevasi muka air pasang dan air surut juga sangat penting untuk merencanakan bangunan-bangunan pantai. Sebagai contoh, elevasi puncak bangunan pantai ditentukan oleh elevasi muka air pasang untuk mengurangi limpasan air, sementara kedalaman alur pelayaran dan perairan pelabuhan ditentukan oleh muka air surut. Gelombang besar yang datang ke pantai pada saat air pasang bisa menyebabkan kerusakan pantai sampai jauh kedaratan.

Tsunami adalah gelombang yang terjadi karena letusan gunung api atau gempa bumi di laut. Gelombang yang terjadi bervariasi dari 0,5 m sampai 30 m dan periode dari beberapa menit sampai sekitar satu jam. Tinggi gelombang tsunami dipengaruhi oleh konfigurasi dasar laut, selain penjalaran dari tengah laut (pusat terbentuknya tsunami) menuju pantai, tinggi gelombang menjadi semakin besar karena pengaruh perubahan kedalaman laut.

Pada umumnya bentuk gelombang di alam sangat kompleks dan sulit digambarkan secara matematis karena ketidak linieran, tiga dimensi dan mempunyai bentuk random (suatu deret gelombang mempunyai tinggi dan periode berbeda). Beberapa teori yang ada hanya menggambarkan bentuk gelombang yang sederhana dan merupakan pendekatan gelombang alam. Ada beberapa teori dengan berbagai derajat kekompleksan dan ketelitian untuk menggambarkan gelombang di alam,

diantaranya adalah teori Airy, Stokes, Gerstner, Mich, Knoidal dan tunggal. Masing-masing teori tersebut mempunyai batasan keberlakuan yang berbeda. Teori gelombang Airy merupakan gelombang amplitudo kecil, sedangkan teori yang lainnya adalah gelombang amplitudo terbatas (*finite amplitude waves*).

Teori yang paling sederhana adalah teori gelombang linier atau teori gelombang amplitudo kecil, yang pertama kali dikemukakan oleh Airy pada tahun 1845, (Bambang Triatmodjo 1999).

Gelombang mengangkut lebih banyak energi dari pada air ketika bergerak, melakukannya dengan gerakan melingkar. Saat mereka bergerak lebih dekat ke pantai, gelombang kehilangan kedalaman dan gesekan antara dasar laut dan air menciptakan sudut yang semakin curam. Gelombang datang untuk menabrak dengan tabrakan di permukaan atau perlahan-lahan mencuci tanah pantai, gelombang bergerak secara berkelompok, yaitu tidak membentuk satu gelombang sampai mencapai pantai bagian tertinggi dari gelombang disebut puncak dan bagian terendah adalah lembah, ada 4 faktor yang perlu di perhatikan dalam mengidentifikasi gelombang yaitu:

1. Ketinggian gelombang. Ini ditentukan oleh pengukuran vertikal melintasi lembah dan punggung bukit.
2. Panjang gelombang. Ini diukur dengan jarak horizontal antara satu punggung dan punggung lainnya.

3. Periode gelombang. Ini adalah waktu antara kedatangan beberapa punggung bukit berturut-turut ke titik tertentu dan stasioner.
4. Perambatan gelombang. Ini adalah arah di mana gelombang bergerak.

## **B. Gelombang Amplitudo Kecil**

Teori gelombang amplitudo kecil diturunkan berdasarkan persamaan Laplace untuk aliran tak rotasi (*irrotational flow*) dengan kondisi batas di permukaan air dan dasar laut. Kondisi batas di permukaan air didapat dengan meliniarkan persamaan Bernoulli untuk aliran tidak mantap. Penyelesaian persamaan tersebut memberikan potensial kecepatan periodik untuk aliran tak rotasional, potensial kecepatan ini kemudian digunakan untuk menurunkan persamaan dari berbagai karakteristik gelombang seperti fluktuasi muka air, kecepatan dan percepatan partikel, tekanan, kecepatan rambat gelombang dan sebagainya.

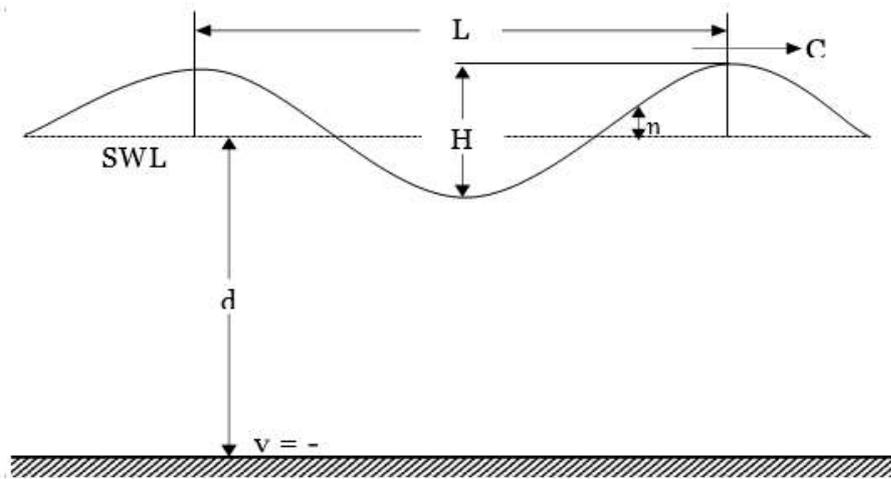
Anggapan-anggapan yang digunakan untuk menurunkan persamaan gelombang adalah sebagai berikut (Bambang Triatmodjo 1999) :

1. Zat cair adalah homogen dan tidak termampatkan, sehingga rapat massa adalah konstan.
2. Tegangan permukaan diabaikan.
3. Gaya coriolis (akibat perputaran bumi diabaikan).
4. Tekanan pada permukaan air adalah seragam dan konstan.

5. Zat cair adalah ideal, sehingga berlaku aliran tak rotasi.
6. Dasar laut adalah horisontal, tetap dan impermeabel sehingga kecepatan vertikal di dasar adalah nol.
7. Amplitudo gelombang kecil terhadap panjang gelombang dan kedalaman air.
8. Gerak gelombang berbentuk silinder yang tegak lurus arah penjarangan gelombang sehingga gelombang adalah dua dimensi.

Asumsi-asumsi ini diberikan agar penurunan teori gelombang amplitudo kecil dapat dilakukan. Untuk menurunkan persamaan gelombang perlu difahami terlebih dahulu definisi dan notasi yang dipergunakan dalam persamaan yang akan diturunkan. Sketsa definisi gelombang dapat digambarkan seperti pada Gambar 1, notasi-notasi selanjutnya yang akan dipergunakan dalam menurunkan persamaan adalah sebagai berikut (Bambang Triatmodjo 1999) :

- $d$  : jarak antara muka air rerata dan dasar laut
- $\eta$  : fluktuasi muka air
- $a$  : amplitudo gelombang
- $H$  : tinggi gelombang =  $2a$
- $L$  : panjang gelombang
- $T$  : periode gelombang
- $C$  : cepat rambat gelombang =  $L/T$
- $k$  : bilangan gelombang =  $2\pi/L$
- $\sigma$  : frekuensi gelombang =  $2\pi/T$



**Gambar 1.** Sket definisi gelombang (Bambang Triatmodjo, 1999)

**C. Persamaan Gelombang**

Teori gelombang amplitudo kecil dapat diturunkan dari persamaan kontinuitas untuk aliran tak rotasi (Persamaan Laplace) yaitu (Bambang triatmodjo 1999) :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \dots\dots\dots 1$$

Dengan :

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad \text{dan} \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \dots\dots\dots 2$$

Kondisi batas di dasar laut dari persamaan tersebut adalah kecepatan vertikal nol.

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \quad \text{di} \quad y = -d \dots\dots\dots 3$$

Kondisi batas pada permukaan diperoleh dari persamaan Bernoulli untuk aliran tak mantap.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (u^2 + v^2) + gy + \frac{p}{\rho} = 0 \dots\dots\dots 4$$

dengan  $g$  adalah percepatan gravitasi,  $p$  adalah tekanan dan  $\rho$  adalah rapat massa zat cair.

Apabila persamaan tersebut dilinierkan, yaitu dengan mengabaikan  $u^2$  dan  $v^2$ , dan pada permukaan  $y=\eta$  serta mengambil tekanan dipermukaan adalah nol (tekanan atmosfer), maka persamaan Bernoulli menjadi :

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{y=\eta} \dots\dots\dots 5$$

dengan anggapan bahwa gelombang adalah kecil terhadap kedalaman, maka kondisi batas di  $y = 0$  adalah kira-kira sama dengan di  $y = \eta$ , dengan anggapan tersebut maka kondisi batas pada permukaan adalah :

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{y=0} \dots\dots\dots 6$$

Jadi persamaan yang diselesaikan adalah sebagai berikut :

Persamaan Laplace (persamaan 1)

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0$$

Kondisi batas persamaan tersebut adalah (persamaan 3) :

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0 \quad \text{di } y = -d$$

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{y=0} \text{ (persamaan 6)}$$

Persamaan tersebut diselesaikan untuk mendapatkan nilai  $\varphi$ .

Berdasarkan nilai  $\varphi$  yang diperoleh maka sifat-sifat gelombang seperti fluktuasi muka air, kecepatan rambat gelombang, kecepatan partikel dan

sebagainya dapat diturunkan. Penyelesaian persamaan diferensial tersebut memberikan hasil sebagai berikut ini.

$$\varphi = \frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \dots\dots\dots 7$$

dengan :

- $\varphi$  : potensial kecepatan
- $G$  : percepatan gravitasi
- $\sigma$  : frekuensi gelombang
- $K$  : angka gelombang
- $d$  : kedalaman
- $y$  : jarak vertikal suatu titik yang ditinjau terhadap muka air diam
- $x$  : jarak horisontal
- $t$  : waktu

#### D. Kecepatan Rambat dan Panjang Gelombang

Komponen vertikal kecepatan partikel pada permukaan air  $v$  adalah

$v = \partial\eta/\partial t$ , dimana  $\eta$  diberikan oleh persamaan (6), sehingga :

$$v = \frac{\partial\eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( -\frac{1}{g} \frac{\partial\varphi}{\partial t} \right) = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} \dots\dots\dots 8$$

Karena  $v = \partial\varphi/\partial y$ , maka persamaan tersebut dapat ditulis :

$$\frac{\partial\varphi}{\partial y} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} \dots\dots\dots 9$$

Apabila nilai  $\varphi$  dari persamaan (7) disubstitusikan ke dalam persamaan (9), maka akhirnya didapat :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \right] &= \frac{1}{g} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ \frac{ag}{\sigma} \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \right] \\ \frac{ag}{\sigma} k \frac{\sinh k(d+y)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) &= -\frac{1}{g} \frac{ag}{\sigma} (-\sigma^2) \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \end{aligned}$$

$$\frac{agk \sinh k (d + y)}{\sigma \cosh kd} \sin(kx - \sigma t)] = a\sigma \frac{\cosh k (d + y)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t)]$$

Untuk gelombang amplitudo kecil, nilai  $y$  di permukaan adalah sama dengan di muka air diam, sehingga  $y = 0$  dan persamaan diatas menjadi :

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \dots\dots\dots 10$$

Oleh karena  $\sigma = kC$ , maka persamaan (10) menjadi :

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd) \dots\dots\dots 11$$

Jika nilai  $k = 2\pi/L$  disubstitusikan ke dalam persamaan (11), didapat :

$$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh(kd) \dots\dots\dots 12$$

Persamaan (12) menunjukkan laju penjalaran gelombang sebagai fungsi kedalaman air ( $d$ ) dan panjang gelombang ( $L$ ).

Jika nilai  $k = \sigma/C = (2\pi/T)/C$  disubsitusikan ke dalam persamaan (11) akan didapat nilai  $C$  sebagai fungsi  $T$  dan  $d$ .

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \dots\dots\dots 13$$

Dengan memasukkan nilai  $k = 2\pi/L$  dan  $C = L/T$  kedalam persamaan (12) akan diperoleh panjang gelombang sebagai fungsi kedalaman.

$$L = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \dots\dots\dots 14$$

Dengan menggunakan persamaan (14), jika kedalaman air dan periode gelombang diketahui, maka dengan metode iterasi (cara coba-banding) akan didapat panjang gelombang  $L$ . Cepat rambat gelombang

dapat diperoleh dengan membagi panjang gelombang yang diperoleh dengan periode gelombang ( $C = L/T$ ). (Bambang Triatmodjo 1999).

### E. Klasifikasi Gelombang Menurut Kedalaman Relatif

Berdasarkan kedalaman relatif, yaitu perbandingan antara kedalaman air  $d$  dan panjang gelombang  $L$  ( $d/L$ ), gelombang dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam yaitu :

1. Gelombang di laut dangkal jika  $d/L \leq 1/20$
2. Gelombang di laut transisi jika  $1/20 < d/L < 1/2$
3. Gelombang di laut dalam jika  $d/L \geq 1/2$

Klasifikasi ini dilakukan untuk menyederhanakan rumus-rumus gelombang. Penyederhanaan ini dapat dijelaskan dengan menggunakan gambar 2. Yang menunjukkan berbagai parameter sebagai fungsi dari kedalaman relatif.

Apabila kedalaman relatif  $d/L$  adalah lebih besar dari 0,5; nilai  $\tanh(2\pi d/L) = 1,0$  sehingga persamaan (13) dan (14) menjadi :

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi} \dots\dots\dots 15$$

Dan

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \dots\dots\dots 16$$

Indeks 0 menunjukkan nilai-nilai tersebut adalah untuk kondisi dilaut dalam. Apabila percepatan gravitasi adalah  $9,81 \text{ m/d}^2$  maka persamaan (16) menjadi :

$$L_0 = 1,56T^2 \dots\dots\dots 17$$

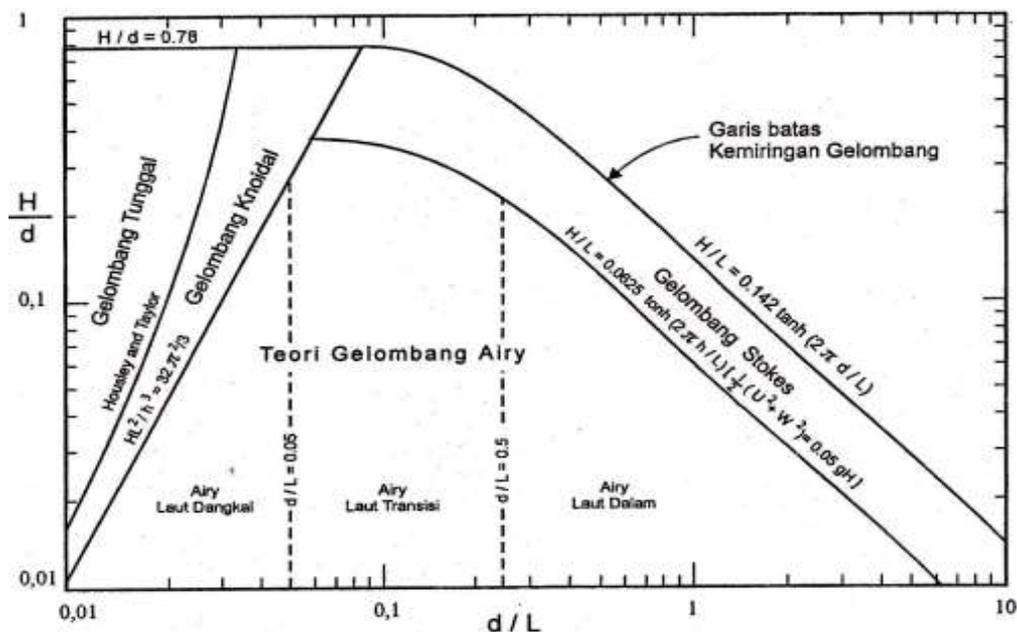
Apabila kedalaman relatif adalah kurang dari 1/20, nilai tanh ( $2\pi d/L$ ) =  $2\pi d/L$  sehingga persamaan (13) dan (14) menjadi :

$$C = \sqrt{gd} \dots\dots\dots 18$$

$$L = \sqrt{gd} T = CT \dots\dots\dots 19$$

Persamaan (18) dan (19) menunjukkan bahwa dilaut dangkal, cepat rambat dan panjang gelombang hanya tergantung pada kedalaman air. Untuk kondisi gelombang dilaut transisi, yaitu jika  $1/20 < d/L < 1/2$ , cepat rambat dan panjang gelombang dihitung dengan menggunakan persamaan (13) dan (14). Apabila persamaan (13) dibagi dengan persamaan (15) atau persamaan (14) dibagi dengan persamaan (16) akan didapat :

$$\frac{C}{C_0} = \frac{L}{L_0} = \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \dots\dots\dots 20$$



**Gambar 2.** Daerah Penerapan Teori Gelombang Fungsi H/d dan d/L (Bambang Triatmodjo, 1999)

Pada gambar 2 menunjukkan penurunan kurva  $\tanh 2\pi d/L$ , yang berarti terjadi pengurangan cepat rambat dan panjang gelombang selama penjarannya dari laut dalam menuju pantai. Apabila kedua ruas persamaan (20) dikalikan dengan  $d/L$  maka didapat :

$$\frac{d}{L_0} = \frac{d}{L} = \tanh \left( \frac{2\pi d}{L} \right) \dots\dots\dots 21$$

Persamaan (21) dapat digunakan untuk menghitung panjang gelombang disetiap kedalaman, apabila panjang gelombang dilaut dalam diketahui.

1. Gelombang Perairan Dalam (*deep water wave*)

Apabila kedalaman relatif  $d/L$  adalah lebih besar dari 0,5; nilai  $\tanh (2\pi d/L) = 1,0$  ditunjukkan pada persamaan (22) dan persamaan (23)

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi} \dots\dots\dots 22$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \dots\dots\dots 23$$

dimana :

- $T$  : periode gelombang [s]
- $g$  : percepatan grafitasi [m/s<sup>2</sup>]
- $d$  : kedalaman air (*still water depth*) [m].

2. Gelombang Perairan Dangkal (*shallow water wave*)

Besarnya cepat-rambat gelombang dan panjang gelombang di perairan dangkal ditunjukkan pada Persamaan (24) dan Persamaan (25).

$$C = \sqrt{gd} \dots\dots\dots 24$$

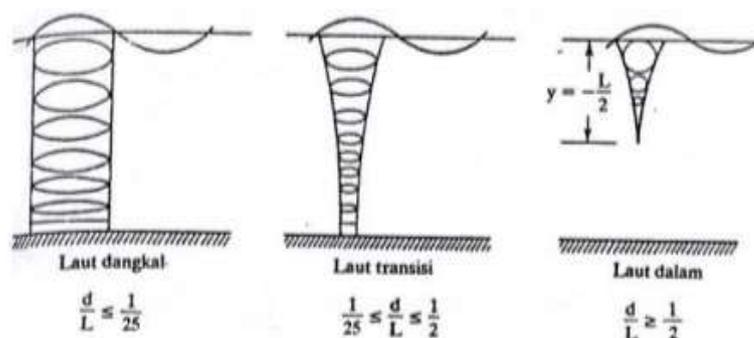
$$L = T\sqrt{gd} \dots\dots\dots 25$$

Dari rumus di atas didapatkan hubungan  $d/L_0$  dan  $d/L$  diuraikan pada persamaan (26) dan (27).

$$\frac{c}{c_0} = \frac{L}{L_0} = \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \dots\dots\dots 26$$

$$\frac{d}{L_0} = \frac{d}{L} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \dots\dots\dots 27$$

Gelombang juga dapat dikelompokkan berdasarkan rasio antara tinggi gelombang dan panjang gelombang. Pada pengelompokan ini dikenal gelombang amplitudo kecil dan gelombang amplitudo berhingga (*Stock, Cnoidal, Solitair*). Gelombang amplitudo kecil dikembangkan oleh Airy sehingga dikenal dengan teori gelombang Airy. Teori gelombang Airy diturunkan berdasarkan anggapan bahwa perbandingan antara tinggi gelombang dengan panjangnya atau kedalamannya sangat kecil, sedangkan teori gelombang amplitudo berhingga memperhitungkan besarnya rasio antara tinggi gelombang terhadap panjang dan kedalaman airnya.



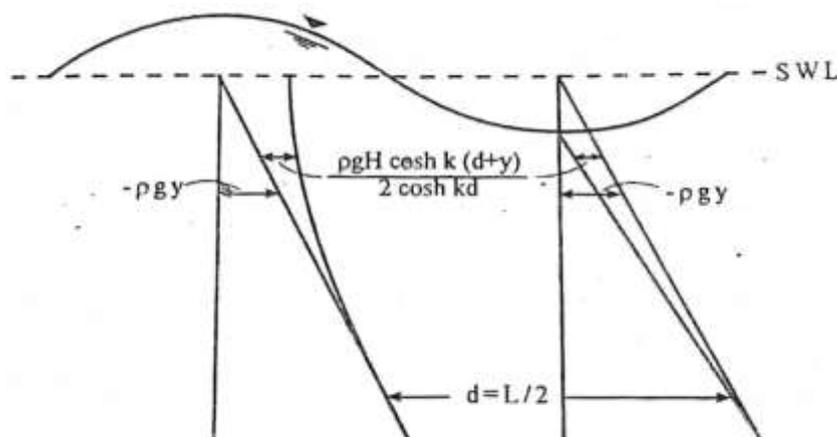
**Gambar 3.** Gerak orbit partikel air di Laut Dangkal, Transisi dan Dalam (Bambang Triatmodjo, 1999)

## F. Tekanan Gelombang

Tekanan yang disebabkan oleh gelombang merupakan gabungan dari tekanan hidrostatik dan tekanan dinamis. Besar tekanan dapat dihitung dengan memasukkan potensial kecepatan yang diberikan oleh persamaan (7) ke dalam persamaan gerak (4) yang telah dilinierkan (Bambang Triatmodjo 1999), yaitu :

$$p = -\rho g y + \left( \frac{\rho g H i}{2} \right) \frac{\cosh k(d+y)}{\cosh kd} \cos(kx - \sigma t) \dots\dots\dots 28$$

Suku pertama pada ruas kanan dari persamaan (28) adalah tekanan hidrostatik, sedangkan suku kedua adalah tekanan dinamis yang disebabkan oleh percepatan partikel. Gambar 3 menunjukkan bentuk tekanan yang ditimbulkan oleh gelombang.



**Gambar 4.** Distribusi tekanan vertikal gelombang di laut dalam

## G. Energi dan Tenaga Gelombang

Energi total gelombang adalah jumlah dari energi kinetik dan energi potensial gelombang. Energi kinetik adalah energi yang disebabkan oleh kecepatan partikel air karena adanya gerak gelombang. Energi potensial

adalah energi yang dihasilkan oleh perpindahan muka air karena adanya gelombang.

Untuk teori gelombang Airy, jika energi potensial ditetapkan relatif terhadap muka air diam dan semua gelombang menjalar dalam arah yang sama, maka komponen energi potensial dan kinetik adalah sama. Untuk menurunkan persamaan energi gelombang dipandang suatu elemen berukuran  $dx$ ,  $dy$ , 1 seperti pada gambar 4. Untuk suatu elemen kecil tersebut besar energi kinetik adalah :

$$dE_k = \frac{1}{2} dmV^2$$

$$= \frac{1}{2} \rho dx dy (u^2 + v^2) \dots\dots\dots 29$$

Energi kinetik total adalah integrasi dari persamaan (29) :

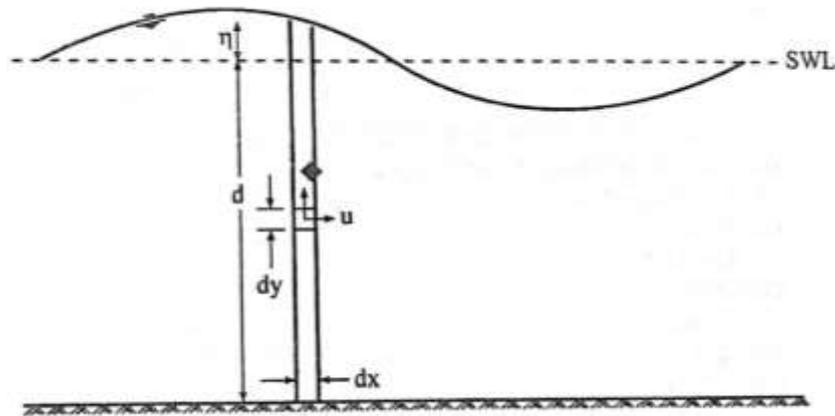
$$E_k \int_0^L \int_{-d}^0 \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) dy dx \dots\dots\dots 30$$

Apabila persamaan (29) dan (30) disubstitusikan akan didapat persamaan

$$E_k = \frac{\rho}{2} \int_0^L \int_{-d}^0 \left[ \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(d+y)}{\sinh kd} \cos(kx - \sigma t) \right]^2$$

$$+ \left[ \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(d+y)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t) \right]^2 dy dx$$

$$E_k = \frac{\rho g H i^2 L}{16} \dots\dots\dots 31$$



**Gambar 5.** Penurunan energi gelombang (Bambang Triatmodjo, 1999)

Apabila energi potensial dari gelombang dikurangi dengan energi potensial dari massa air diam seperti yang ditunjukkan dalam gambar 4, akan didapat energi potensial yang disebabkan oleh gerak gelombang. Dengan menggunakan dasar laut sebagai referensi, energi potensial yang ditimbulkan oleh satu panjang gelombang tiap satu satuan lebar puncak gelombang  $E_p$  adalah :

$$E_p = \int_0^L \rho g (d + \eta) \left( \frac{d + \eta}{2} \right) dx - \rho g L d \left( \frac{d}{2} \right)$$

$$E_p = \frac{\rho g H^2 L}{16} \dots\dots\dots 32$$

Jadi energi kinetik dan potensial adalah sama dan energi total tiap satu satuan lebar adalah :

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho g H^2 L}{8} \dots\dots\dots 33$$

Energi gelombang adalah berubah dari satu titik ke titik yang lain sepanjang satu gelombang dan energi rerata satu satuan luas adalah :

$$E = \frac{E}{L} = \frac{\rho g H i^2}{8} \dots\dots\dots 34$$

Tenaga gelombang adalah energi gelombang tiap satu satuan waktu yang menjalar dalam arah penjaran gelombang. Tenaga dapat ditulis sebagai hasil kali dari gaya yang bekerja pada bidang vertikal yang tegak lurus penjaran gelombang dengan kecepatan partikel melintasi bidang tersebut.

Pemanfaatan energi gelombang laut yang sudah dilakukan oleh McCormick sudah banyak dimanfaatkan dan dikembangkan oleh peneliti lain. Hampir mirip dengan ide dasar McCormick (1981), Silman (2001) mendesain pompa air laut tenaga gelombang, dimana energi gelombang ditangkap melalui flap dan diteruskan oleh piston untuk mendorong air laut yang terdapat dalam tabung piston ke permukaan (Siliman, 2001). Dengan tujuan utamanya pada pemanfaatan energi gelombang untuk mensuplai air laut ke daratan untuk berbagai keperluan seperti untuk irigasi perikanan air asin atau payau dan pemanfatannya untuk tambak udang.

Teknologi penangkap energi gelombang dengan sistem pompa tenaga gelombang pada prinsipnya merupakan transformasi energi gelombang menjadi energi pemompaan yang menghasilkan debit air dan tinggi pemompaan. Transformasi energi ini melalui proses osilasi (Department of the Interior, 2006). Energi gelombang yang ditangkap oleh papan osilasi yang diletakkan vertikal dengan dukungan engsel di dasarnya pada saat flap menerima gaya gelombang, mengakibatkan flap

bergerak maju mundur secara harmonik. Pergerakan papan osilasi tersebut menggerakkan lengan torak yang dipasang tegak lurus dengan papan osilasi pergerakan maju mundurnya lengan torak mengakibatkan klep akan terbuka dan tertutup. Pada saat klep terbuka mengakibatkan air laut masuk dan mengisi tabung piston dan pada saat flap mundur mengakibatkan gaya gelombang diteruskan ke lengan torak dan mendorong piston. Sebagai akibatnya di tabung piston akan terdapat tekanan, yang akan diteruskan ke pipa penyalur untuk memompa air ke atas dengan ketinggian tertentu. Mekanisme ini terjadi berulang-ulang hingga air dalam tabung akan terdorong dan mengalir dengan debit ( $Q$ ) tertentu.

Pada pemanfaatan pompa tenaga gelombang laut ini sebagai pembangkit energi listrik, air laut hasil pemompaan ditampung dalam suatu reservoir pada ketinggian tertentu. Pompa dibangun serial yang terdiri dari banyak unit untuk mensuplai satu reservoir. Selanjutnya dari reservoir air dialirkan ke bawah melalui pipa pesat untuk memutar turbin yang dihubungkan dengan generator.

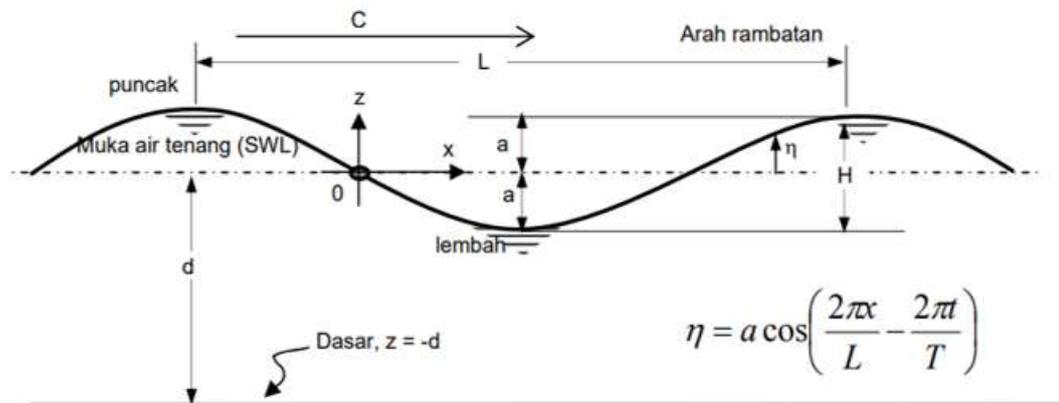
Peralatan pompa gelombang menangkap energi gelombang air laut yang besarnya merupakan total dari energi kinetik dan energi potensial untuk memompa air ke atas. Efisiensi pompa yang merupakan tingkat efektifitas pompa untuk menangkap energi adalah merupakan perbandingan dari energi kinetik air hasil pemompaan terhadap energi gelombang air laut.

## H. Karakteristik Gelombang

Parameter penting untuk menjelaskan gelombang air adalah panjang gelombang, tinggi gelombang dan kedalaman air dimana gelombang tersebut menjalar. Parameter-parameter yang lain seperti pengaruh kecepatan dapat ditentukan dari ketiga parameter pokok diatas. Adapun pengertian dari beberapa parameter diatas, Bambang Triadmodjo (1999) :

- a. Panjang gelombang ( $L$ ) adalah jarak horizontal antara dua puncak atau titik tertinggi gelombang yang berurutan, bisa juga dikatakan sebagai jarak antara dua lembah gelombang.
- b. Periode gelombang ( $T$ ) adalah waktu yang dibutuhkan oleh dua puncak/lembah gelombang yang berurutan melewati suatu titik tertentu.
- c. Kecepatan rambat gelombang (*celerity*) ( $C$ ) adalah perbandingan antara panjang gelombang dan periode gelombang ( $L/T$ ). ketika gelombang air menjalar dengan kecepatan  $C$ . partikel air tidak turut bergerak ke arah perambatan gelombang. Sedangkan sumbu koordinat untuk menjelaskan gerak gelombang berada pada kedalaman muka air tenang.
- d. Amplitudo ( $a$ ) adalah jarak vertikal antara puncak/titik tertinggi gelombang atau lembah/titik terendah gelombang, dengan muka air tenang ( $H/2$ ).

Secara skematik dimensi mengenai karakteristik gelombang dapat dilihat pada gambar 6 :



**Gambar 6.** Sketsa karakteristik gelombang (Nur Yuwono, 1996).

Gelombang terjadi karena hembusan angin di permukaan air. Daerah dimana gelombang dibentuk disebut daerah pembangkitan gelombang (*wave generating area*). Gelombang yang terjadi di daerah pembangkitan disebut 'sea' sedangkan gelombang yang terbentuk diluar daerah pembangkitan disebut 'swell'. Ketika gelombang menjalar, partikel air bergerak dalam suatu lingkaran vertikal kecil dan tetap pada posisinya selagi bentuk dan energi gelombang berjalan maju. Partikel air di permukaan bergerak dalam suatu lingkaran besar dan membentuk puncak gelombang di puncak lingkaran dan lembah gelombang pada lintasan terendah. Di bawah permukaan, air bergerak dalam lingkaran-lingkaran yang makin kecil sampai pada kedalaman lebih besar dari setengah panjang gelombang.

Pada saat gelombang bergerak menuju ke garis pantai (*shoreline*), gelombang mulai bergesekan dengan dasar laut dan menyebabkan pecahnya gelombang ditepi pantai. Hal ini juga dapat terjadi pengaruh

pada garis pantai dan bangunan yang ada disekitarnya. Keenam peristiwa tersebut adalah :

- a. Refraksi gelombang yakni peristiwa berbeloknya arah gerak puncak gelombang.
- b. Difraksi gelombang yakni peristiwa berpindahnya energi di sepanjang puncak gelombang ke arah daerah yang terlindung.
- c. Refleksi gelombang yakni peristiwa pemantulan energi gelombang yang biasanya disebabkan oleh suatu bidang bangunan di lokasi pantai.
- d. *Wave shoaling* yakni peristiwa membesarnya tinggi gelombang saat bergerak ke tempat yang lebih dangkal.
- e. *Wave damping* yakni peristiwa tereduksinya energi gelombang yang biasanya disebabkan adanya gaya gesekan dengan dasar pantai.
- f. *Wave breaking* yakni peristiwa pecahnya gelombang yang biasanya terjadi pada saat gelombang mendekati garis pantai (*surf zone*).

#### **I. Hukum Dasar Model**

Konsep dasar pemodelan dengan bantuan skala model adalah membentuk kembali masalah atau fenomena yang ada di prototipe dalam skala yang lebih kecil, sehingga fenomena yang terjadi di model akan sebangun (mirip) dengan yang ada di prototipe. Kesebangunan yang dimaksud adalah berupa sebangun geometrik, sebangun kinematik dan sebangun dinamik (*Nur Yuwono, 1996*).

Hubungan antara model dan prototipe diturunkan dengan skala, untuk masing-masing parameter mempunyai skala tersendiri dan

besarannya tidak sama. Skala dapat didefinisikan sebagai rasio antara nilai yang ada di prototipe dengan nilai parameter tersebut pada model.

#### 1. Sebangun Geometrik

Sebangun geometrik adalah suatu kesebangunan dimana bentuk yang ada di model sama dengan bentuk prototipe tetapi ukuran bisa berbeda. Perbandingan antara semua ukuran panjang antara model dan prototipe adalah sama. Ada dua macam kesebangunan geometrik, yaitu sebangun geometrik sempurna (tanpa *distorsi*) dan sebangun geometrik dengan distorsi (*distorted*). Pada sebangun geometrik sempurna skala panjang arah horisontal (skala panjang) dan skala panjang arah vertikal (skala tinggi) adalah sama, sedangkan pada *distorted* model skala panjang dan skala tinggi tidak sama. Jika memungkinkan sebaiknya skala dibuat tanpa distorsi, namun jika terpaksa, maka skala dapat dibuat distorsi. Sebangun geometrik dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$n_L = \frac{L_p}{L_m} \dots\dots\dots 35$$

$$n_h = \frac{h_p}{h_m} \dots\dots\dots 36$$

Dengan :

- $n_L$  = skala panjang
- $n_h$  = skala tinggi
- $L_p$  = ukuran panjang prototipe
- $L_m$  = ukuran panjang model

$h_p$  = ukuran tinggi pada prototipe

$h_m$  = ukuran tinggi pada model

## 2. Sebangun Kinematik

Sebangun kinematik adalah kesebangunan yang memenuhi kriteria sebangun geometrik dan perbandingan kecepatan dan percepatan aliran di dua titik pada model dan prototipe pada arah yang sama adalah sama besar. Pada model tanpa distorsi, perbandingan kecepatan dan percepatan pada semua arah adalah sama, sedangkan pada model dengan distorsi perbandingan yang sama hanya pada arah tertentu saja, yaitu pada arah vertikal atau horisontal. Oleh sebab itu pada permasalahan yang menyangkut tiga dimensi sebaiknya tidak menggunakan *distorted* model. Skala kecepatan diberi notasi  $n_u$ , skala percepatan  $n_a$ , dan skala waktu  $n_T$  didefinisikan sebagai berikut :

$$n_u = \frac{u_p}{u_m} = \frac{n_L}{n_T} \dots\dots\dots 37$$

$$n_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{n_L}{n_T^2} \dots\dots\dots 38$$

$$n_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{n_L^3}{n_T} \dots\dots\dots 39$$

$$n_T = \frac{T_p}{T_m} \dots\dots\dots 40$$

## 3. Sebangun Dinamik

Sebangun dinamik adalah kesebangunan yang memenuhi kriteria sebangun geometrik dan kinematik, serta perbandingan gaya-gaya yang

bekerja pada model dan prototipe untuk seluruh pengaliran pada arah yang sama adalah sama besar. Gaya-gaya yang dimaksud adalah gaya inersia, gaya tekanan, gaya berat, gaya gesek, gaya kenyal dan tegangan permukaan.

Beberapa sebangun dinamik yaitu sebangun dinamik Reynold (*Reynold number*) yang diekspresikan sebagai perbandingan gaya inersia terhadap gaya gesek, sebangun dinamik froude (*froude number*) yaitu perbandingan gaya inersia dan gaya gravitasi, bilangan Cauchy (*Cauchy Number*) yaitu perbandingan gaya inersia dan gaya elastik serta bilangan Weiber (*Weiber Number*) yaitu perbandingan antara gaya inersia dan gaya tegangan permukaan. Untuk penelitian refleksi dan transmisi gelombang terhadap gelombang yang merambat melalui pemecah gelombang terapung banyak dipengaruhi gaya gravitasi sehingga digunakan kesebangunan Froud. Dengan pertimbangan fasilitas yang ada di laboratorium, maka pada penelitian ini, akan menggunakan skala panjang yang sama dengan skala tinggi (*undistorted models*) dan menggunakan kesebangunan Froude.

$$F_r = \frac{(\rho L^3)(U^2 / L)}{\rho g L^3} = \frac{U^2}{gL} \dots\dots\dots 41$$

Dengan demikian bila gaya gravitasi memegang peranan penting dalam permasalahan, maka perbandingan gaya inersia dan gaya gravitasi pada model dan prototipe harus sama.

$$n_{F_r} = \frac{n_U}{n_{L^{0,5}}} \dots\dots\dots 42$$

$$n_{F_r} = \frac{F_{r_p}}{F_{r_m}} = 1 \dots\dots\dots 43$$

Oleh karena digunakan model tanpa distorsi, maka skala panjang gelombang  $n_L$ , skala panjang struktur  $n_B$ , skala kedalaman  $n_d$  dan skala sarat  $n_s$  adalah sama seperti berikut :

$$n_L = n_B = n_H = n_d = n_s \dots\dots\dots 44$$

Sedangkan skala waktu  $n_T$  dan skala gravitasi ditulis seperti berikut:

$$n_T = n_L^{1/2} \dots\dots\dots 45$$

$$n_g = 1$$

## J. Koefisien Seret Gaya Gelombang

Sabaruddin rahman (2008) melakukan penelitian laboratorium melalui uji model fisik yang bertujuan untuk mengetahui nilai koefisien gaya seret pada APO oleh gelombang. Koefisien gaya seret yang diperoleh dari penelitian ini dapat digunakan untuk menghitung besarnya gaya gelombang pada APO skala prototipe. Gaya gelombang tersebut merupakan dasar pada perencanaan APO baik untuk konstruksi maupun stabilitasnya. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui besarnya koefisien gaya pada APO. Koefisien seret dan koefisien inersia diperoleh untuk susunan dua, tiga dan lima silinder yang diletakkan secara vertikal di saluran pembangkit gelombang.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter variabel non dimensi  $2ak$  berpengaruh pada besarnya gaya gelombang. Pengaruh kerapatan

antar tiang silinder terhadap besarnya gaya yang terjadi telah diteliti oleh Laird dan Warren, Rain dan Chakrabarti, Sarpkaya, dan Loken (Chakrabarti, 1987). Koefisien seret dan koefisien inersia diperoleh untuk susunan dua, tiga dan lima silinder yang diletakkan secara vertikal di saluran pembangkit gelombang.

Gaya gelombang pada silinder dapat dihitung dengan tiga cara yaitu menggunakan persamaan Morison, teori Froude-Krylov dan teori difraksi. Persamaan Morison mengasumsikan gaya gelombang terdiri dari gaya inersia dan gaya seret yang dijumlahkan secara linier.

$C_D$  adalah koefisien gaya seret;  $C_M$  koefisien gaya inersia;  $\rho$  massa jenis zat cair;  $\mu$  kecepatan partikel zat cair;  $D_v/D_u$  percepatan partikel zat cair;  $A$  luas penampang benda tegak lurus arah gelombang dan  $V$  adalah volume benda yang tercelup pada zat cair.

Hasil penelitian Sabaruddin rahman (2008) yaitu : Mendapatkan nilai koefisien seret ( $C_D$ ) yaitu;  $C_D = 9,14$ . Luas proyeksi bangunan tegak lurus terhadap arah gelombang adalah  $20 \text{ m}^2$  , sehingga dengan gaya gelombang dapat dihitung dan diperoleh gaya gelombang sebesar  $113,36 \text{ kN}$ .

#### **K. Keseimbangan Benda Terapung**

Benda yang terendam di dalam zat cai mengalami tekanan pada permukaannya. Komponen horisontal gaya tekanan yang bekerja pada benda adalah sama tetapi berlawanan arah sehingga saling menghilangkan. Gaya tekanan vertikal yang bekerja pada benda yang

terendam tidak saling meniadakan. Komponen gaya vertikal kebawah ditimbulkan oleh zat cair bekerja pada permukaan atas benda, sedangkan komponen ke atas bekerja pada permukaan bawah benda. Karena tekanan tiap satuan luas bertambah dengan kedalaman, maka komponen arah ke atas adalah lebih besar dari komponen arah ke bawah dan resultannya adalah gaya ke atas yang bekerja pada benda. Gaya ke atas ini disebut dengan gaya apung. Benda terapung seperti kapal, pelampung dan sebagainya menggunakan prinsip benda terapung.

Selain mengalami gaya apung dengan arah ke atas, benda juga mempunyai gaya berat ke bawah. Oleh karena kedua gaya tersebut bekerja dalam arah yang berlawanan, maka harus dibandingkan besar kedua gaya tersebut. Apabila gaya berat lebih besar dari gaya apung, benda akan terapung.

#### **L. Penelitian Terdahulu**

Beberapa penelitian sebelumnya yang relevan antara lain Masjono Muchtar et al, 2016 melakukan penelitian uji model laboratorium *Kinerja Model Fisik Konverter Energi Ombak Rangkaian Gear Searah pada Periode Ombak yang Bervariasi* melakukan penelitian pada kedalaman air 25 cm, tinggi ombak antara 5 – 9 cm dan periode ombak antara 1,2 – 2,2 detik. Hasil pengukuran energi berdasarkan kecepatan putaran (RPM) dan torsi (Nm) poros plywheel yang dihasilkan model fisik konverter ombak menunjukkan bahwa semakin panjang periode ombak maka energi yang dihasilkan semakin kecil. Dengan kata lain, panjang periode berbanding

terbalik dengan besarnya energi ombak yang ditangkap konverter, dengan trendline  $y = -85,598x + 208,53$  dan tingkat keeratan hubungan  $R^2 = 0,8881$ . Y adalah energi yang dihasilkan (watt) dan X adalah periode ombak (detik). Masjono Muchtar et.al, 2015 melakukan penelitian uji model laboratorium *Kajian Refleksi Gelombang Pada Bangunan Multi Fungsi Pelindung Pantai dan Pembangkit Listrik* dengan parameter-parameter yang berpengaruh terhadap besarnya refleksi gelombang pada pemecah gelombang sisi miring adalah periode gelombang ( $T$ ), tinggi gelombang datang ( $H_i$ ), tinggi freeboard ( $R_c$ ), dan kemiringan sisi depan struktur ( $\tan \theta$ ), pengaruh Iribaren terhadap Koefisien refleksi ( $K_r$ ) diperoleh hubungan, dimana nilai Koefisien refleksi semakin besar diikuti dengan semakin besar nilai Iribaren. Untuk pengaruh kemiringan model terhadap nilai Iribaren, Nilai ( $K_r$ ) bertambah besar dengan semakin kecilnya sudut ( $\theta$ ) model. Silman Pongmanda et.al, 2001 melakukan penelitian laboratorium tentang *Pompa air laut energi gelombang tipe flap* dengan parameter riset: tinggi gelombang ( $H_i$ ), periode gelombang ( $T$ ), kedalaman air ( $d$ ), tinggi head ( $h_e$ ) dan debit yang dihasilkan ( $Q$ ), hasil dari penelitian tersebut yaitu : debit ( $Q$ ) yang dihasilkan dipengaruhi oleh tinggi gelombang ( $H_i$ ), periode gelombang ( $T$ ), kedalaman air ( $d$ ), tinggi head ( $h_e$ ) dan simpangan flap ( $S$ ). Debit yang dihasilkan akan semakin besar jika tinggi gelombang semakin besar, periode gelombang semakin kecil dan head semakin kecil. I Putu Samskerta et.al, 2011 melakukan penelitian tentang *Pemanfaatan energi gelombang laut dengan pompa*

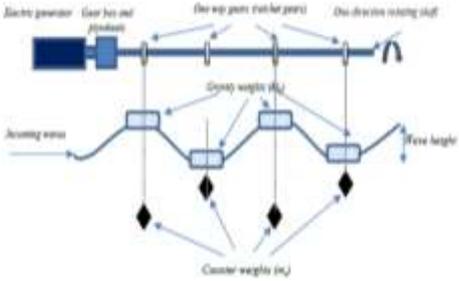
*gelombang flap horizontal* dimana Tinggi dan debit pemompaan yang dihasilkan oleh pompa dipengaruhi oleh fungsi tinggi gelombang ( $H_0$ ), kedalaman ( $h$ ), ketinggian pemompaan ( $z$ ), periode gelombang ( $T$ ), panjang lintasan piston ( $s$ ) dan simpangan pompa ( $D$ ). Almaarif Fahrey Nuh et.al, 2016 dalam penelitiannya tentang Studi eksperimental energi listrik yang dihasilkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan metode *cantilever piezoelectric* hasil dari penelitian tersebut yaitu semakin tinggi amplitudo gelombang, semakin tinggi pula nilai voltase bangkitannya dan nilai arus yang dibangkitkan, sehingga semakin tinggi pula nilai daya bangkitannya. Budi Haryanto et.al, 2003 melakukan penelitian tentang optimasi pompa air laut energi gelombang, hasil dari penelitiannya yaitu kebocoran model pompa dapat sangat dikurangi pada  $H_i/h_e = 0,1$ , efisiensi penyaluran volume ( $n_v$ ) pompa mencapai  $\pm 80\%$  untuk  $z/d = 0,50$  serta  $\pm 70\%$  untuk  $z/d = 0,45$ . Berat katup bola  $w = 0,93$  dan simpangan bola katup  $y_k = 0,14$  memberikan efisiensi pompa ( $n_v$ ) paling optimal. Pompa air laut energi gelombang tipe flap dapat digunakan untuk memompa air laut ke daratan dengan keuntungan lebih, tanpa bahan bakar dan bebas polusi. Juventus Welly Ginting et.al, 2018 dengan penelitiannya tentang Kinerja prototipe papan osilasi pada pompa flap tenaga gelombang untuk pemanfaatan mata air di pantai banyu asri, Kota Singaraja – Bali, hasil dari penelitiannya yaitu Saat pergerakan papan osilasi yang mendorong air tawar dari mata air ke darat terjadi pada saat muka air laut rata-rata ( $MSL = Mean Sea Level$ ), oleh

karena itu pompa dapat mengalirkan air tawar efektif selama 12 jam dalam sehari diakibatkan karena tipe pasang surut di perairan Pantai Banyu Asri-Singaraja merupakan tipe semi diurnal (2 kali pasang, 2 kali surut), Dari hasil pengamatan tinggi gelombang yang mampu menggerakkan papan osilasi hingga mengalirkan air tawar mulai dari tinggi ( $H_i$ ) : 10 cm, dalam hal ini kondisi perairan pantai Banyu Asri-Singaraja merupakan pantai yang landai dan rata-rata memiliki tinggi gelombang ( $H_i$ ) lebih kecil dari 40 cm karena posisinya penempatan pompa gelombang adalah setelah gelombang pecah, ketinggian gelombang ( $H_i$ ) lebih besar dari 40 cm terjadi pada musim tertentu.

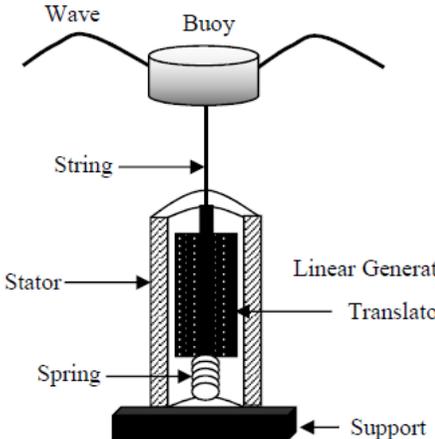
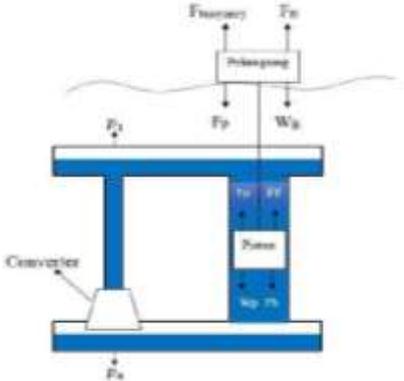
### M. Hasil Penelitian Yang Relevan

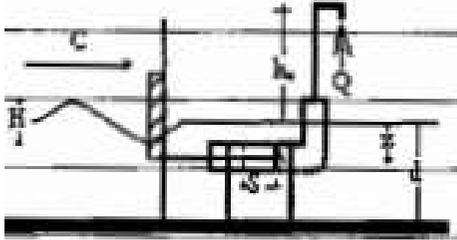
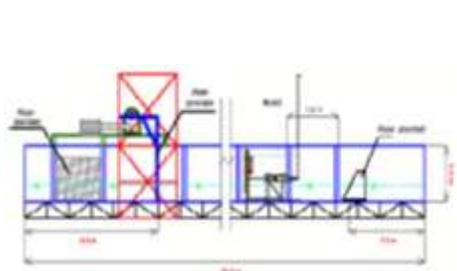
Penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti yang berkaitan dengan pompa gelombang dengan memanfaatkan gelombang air laut yaitu :

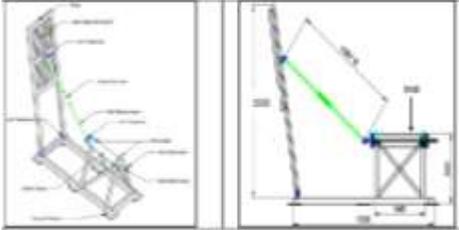
**Tabel 1.** Hasil penelitian yang relevan

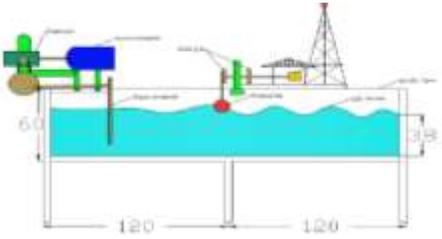
No	Nama/Tahun	Judul	Hasil	Parameter Riset	Struktur Model
1	Silman Pongmanda, Radianta Triatmadja. 2001	Pompa Air Laut Energi Gelombang Tipe Flap	Debit yang dihasilkan dipengaruhi oleh tinggi gelombang ( $H_i$ ), periode gelombang ( $T$ ), kedalaman air ( $d$ ), tinggi head ( $h_e$ ) dan simpangan flap ( $S$ ). Debit yang dihasilkan akan semakin besar jika : tinggi gelombang semakin besar, periode gelombang semakin kecil dan head semakin kecil.	Tinggi gelombang ( $H_i$ ), Periode gelombang ( $T$ ), Kedalaman air ( $d$ ), Tinggi head ( $h_e$ ) dan Debit yang dihasilkan ( $Q$ ).	
2	Masjono Muchtar, Salama Manjang, Dadang A Suriamiharja, M. Arsyad Thaha. 2016	Kinerja Model Fisik Konverter Energi Ombak Rangkaian Gear Searah pada Periode Ombak yang Bervariasi	Energi ombak yang ditangkap oleh konverter adalah hasil kali antara data hasil pengukuran kecepatan putaran (RPM) poros <i>plywheel</i> dengan torsi (Nm) yang terukur pada poros yang sama.	Parameter yang diukur didalam experiment model fisik konverter energi ombak rangkaian gear searah terdiri atas tinggi ombak sebelum konverter untuk mengetahui berapa <i>input</i> energi yang masuk ke	

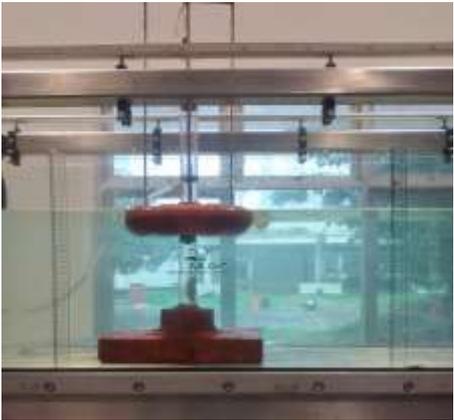
			Kecepatan putaran diukur menggunakan Tachometer digital dan torsi diukur menggunakan <i>Newton Meter Scale</i> .	konverter, tinggi ombak setelah melewati konverter untuk mengetahui berapa energi yang terserap. Energi yang dihasilkan konverter merupakan hasil perkalian antara kecepatan putaran <i>plywheel</i> dengan torsi yang dihasilkan.	
3	Almaarif Fahrey Nuh, Wiwiek Hendrowati. 2016	Studi Eksperimental Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme <i>Ocean Wave Energy Harvester</i> Tipe Pelampung Bola dengan Metode <i>Cantilever Piezoelectric</i>	Dasil dari penelitian tersebut yaitu semakin tinggi amplitudo gelombang, semakin tinggi pula nilai voltase bangkitannya dan nilai arus yang dibangkitkan, sehingga semakin tinggi pula nilai daya bangkitannya..	Gravitasi (g), densitas air ( $\rho$ ), tinggi gelombang ( $H_i$ ), periode gelombang (T), Tegangan bangkitan ( $V_p$ ), arus (I) dan daya (P).	
4	Abdullah Al Mahfazur Rahman, Md. Moniruzzaman, M. Al Mamun. 2017	Estimation of Energy Potential of Point Absorber Buoy type Wave Energy Converter (Estimasi Potensi Energi Point Absorber Konverter Energi	Dari energi gelombang menghasilkan penemuan alternatif sumber energi. Ini memiliki potensi tinggi dibandingkan dengan sumber energi lainnya. Bidang utama yang menjadi perhatian adalah	Parameter Gelombang: Amplitudo gelombang (H), Periode gelombang (T), Sudut fase ( $\Theta$ ). Parameter Pelampung: Tinggi (h), Gaya Pegas Statis ( $F_{Static}$ ), Konstan elektromagnetik ( $k_e$ )	

		<p>Gelombang tipe pelampung)</p>	<p>distribusi energi gelombang. Model ini berfungsi sebagai alat konversi energi gelombang yang sangat sederhana, modifikasi dari model ini dapat diterapkan untuk mengevaluasi pengaruh parameter lain seperti parameter generator linier untuk produksi daya listrik yang efisien.</p>		
<p>5</p>	<p>Danu Ardiyanto, Jondri, Annisa Aditsania</p>	<p>Pelacakan Keluaran Sistem Linear Pompa Piston Tunggal Dengan Kontrol Panjang Batang Penghubung Pelampung Dan Piston</p>	<p>Nilai dari panjang batang penghubung pelampung dan piston adalah 137,6928 m hingga 143,6112 m. Ini sudah mendekati nilai sebenarnya dari panjang batang penghubung pelampung dan piston yaitu 140 m.</p>	<p>Parameter yang di teliti yaitu : Gaya pegas yang bekerja pada pelampung (FB), Gaya pegas yang bekerja pada piston (Ff), Berat pelampung (WB), Berat piston (Fb)</p>	

6	Budi Haryanto, Radianta Triatmadja, Nizam. 2003	Optimasi Pompa Air Laut Energi Gelombang	Model Pompa yang digunakan, menghasilkan peningkatan efisiensi dengan sangat signifikan. Pada $(H/he)(Lb/A) = 20,86$ dan $z/d = 0,54$ efisiensi pompa ( $\eta_{ww}$ ) yang diperoleh dapat mencapai 34,7%. Efisiensi ( $\eta_{ww}$ ) makin rendah, asimptotis mendekati nol, dengan makin besarnya panjang gelombang (L), tinggi gelombang (Hi), lebar flap (b), dan dengan makin kecilnya tinggi head (he) dan diameter piston (D).	Panjang gelombang (L), Tinggi gelombang (Hi), Lebar flap (b), Periode Gelombang (T), Diameter piston (D), Variasi waktu (t)	
7	I Putu Samskerta, Juventus W.R. Ginting, Sudarta. 2011	Pemanfaatan energi gelombang laut dengan pompa gelombang flap horizontal	Tinggi dan debit pemompaan yang dihasilkan oleh pompa dipengaruhi oleh fungsi tinggi gelombang ( $H_i0$ ), kedalaman (h), ketinggian pemompaan (z), periode gelombang (T), panjang lintasan piston (s) dan simpangan pompa (D). Kedalaman muka air (d)	kedalaman air (h), tinggi gelombang di depan flap ( $H_i0$ ), tinggi di belakang flap ( $H_i1$ ), periode gelombang (T), simpangan flap (D), panjang lintasan piston (s), tinggi pemompaan (Z) dan debit yang dihasilkan (Q).	

			<p>memberikan pengaruh yang paling signifikan pada ketinggian pemompaan, sedang debit pemompaan paling signifikan dipengaruhi panjang lintasan piston (s). Ketinggian pemompaan maksimum dicapai pada kondisi muka air pasang (HWL) yaitu mencapai 380 cm (<math>H_{i0} = 21</math> cm dan <math>H_{i0} = 30</math> cm). Debit pemompaan maksimum sebesar 314,2 ml/s terjadi pada kedalaman air 55 cm (<math>H_0 = 15</math> cm) pada panjang lintasan 18 cm.</p>		
8	Juventus Welly Ginting, I Ketut Dharma Setiawan. 2018	Kinerja prototipe papan osilasi pada pompa <i>flap</i> tenaga gelombang untuk pemanfaatan mata air di pantai banyu asri, kota singaraja – bali.	<p>Dari hasil pengamatan tinggi gelombang yang mampu menggerakkan papan osilasi hingga mengalirkan air tawar adalah mulai dari tinggi (H) : 10 cm, dalam hal ini kondisi perairan pantai Banyu Asri-Singaraja</p>	Tinggi gelombang (Hi), Luas Papan Osilasi, Volume Piston, diameter Piston, Panjang lintasan Torak.	

			merupakan pantai yang landai dan rata-rata memiliki tinggi gelombang (Hi) kecil < 40 cm karena posisinya penempatan pompa gelombang adalah setelah gelombang pecah, ketinggian gelombang > 40 cm terjadi pada musim tertentu.		
9	Dwi Prasetyo Utomo, Muhammad Agus Sahbana, Nova sdiyanto ismail. 2014.	Perbedaan Diameter Pelampung Terhadap Kinerja <i>Ocean Wave Energy</i> Sebagai Pembangkit Tenaga Listrik.	Arus dan voltase yang terbaik di dapat pada piston berdiameter 20cm. Tinggi gelombang 15 cm dan diameter piston 20 cm menghasilkan arus paling tinggi yaitu 7,50 ampere. Tinggi gelombang 15 cm dan diameter piston 20 cm menghasilkan voltase paling tinggi yaitu 51,70 V. Tinggi gelombang 15 cm dan diametr piston 20 cm menghasilkan efisiensi paling tinggi yaitu 8,31%.	Parameter penelitian: Hi =Tinggi Gelombang, D = Diameter Pelampung, T = Kecepatan Gelombang, Rpm = Putaran poros, Ampere = arus listrik Volt = tegangan listrik, % = Efisiensi PLT Gelombang.	

10	Hamzah Al Imran, Arsyad Thaha, Mukhsan P. H, Bambang Bakri 2021		<p>Debit yang dihasilkan (<math>Q_t</math>) di pengaruhi oleh Tinggi pemompaan (<math>h</math>), semakin besar nilai variabel <math>h</math> maka semakin kecil debit <math>Q_t</math> yang dihasilkan. Dari variabel <math>h</math> dan <math>Q_t</math> juga dipengaruhi oleh variabel-variabel lainnya seperti; Tinggi gelombang (<math>H_i</math>), Panjang gelombang (<math>L</math>), Periode gelombang (<math>T</math>), kedalaman air (<math>d</math>), Diameter tabung (<math>D</math>), Berat pelampung (<math>W</math>), Luasan tabung (<math>A_1</math>), Luasan pelampung (<math>A_2</math>). Gaya grafitasi (<math>g</math>) dan rapat massa zat cair (<math>\rho</math>).</p>	<p>Tinggi gelombang (<math>H_i</math>), Panjang gelombang (<math>L</math>), Periode gelombang (<math>T</math>), Kedalaman air (<math>d</math>), Diameter tabung (<math>D</math>), Berat pelampung (<math>W</math>), Luasan tabung (<math>A_1</math>), Luasan pelampung (<math>A_2</math>) dan Debit yang dihasilkan (<math>Q_t</math>)</p>	
----	---	--	--	--	---

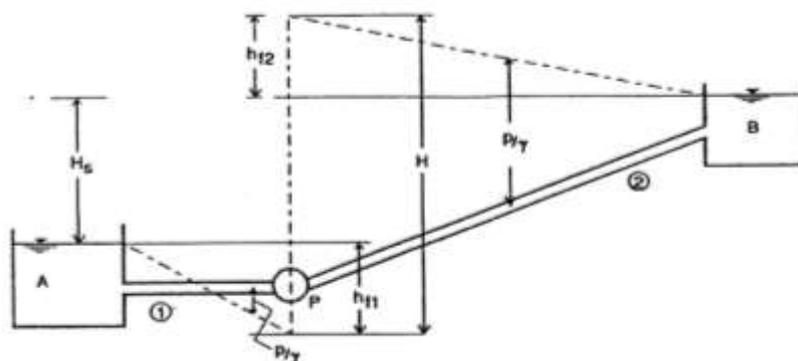
## N. Pipa dengan Pompa

Pompa adalah peralatan mekanis yang mengubah kerja mekanis poros menjadi energi mekanis fluida dan energi yang diterima oleh fluida ini digunakan untuk menaikkan tekanan dari fluida tersebut serta digunakan untuk melawan tahanan yang terdapat pada saluran sehingga dapat dikatakan fungsi dari pompa adalah untuk memindahkan fluida dari suatu tempat ke tempat lain dengan cara menaikkan tekanan fluida tersebut. Pada umumnya pompa digunakan untuk menaikkan fluida dari satu tempat yang rendah ke tempat yang lebih tinggi atau digunakan untuk mengalirkan fluida dari suatu tingkat tertentu ke suatu tempat dengan menggunakan pipa yang sangat panjang. Jika pompa menaikkan zat cair dari kolam satu ke kolam yang lain dengan selisih muka air  $H_s$ , daya yang digunakan oleh pompa menaikkan zat cair setinggi  $H_s$  adalah sama dengan tinggi  $H_s$  ditambah dengan kehilangan tenaga selama pengaliran dalam pipa tersebut.

Kehilangan tenaga adalah ekuivalen dengan penambahan tinggi elevasi, sehingga efeknya sama jika pompa menaikkan zat cair setinggi  $H = H_s + \sum h_t$ , Seperti pada gambar 7 tinggi kecepatan diabaikan sehingga garis tenaga berimpit dengan garis tekanan. Kehilangan tenaga terjadi pada pengaliran pipa 1 dan 2 yaitu sebesar  $h_{t1}$  dan  $h_{t2}$ . Pada pipa 1 yang merupakan pipa isap, garis tenaga (dan tekanan) menurun sampai di bawah pipa.

Mekanisme kerja dari pompa gelombang dengan menggunakan piston pada bagian dalam dari tabung silinder yang dihubungkan dengan pelampung pada bagian luar tabung akan bergerak secara kontinu naik dan turun secara vertikal hal ini dipengaruhi oleh gelombang yang datang, jika piston bergerak kebawah maka klep yang menutupi lubang inlet bagian atas akan terbuka sehingga air akan masuk mengisi tabung begitupun sebaliknya hal ini disebabkan oleh tekanan yang bekerja pada piston.

Pada saat piston bergerak kebawah, air akan keluar melalui lubang outlet bagian bawah, hal ini disebabkan pada ujung tiang bagian bawah dari piston diberi karet yang kedap air, ukuran dari karet ini disesuaikan dengan diameter tabung yang digunakan.



**Gambar 7.** Pipa dengan pompa (*Bambang Triatmodjo, 1999*)

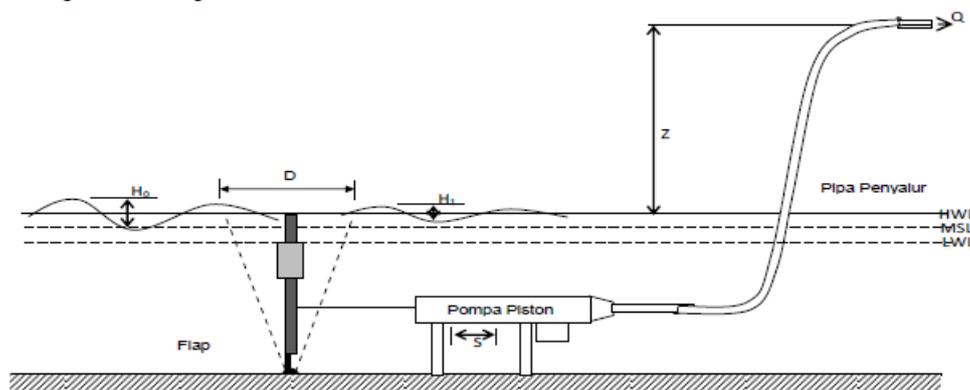
Bagian pipa di mana garis tekanan di bawah sumbu pipa mempunyai tekanan negatif, sedangkan pipa 2 merupakan pipa tekan, daya yang diperlukan pompa untuk menaikkan zat cair (*Triatmodjo, 1993*)

$$D = \frac{QH\gamma}{\eta} \left( \frac{kgfm}{d} \right) \dots\dots\dots 56$$

atau

$$D = \frac{QH\gamma}{75 \eta} (hp) \dots\dots\dots 57$$

dengan  $\eta$  adalah efisiensi pompa. Pada pemakaian pompa, efisiensi pompa digunakan sebagai pembagi dalam rumus daya pompa. *head* pompa adalah kemampuan suatu pompa untuk memindahkan fluida dari suatu tempat ketempat lain yang berbeda ketinggian atau kemampuan pompa untuk memindahkan fluida antara dua tempat yang berbeda jaraknya.



**Gambar 8.** Mekanisme kerja pompa gelombang tipe flap horisontal (I Putu Samskerta, 2011)

## O. Bilangan Tak berdimensi

Analisis dimensi adalah teknik matematik yang digunakan sebagai alat bantu dalam menyelesaikan beberapa permasalahan teknik. Setiap fenomena fisik dapat dinyatakan dalam persamaan, yang tersusun dari variabel-variabel baik berdimensi maupun tak berdimensi. Analisis dimensi membantu menentukan susunan secara sistematis variabel-variabel dalam hubungan fisik dan kombinasi variabel berdimensi menjadi

parameter tak berdimensi. Pada pemodelan hidrolis khususnya, banyak variabel dependent dan independent yang kadang susah penetapannya, dan susah pula menentukan korelasinya. Dengan menggunakan analisis dimensi, akan memudahkan mencari dan menentukan korelasi antar variabel yang dikehendaki. Analisis dimensi baik digunakan pada penentuan korelasi antar variabel pada uji model hidrolis, sepanjang penggunaan data variabel akurat (Chadwick, 1994)

Hubungan antara parameter yang terjadi dimodel diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi. Disamping itu bilangan tak berdimensi juga digunakan untuk menggambarkan hasil-hasil dari penelitian.

Untuk menentukan bilangan tak berdimensi tersebut dilakukan dengan cara analisis dimensi, analisis dimensi dapat dilakukan dengan metode Buckingham, Rayleigh, metode Basic Echelon Matrix, Stepwise dan Langhaar (Nur Yuwono, 1994). Parameter hasil analisis dimensi dilakukan dengan uji regresi (*regression analysis*) untuk mendapatkan hubungan antara parameter yang terbaik.

#### **P. Kerangka Pikir Penelitian**

Penelitian tentang pompa gelombang yang memanfaatkan energi gelombang laut sudah dilakukan oleh beberapa peneliti-peneliti terdahulu yang fokus pada gerakan pemompaan secara horisontal, namun penelitian pompa gelombang dengan menggunakan pelampung yang berada diluar tabung dan terikat dengan tiang piston menggunakan tiang baja pada bagian dalam tabung yang bergerak secara vertikal

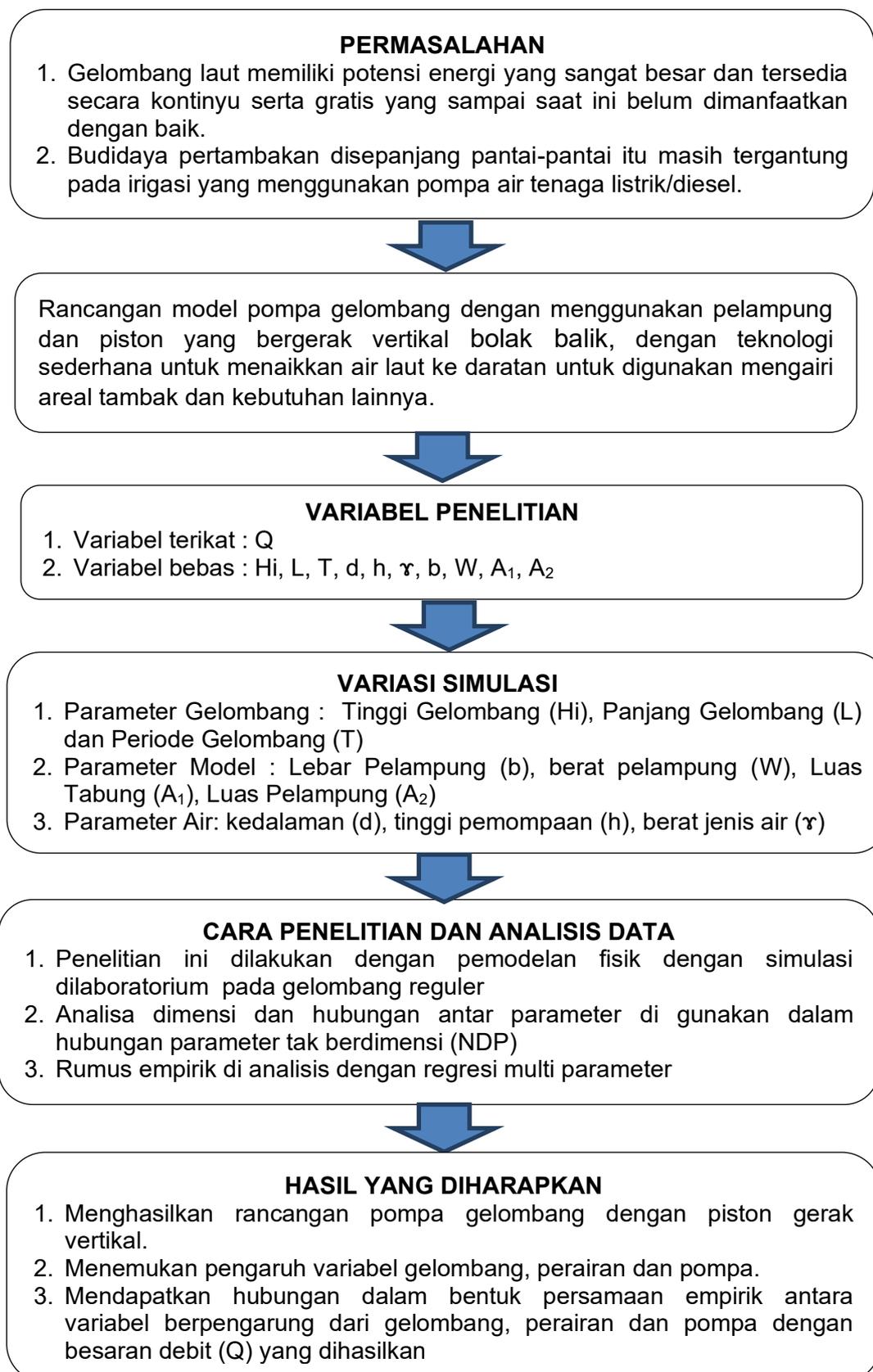
mengikuti irama naik turunnya gelombang belum pernah dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu. Berdasarkan kajian teori dan literatur atas penelitian - penelitian pompa gelombang dan sejenisnya yang sudah pernah dilakukan diperoleh hasil bahwa debit ( $Q$ ) yang dihasilkan dari pemompaan sangat dipengaruhi oleh variabel kedalaman air ( $d$ ), tinggi gelombang ( $H$ ), periode gelombang ( $T$ ), berat jenis air ( $\gamma$ ) dan panjang gelombang ( $L$ ).

Sedangkan parameter yang berpengaruh berdasarkan analisis non dimensional adalah luas tabung dan luas tabung dan pelampung ( $A_1$  &  $A_2$ ), kedalaman relatif ( $d/L$ ), lebar pelampung relatif ( $b/L$ ), berat pelampung ( $W$ ) dan kecuraman gelombang ( $H/L$ ).

Berdasarkan variabel dan parameter yang berpengaruh terhadap pompa gelombang, maka penelitian ini dilakukan dengan variasi parameter penelitian. Penelitian ini dilakukan dengan eksperimen model fisik di laboratorium menggunakan saluran gelombang yang dilengkapi *wave generator*, *wave damper*, *wave probe* dan *wave oskiloskop monitor*.

Analisis dengan regresi multi parameter dilakukan untuk mendapatkan persamaan empirik dan grafik hubungan antara parameter.

Bagan kerangka pikir penelitian selanjutnya dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 9.



**Gambar 9.** Kerangka Pikir Penelitian

## Q. Parameter Penelitian

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini yaitu parameter terikat dan parameter bebas dimana semua parameter yang akan digunakan dianalisis dengan berbagai hubungan antar parameter kemudian dapat ditentukan berdasarkan hubungan antar parameter yang diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi. Bilangan tak berdimensi dapat dipergunakan untuk menggambarkan hasil penelitian, dengan demikian hasil penelitian dapat digeneralisir (Yuwono, 1994, 2021). Beberapa cara untuk menentukan bilangan parameter tak berdimensi antara lain: Basic Echelon Matrix, Buckingham (*phi theorem*), Rayleigh, Step wise, dan Langhaar.

### 1. Parameter Terikat

Parameter terikat dalam penelitian ini adalah debit ( $Q$ ) atau debit relatif, parameter ( $Q$ ) ini akan dipengaruhi oleh beberapa parameter lainnya yang merepresentasikan komponen sistem yang terlibat seperti gelombang, struktur pompa dan air.

### 2. Parameter Bebas

Parameter bebas yang dianggap berpengaruh dalam penelitian ini diantaranya ;  $H_i$ ,  $L$ ,  $T$ ,  $b$ ,  $W$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $d$ ,  $h$ ,  $\gamma$  . dengan fungsi masing-masing dari parameter bebas yaitu; Parameter Gelombang yaitu: Tinggi gelombang ( $H_i$ ), panjang gelombang ( $L$ ), periode gelombang ( $T$ ). Parameter struktur pompa yaitu: Lebar pelampung ( $b$ ), berat pelampung ( $W$ ), luas penampang tabung ( $A_1$ ), luas penampang pelampung ( $A_2$ ).

Parameter perairan yaitu: kedalaman ( $d$ ), tinggi pemompaan ( $h$ ) dan berat jenis zat cair ( $\gamma$ ). Pada penelitian ini data dianalisis dengan berbagai hubungan antar parameter kemudian dapat ditentukan berdasarkan hubungan antar parameter yang diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi dengan menggunakan metode Langhaar. Metode ini dipilih dengan pertimbangan bahwa variabel yang berpengaruh relatif sedikit sehingga metode ini dianggap lebih tepat. Elemen pokok dimensi dalam keperluan teknik hidraulik biasanya ada 3 (tiga) yaitu massa ( $M$ ), panjang ( $L$ ), dan waktu ( $T$ ) (Yuwono, 1994, 2021).

#### **R. Hipotesis Penelitian**

Salah satu penangkap energi gelombang adalah dengan menggunakan flap horisontal. Flap didesain sedemikian rupa sehingga mampu bergerak harmonik dengan simpangan sebesar ( $D_0$ ) mengikuti gerakan gelombang yang datang ( $H_0$ ), setelah menghantam flap energi dan tinggi gelombang ( $H_1$ ) akan berkurang. Dengan cara ini energi gelombang ditangkap melalui flap untuk menggerakkan pompa piston. Saat bergerak mundur, katup piston akan terbuka dan air laut akan mengisi tabung piston. Pada saat bergerak maju tekanan air akan diteruskan oleh tuas piston untuk mendorong piston. Gerakan maju mundur dalam pompa piston sebesar  $s$  (cm), akan mendorong air laut yang terdapat dalam tabung piston untuk selanjutnya disalurkan dengan pipa penyalur menuju tempat yg lebih tinggi. Debit ( $Q$ ) yang disalurkan sampai dengan ketinggian  $Z$  akan memiliki energi potensial yang bisa

digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga menghasilkan energi listrik.

Sebagaimana diketahui bahwa untuk mengoperasikan sebuah pompa, maka dibutuhkan tekanan untuk menggerakkan piston pompa untuk pompa gelombang, maka tekanan gelombang pada pelampung menjadi bagian yang sangat penting, gerakan vertikal gelombang di daya gunakan untuk memberikan tekanan vertikal pada pelampung sehingga dapat mendorong piston keatas memmompakan air. Untuk memanfaatkan gerakan gelombang kebawah, pelampung diisi air sebagai pemberat ( $W$ ).

Berdasarkan kajian teori dan literatur atas penelitian-penelitian pompa gelombang dan sejenisnya yang sudah pernah dilakukan diperoleh hasil bahwa variabel-variabel seperti kedalaman air ( $d$ ), tinggi gelombang ( $H_i$ ), periode gelombang ( $T$ ) dan panjang gelombang ( $L$ ) sangat mempengaruhi terhadap debit  $Q$  yang akan dihasilkan.

Pada penelitian model pompa gelombang dengan menggunakan pelampung dan piston yang bergerak vertikal ini diperkirakan menghasilkan debit ( $Q$ ) merupakan fungsi parameter tinggi pemompaan ( $h$ ), tinggi gelombang ( $H_i$ ), panjang gelombang ( $L$ ), dimensi pelampung dan tabung ( $A_1$  &  $A_2$ ), kedalaman air ( $d$ ), lebar pelampung ( $b$ ), berat pelampung ( $W$ ), berat jenis air ( $\gamma$ ) dan periode gelombang ( $T$ ), secara matematis dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$Q = f(h, H_i, L, A_1, A_2, d, b, W, \gamma, T)$$

Diperkirakan ke 10 (sepuluh) parameter tersebut berpengaruh terhadap  $Q$  pemompaan baik secara sendiri-sendiri maupun secara bersama-sama.