

**KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK PONTON DAN RASIO
MASSA TERHADAP AMPLITUDO GETARAN TLP 2-DOF**

(Skripsi)

Oleh
FAJAR FITRA BIMANTARA
1915021024



JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023

**KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK PONTON DAN RASIO
MASSA TERHADAP AMPLITUDO GETARAN TLP 2-DOF**

Oleh

FAJAR FITRA BIMANTARA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2023

ABSTRAK

KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK PONTON DAN RASIO MASSA TERHADAP AMPLITUDO GETARAN TLP 2-DOF

Oleh

FAJAR FITRA BIMANTARA

Tension leg platform (TLP) merupakan bangunan *compliant structures* yang banyak digunakan pada eksplorasi gas atau minyak lepas pantai pada kedalaman air antara 300m hingga 1500m. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil respon dinamik model TLP *single* ponton dengan model TLP *double* ponton untuk mendapatkan RAO minimal. Dalam penelitian ini, jarak antara TLP utama dan ponton tambahan divariasikan guna mengetahui respon TLP. Parameter yang digunakan yaitu panjang gelombang $\lambda = 40\text{cm}$, tinggi gelombang $h = 10\text{cm}$, dan kedalaman air $d = 60\text{cm}$. Eksperimen dilakukan di kolam air skala laboratorium, dengan variasi jarak ponton $1/4\lambda$, $1/2\lambda$, $3/4\lambda$, dan λ . Sedangkan rasio massa m_{pg}/m_{pu} yaitu 0,478, 0,6 dan 0,72. Pada pengujian dengan jarak $x = 1/2\lambda$ dengan rasio massa m_{pg}/m_{pu} 0,478 menunjukkan nilai RAO yang paling kecil yaitu 0,1893. Hal tersebut dikarenakan TLP gandengan memiliki massa jenis dan gaya apung yang lebih kecil, dan pegas mengalami deformasi maksimal saat gelombang melewati titik tengahnya. maka terjadilah gaya restorasi yang kuat untuk mengembalikan kedua benda terapung ke posisi kesetimbangannya.

Kata Kunci: *Tension Leg Platform*, getaran, RAO, stabilitas, gelombang.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY EFFECT OF PONTOON DISTANCE AND MASS RATIO ON 2-DOF TLP VIBRATION AMPLITUDE

By

FAJAR FITRA BIMANTARA

Tension leg platform (TLP) is a compliant structures which is widely used in offshore gas or oil exploration at depths between 300m to 1500m. This research was conducted to compare dynamic response of TLP single pontoon with TLP double ponton to obtain a minimum RAO value. In this research, the distance between the main TLP and the additional pontoon was varied to determine the TLP response. The parameters used are the wavelength $\lambda = 40\text{cm}$, the wave height $h = 10\text{cm}$, and the water depth $d = 60\text{cm}$. Experiments were carried out in laboratory-scale water ponds, with variations in pontoon spacing of $1/4\lambda$, $1/2\lambda$, $3/4 \lambda$, and λ . Meanwhile, the mass ratio m_{pg}/m_{pu} is 0.478, 0.6 and 0.72. In testing with a distance of $x = 1/2\lambda$ with a mass ratio of m_{pg}/m_{pu} 0.478, the lowest RAO value is 0.1893. This is because the TLP trailer has a smaller density and buoyancy force, and the spring experiences maximum deformation when the wave passes through its midpoint. then there is a strong restorative force to return the two floating objects to their equilibrium position.

Keywords: Tension Leg Platform, vibration, RAO, stability, wave.

Judul : **KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH
JARAK PONTON DAN RASIO MASSA
TERHADAP AMPLITUDO GETARAN TLP 2-
DOF**

Nama : *Fajar Fitra Bimantara*

Nomor Pokok Mahasiswa : 1915021024

Jurusan : **Teknik Mesin**

Fakultas : **Teknik**



Pembimbing 1

Pembimbing 2

Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.
NIP 19690801 199903 1 002

Novri Tanti, S.T., M.T.
NIP 19701104 199703 2 001

MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Kepala Program Studi
S1 Teknik Mesin

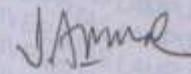
Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 19710331 199903 1 003

Novri Tanti, S.T., M.T.
NIP 19701104 199703 2 001

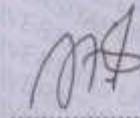
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

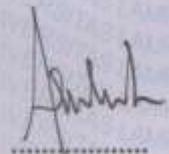
Ketua Penguji : Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.



Anggota Penguji : Novri Tanti, S.T., M.T.



Penguji Utama : Dr. Asnawi Lubis, S.T., M.Sc.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)

NIP 19750928/2001121 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 07 Agustus 2023

LEMBAR PERYATAAN

SKRIPSI INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 PERATURAN
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN PERATURAN REKTOR
No. 13 TAHUN 2019.

Bandar Lampung, 10 Agustus 2023
Dibuat Pernyataan



Fitra Bimantara
Fitra Bimantara
NPM. 1915021024

PERSEMBAHAN

Puji syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya,
sholawat serta salam semoga selalu tercurah kepada suri tauladan umat,
Nabi Muhammad SAW.



Dengan segala kerendahan hati dan mengharap ridho Ilahi,
kupersembahkan karya kecil ini

Kepada

*Kedua orangtuaku tercinta
Bapak Heru Mantoro dan Ibu Sumarni*

yang telah merawat, mengasahi dan mencintai ananda. Selalu mendoakan dan mendukung setiap langkahku menuju kesuksesan. Beribu kebbaikanku tidak akan pernah bisa membalas kasih sayang dan cinta Bapak Ibu.

Kakakku... Kartika Dewi Rachmawati

MOTTO

Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum, sehingga mereka mengubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri

(Q.S. Ar Ra'd 11)

Betapa bodohnya manusia. Dia menghancurkan masa kini sambil mengkhawatirkan masa depan, tapi menangis di masa depan dengan mengingat masa lalunya

-Ali bin Abi Thalib-

Sepiro gedhening sengsoro, yen tinompo amung dadi cobo

-R.M. Imam Koesoepangat-

Suatu saat dirimu akan hancur, yang menghancurkan adalah dirimu sendiri. Jangan khawatir, setelah itu akan muncul dirimu yang lebih kuat

-Penulis -

Jika Tuhan membawamu ke sebuah perjalanan, maka Tuhan akan membantumu untuk melewatinya

-Penulis-

SANWACANA

Alhamdulillahirrobbil'alamiin. Segala puji dan syukur hanya kepada Allah SWT, Tuhan semesta alam, yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi sebagai syarat untuk menacapai gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung dengan judul “**Kajian Eksperimental Pengaruh Jarak Ponton dan Rasio Massa Terhadap Amplitudo Getaran TLP 2-DOF**”. Shalawat teriring salam senantiasa tercurah kepada suri tauladan umat, Nabi Muhammad SAW beserta para keluarga dan sahabatnya, semoga kita termasuk umat Beliau yang akan mendapatkan syafaatnya di *Yaumul Akhir* kelak.

Dalam menyelesaikan skripsi ini, penulis menyadari bahwa banyak pihak yang telah turut serta membantu penulis. Oleh sebab itu, melalui tulisan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Kedua orangtuaku, Bapak Heru Mantoro dan Ibu Sumarni yang telah memberikan semangat, dukungan, yang senantiasa ada disisiku, selalu mendukungku, menyertai dan mendoakan setiap langkahku.
2. Kakakku, Kartika Dewi Rachmawati, S.Si. Yang telah memberikan dukungan dan motivasi.
3. Dr. Jamiatul Akmal S.T., M.T. selaku pembimbing I, pembimbing akademik sekaligus sekretaris jurusan teknik mesin yang telah membimbing dengan penuh kesabaran dan keikhlasan, senantiasa membantu dan memotivasi penulis selama penelitian dan penyusunan skripsi.
4. Ibu Novri Tanti S.T., M.T. selaku ketua program studi sekaligus pembimbing II, yang selalu membimbing penulis dengan kesabaran dan keikhlasan dari awal hingga penyusunan skripsi ini selesai.
5. Dr. Asnawi Lubis S.T., M.Sc., selaku pembahas penelitian sekaligus kepala laboratorium mekanika struktur yang telah memberikan nasehat, saran, dan arahan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

6. Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
7. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Unila yang telah memberikan ilmu dan bimbingan selama penulis belajar di Jurusan Teknik Mesin.
9. Keluarga besarku yang telah mendoakan, memberikan semangat dan dukungan untuk keberhasilanku.
10. Tim Laboratorium mekanika struktur (*Aquascape*), Nurfajar Sepyanto, Mohammad Bima Ramadhan, dan Rio Fachmy Putra.
11. Teman-teman Laboratorium Teknik Mesin yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.
12. Seluruh mahasiswa teknik mesin angkatan 2019, terima kasih atas kebersamaan dan dukungan yang telah diberikan.
13. Semua pihak yang telah membantu dan mendukung dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari penyusunan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca demi perbaikan penelitian selanjutnya. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita.

Bandar Lampung, Agustus 2023
Penulis,

Fajar Fitra Bimantara

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Gedong Tataan, pada tanggal 17 Desember 2000 sebagai anak bungsu dari dua bersaudara, putra dari Bapak Heru Mantoro dan Ibu Sumarni.

Jenjang pendidikan penulis dimulai pada tahun 2006 di TK Dharma Wanita Bagelen Gedongtataan, lalu penulis menamatkan pendidikan di SD Negeri 7 Bagelen pada tahun 2013, SMP Negeri 1 Gadingrejo pada tahun 2016, dan SMK Negeri 1 Gadingrejo tahun 2019. Pada tahun yang sama, penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Mesin, penulis aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota bidang kerohanian.

Penulis pernah melakukan kerja praktek (KP) di **PT. PLN (PERSERO) PLTP ULUBELU TANGGAMUS**, Lampung tahun 2022 dengan judul laporan *“Analisis Unjuk Kerja Turbin Uap Unit 2 PT. PLN (PERSERO) PLTP ULUBELU”*.

Kemudian pada tahun 2023 penulis melakukan penelitian dengan judul **KAJIAN EKSPERIMENTAL PENGARUH JARAK PONTON DAN RASIO MASSA TERHADAP AMPLITUDO GETARAN TLP 2-DOF** dibawah bimbingan Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. dan Ibu Novri Tanti, S.T., M.T

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tension Leg Platform	5
2.2 Gaya Gelombang Pada Tension Leg Platform	9
2.3 Teori Ombak	9
2.4 Persamaan Morison	13
2.5 Teori Getaran Pada TLP	15
2.6 Sistem Getaran Dua Derajat Kebebasan	17
2.7 <i>Response Amplitude Operation (RAO)</i>	18
III. METODE PENELITIAN	20
3.1 Waktu dan Tempat	20
3.2 Tahapan Penelitian	20
3.3 Alur Tahapan Penelitian	21
3.4 Metode Pengujian	23
3.5 Metode Pengambilan Data	25
3.6 Desain Kolam Ombak	26

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Validasi Pengujian	28
4.2 Analisis Gerakan TLP <i>Single</i> Ponton dengan TLP <i>Double</i> Ponton	29
4.3 Analisis TLP <i>Single</i> Ponton dan TLP <i>Double</i> Ponton dengan Variasi Jarak Dan Massa	30
4.4 Perbandingan TLP <i>Single</i> Ponton dengan TLP <i>Double</i> Ponton Terhadap RAO	38
V. KESIMPULAN DAN SARAN	40
5.1 Kesimpulan	40
5.2 Saran	40
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 TLP <i>Seastar Matterhorn</i>	5
Gambar 2.2 <i>Jacket Platform</i>	7
Gambar 2.3 Skema Struktur TLP	8
Gambar 2.4 Skema gaya-gaya yang bekerja pada TLP	9
Gambar 2.5 Sketsa definisi gelombang	10
Gambar 2.6 Perbandingan teori Airy dan Stokes	11
Gambar 2.7 Gelombang Cnoidal	11
Gambar 2.8 Gelombang Solitary	12
Gambar 2.9 Validasi untuk bermacam teori ombak	13
Gambar 2.10 Sistem getaran dua derajat kebebasan	18
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	22
Gambar 3.2 Skema alat uji.	23
Gambar 3.3 konfigurasi alat uji	24
Gambar 4.1 Perbandingan eksperimen dengan analitikal menggunakan matlab	28
Gambar 4.2 Hasil perbandingan TLP single ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak $3/4 \lambda$ dengan rasio massa 0,478	30
Gambar 4.3 Hasil perbandingan TLP single ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak $3/4 \lambda$ dengan rasio massa 0,6	31
Gambar 4.4 Hasil perbandingan TLP <i>single</i> ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak $3/4 \lambda$ dengan rasio massa 0,72	31
Gambar 4.5 Hasil perbandingan TLP single ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak λ dengan rasio massa 0,478	32
Gambar 4.6 Hasil perbandingan TLP single ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak λ dengan rasio massa 0,6	32
Gambar 4.7 Hasil perbandingan TLP <i>single</i> ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak λ dengan rasio massa 0,72	33
Gambar 4.8 Hasil perbandingan TLP single ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak $1/4 \lambda$ dengan rasio massa 0,478	34

Gambar 4.9 Hasil perbandingan TLP single ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak $1/4 \lambda$ dengan rasio massa 0,6	34
Gambar 4.10 Hasil perbandingan TLP <i>single</i> ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak $1/4 \lambda$ dengan rasio massa 0,72	35
Gambar 4.11 Hasil perbandingan TLP single ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak $1/2 \lambda$ dengan rasio massa 0,478	36
Gambar 4.12 Hasil perbandingan TLP single ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak $1/2 \lambda$ dengan rasio massa 0,6	36
Gambar 4.13 Hasil perbandingan TLP single ponton dengan TLP <i>double</i> ponton terhadap jarak $1/2 \lambda$ dengan rasio massa 0,72	37
Gambar 4.14 Grafik perbandingan RAO TLP <i>double</i> ponton dengan variasi jarak dan massa	38

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Variasi Pengujian	24
Tabel 4.1 Parameter Ombak	28
Tabel 4.2 Karakteristik TLP	29

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Minyak dan gas bumi merupakan sumber daya alam yang tersimpan di bawah permukaan bumi baik daratan maupun perairan yang berbentuk cair dan gas. Minyak dan gas berada di dalam pori-pori batuan pada kolam di perut bumi. Untuk memperoleh minyak dan gas bumi, maka dilakukan pengeboran baik di daratan maupun di lautan. Pengeboran di lautan dilakukan baik di lautan dangkal maupun lautan dalam. Pada pengeboran yang dilakukan di lautan dalam, dibutuhkan bangunan terapung untuk memudahkan dalam eksploitasi migas. Bangunan terapung tersebut dikenal dengan istilah *Tension Leg Platform* (TLP).

Tension Leg Platform (TLP) bergerak akibat adanya pengaruh dari hembusan angin, gelombang laut, cuaca, dan hal lain yang dapat merusak struktur bangunan. Kerusakan yang dapat terjadi pada bangunan terapung lepas pantai dapat diakibatkan oleh ketidakstabilan bangunan yang menyebabkan gerak bangunan yang berlebihan. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Djatmiko (2003), struktur bangunan terapung dapat mengalami kelelahan (*fatigue*) baik pada struktur utama maupun struktur sekunder. Struktur bangunan mengalami kelelahan akibat kondisi lingkungan seperti gelombang laut yang bersifat siklis, dimana bangunan tersebut merespon gerakan secara dinamis.

Dalam proses pengeboran di lepas pantai dibutuhkan kestabilan TLP terhadap gangguan gelombang. Dari studi literatur ditemukan bermacam cara untuk menstabilkan, diantaranya : memodifikasi kabel tambat, menambah ponton,

memodifikasi telapak ponton, menambah massa dinamis. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Almutahir (2016), menganalisa respons gerakan turbin angin lepas pantai terapung tipe-spar pada perairan Indonesia. Struktur pada turbin angin lepas pantai terapung dibandingkan sistem tali tambatnya antara sistem tambat taut dan *catenary*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tambat taut memiliki respon gerakan yang lebih baik dibandingkan sistem tambat *catenary*.

Penelitian yang dilakukan oleh Akmal dkk (2022) tentang TLP dengan variasi bentuk telapak ponton (*deck*), dengan membandingkan TLP telapak berbentuk bujur sangkar dengan TLP bertelapak lingkaran. Hasilnya, TLP dengan telapak lingkaran lebih stabil dalam merespon gangguan gelombang. Terdapat keunggulan pada gerakan rotasional yaitu TLP bertelapak lingkaran tidak terpengaruh oleh arah datangnya gelombang.

Penelitian ini bertujuan untuk menstabilkan TLP yang dilakukan dengan memberikan tali tambat pada TLP sampai ke dasar kolam, dan menambahkan ponton. Kemudian diberikan variabel yaitu $\frac{1}{4}\lambda$, $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{4}\lambda$, dan 1λ . Pada variabel jarak diberikan pegas. Hal tersebut bertujuan untuk meredam gerakan TLP akibat gaya gelombang yang terjadi dan menahan gerak TLP agar tetap stabil. Setelah dilakukan pengujian, langkah selanjutnya yaitu membandingkan hasil pengujian antara data pengujian TLP *single* ponton dengan TLP *double* ponton.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah mendapatkan hasil respon dinamik model TLP *single* ponton dengan model TLP *double* ponton untuk mendapatkan respon RAO yang minimal.

1.3 Manfaat Penelitian

Dari analisis dengan bantuan perangkat lunak yang dilakukan pada TLP dengan bentuk ponton yang sama tetapi dengan perbedaan objek berupa ponton tambahan sebagai peredam ombak akan diketahui respon dinamis dari gerakan TLP akibat gelombang.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian Struktur *Tension Leg Platform* diberikan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Eksperimen dilakukan hanya pada model TLP *single* ponton dengan model TLP *double* ponton dalam skala laboratorium.
2. Gelombang yang digunakan merupakan gelombang kecil.
3. Analisis dilakukan dengan satu arah gelombang horizontal.
4. Karakteristik ombak tanpa arus.

1.5 Sistematika Penulisan

Laporan penelitian tugas akhir ini disusun secara sistematis dengan perincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan tentang latar belakang, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan sebagai bahasan utama.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan secara singkat teori dasar pendukung penelitian dan parameter yang berhubungan dengan penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab 3 merupakan metodologi penelitian yang berisikan waktu dan tempat, tahapan atau alur penelitian, serta metode-metode yang digunakan oleh penulis dalam pelaksanaan penelitian.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini menampilkan data pengujian serta analisisnya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab 5 merupakan penutup yang berisi kesimpulan yang dapat ditarik serta saran untuk penelitian selanjutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tension Leg Platform (TLP)

Tension Leg Platform (TLP) merupakan struktur apung vertikal yang banyak digunakan pada eksplorasi gas atau minyak lepas pantai. *Tension leg platform (TLP)* sangat cocok digunakan di kedalaman air antara 300 m hingga 1500 m (Kharade, 2014). *Platform* secara permanen ditambatkan dengan tendon pada masing-masing sudut struktur. Sekelompok tendon disebut *tension leg*. *Tension leg* bersifat memiliki kekakuan aksial yang relatif tinggi (elastisitas rendah), sehingga hampir semua gerakan vertikal *platform* dihilangkan (El-gamal dan Refat, 2014). Contoh TLP dapat dilihat pada Gambar 2.1.



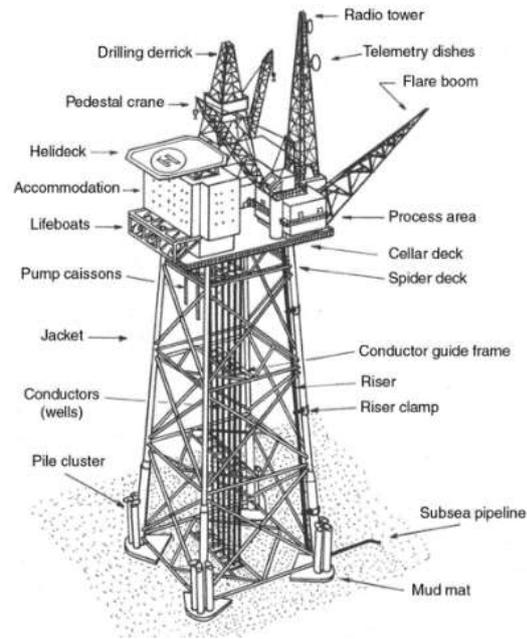
Gambar 2.1 TLP *Seastar Matterhorn*
(Sumber : SBMAtlantia., 2011)

Tension Leg Platform adalah sebuah bangunan lepas pantai tipe *compliant structure*. Bangunan TLP terdiri atas beberapa bagian yaitu struktur hull, rangka atas kolom, dek bagian atas, sistem tendon dan sistem pondasi (*foundation system*). Pada penerapannya, TLP tidak boleh diikat kendor juga

tidak boleh diikat terlalu kencang agar TLP dapat bergerak bebas di permukaan air mengikuti pasang surut air laut baik *surge*, *sway* maupun *yaw*, namun posisi amplitudo TLP dibatasi. TLP dapat terkena gaya-gaya horizontal dan vertikal akibat kondisi lingkungan. Maka dari itu TLP dirancang dan dibuat lebih berat guna penyebaran tegangan (Soegiono, 2004).

Permasalahan yang sering ditemukan pada struktur anjungan lepas pantai adalah kerusakan struktur bangunan yang kemungkinan terjadi akibat kelelahan (*fatigue*). Struktur bangunan lepas pantai cenderung mengalami kelelahan akibat adanya beban lingkungan yang bekerja akibat sifat siklis gelombang. Sehingga kelelahan menjadi salah satu penyebab utama kerusakan pada bangunan lepas pantai. Secara umum struktur merespon gelombang air serta beban angin secara dinamis. Selain itu beberapa faktor lain pada tingkat tertentu juga dapat menambah beban siklis, sehingga keadaannya bertambah kritis (Djarmiko, 2003).

Menurut Aprianto (2020). Struktur anjungan lepas pantai yang paling banyak digunakan adalah anjungan lepas pantai tipe *jacket*. Struktur anjungan yang terdiri dari *jacket*, *deck* dan *pile*. Fungsi dari *deck* sebagai tempat melakukan seluruh aktivitas. Proses penyaluran beban lateral kepada *pile* terjadi di *Jacket* dan *jacket* dirancang untuk dapat menjadi selubung pada saat *pile* dipancang. Sedangkan fungsi *pile* adalah sebagai penyalur beban ke *seabed*. Pada *deck* terdapat sebuah elevasi. Penentuan ketinggian Elevasi pada *deck* minimal harus lebih tinggi daripada *splash zone* ditambah jarak aman. Jarak aman yang ditentukan oleh API RP-2A WSD adalah 5 ft atau 1,5 meter. *Tension leg platform* tipe *jacket* dapat dilihat pada gambar 2.2.



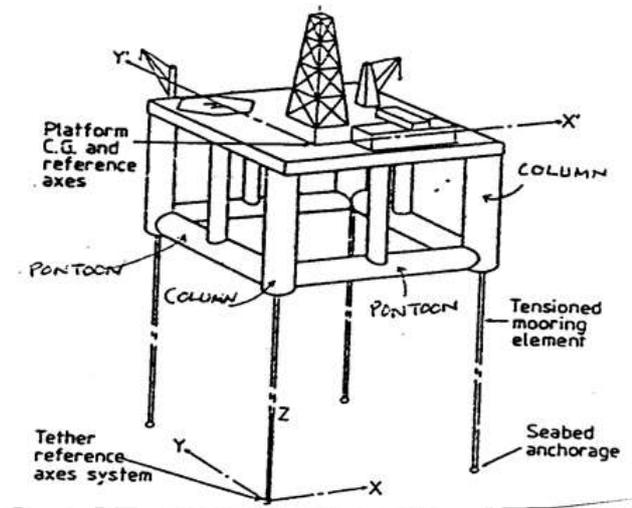
Gambar 2.2 *Jacket Platform*

(Sumber : Aprianto, 2020)

Menurut API RP-2A WSD, beban lingkungan merupakan beban yang bekerja pada struktur akibat dari fenomena alam. Arah beban lingkungan yang dianalisis ditentukan berdasarkan jumlah kaki *jacket*. Untuk *jacket* dengan kategori lainnya dibutuhkan arah tambahan lainnya. Beban angin yaitu beban dinamik pada keadaan alaminya tetapi sebagian struktur bangunan merespon beban angin seperti beban statik. Beban gelombang dapat dibangkitkan karena adanya angin yang berhembus. Beban gelombang yang diterapkan pada struktur anjungan lepas pantai merupakan kejadian dinamik.

Tension Leg Platform (TLP) termasuk struktur anjungan lepas pantai jenis *compliant structures* yang sangat cocok dipakai di perairan dalam. Karakteristik TLP berbeda dengan jenis struktur terpancang (*fixed jacket type*). perbedaannya adalah respon TLP yang “ikut bergerak” bersama gelombang yang justru tidak bersifat menahan gelombang. Struktur pendukung pada TLP terdiri dari platform, tendon (*tether*) dan *template* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Platform merupakan struktur pengapung yang di atasnya terdapat geladak (*deck*) tempat dimana fasilitas produksi dan tempat tinggal pekerja berada. Platform tersusun dari ponton dan kolom yang bisa memberikan gaya

apung yang cukup untuk menjaga agar bagian dasar atau lantai selalu berada di atas permukaan air bagaimanapun kondisi lautnya. Kolom ini diikat ke dasar laut dengan tendon dan dipancangkan dengan *template*. Gaya apung platform inilah yang memberikan gaya-tarik awal (*pretension*) pada tendon.



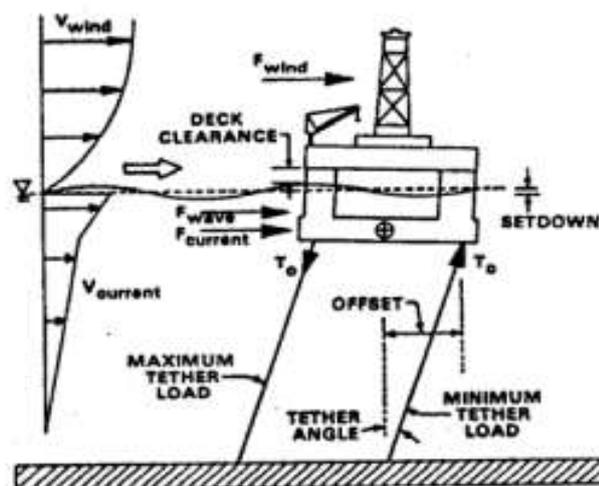
Gambar 2.3 Skema Struktur TLP

(Sumber : Prastianto, 2003)

Penambatan pada TLP yang kaku dapat menyebabkan gerakan platform ketika terkena gelombang menjadi terbatas. Kekakuan yang tinggi pada tendon juga menyebabkan terjadinya periode natural dalam arah gerakan tersebut sangat kecil. Geometri dari *hull* dan penempatan tendon umumnya dibuat simetris agar periode *roll* dan *pitch* sama. Periode natural TLP dalam arah *heave* dan *pitch* dalam pengaplikasian di perairan dalam (lebih dari 1000 *ft*) berkisar antara 1 sampai 5 detik. Sebaliknya, struktur TLP cukup lentur dalam arah *surge* karena gaya pengembali pada tendon yang umumnya kecil. Periode natural TLP dalam arah *surge* (*sway*) adalah cukup besar yaitu dalam orde 100 detik atau lebih (Prastianto, 2003).

2.2 Gaya Gelombang Pada *Tension Leg Platform*

Gelombang laut adalah peristiwa alam yang dapat menimbulkan ayunan akibat adanya massa air yang bergerak pada permukaan laut. Bentuk gelombang laut bervariasi dan sangat kompleks sehingga sulit digambarkan secara sistematis dan hampir tidak dapat diuraikan karena ketidaklinieran, tiga dimensi dan mempunyai bentuk yang acak. Berbagai bentuk gelombang cenderung tidak menentu dan tergantung pada beberapa sifat gelombang seperti periode dan tinggi gelombang yang terbentuk (Triadmojo, 1999). Adapun arah dari gangguan akibat gelombang air laut yang bekerja pada struktur *Tension Leg Platform* yaitu *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*. Gaya-gaya yang bekerja pada TLP dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Skema gaya-gaya yang bekerja pada TLP

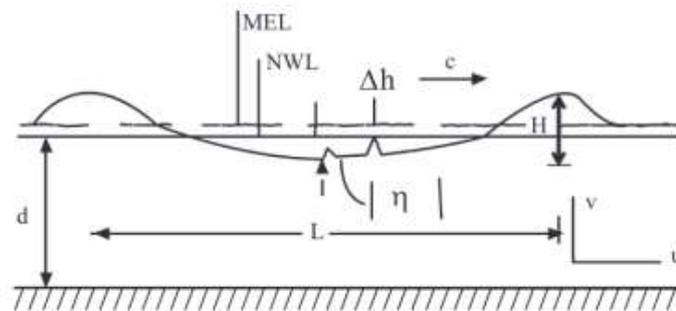
(Sumber : Prastianto dan Sutha, 2003)

2.3 Teori Ombak

TLP merupakan sebuah struktur lepas pantai (*offshore structure*) yang bebannya berasal dari pasang surut air laut, ombak, arus, angin dan gempa bumi. Umumnya beban lingkungan yang terjadi pada TLP yaitu ombak. Banyak sekali teori ombak yang menjelaskan tentang partikel air dan profil ombak, pada umumnya teori ombak yang banyak digunakan yaitu teori ombak

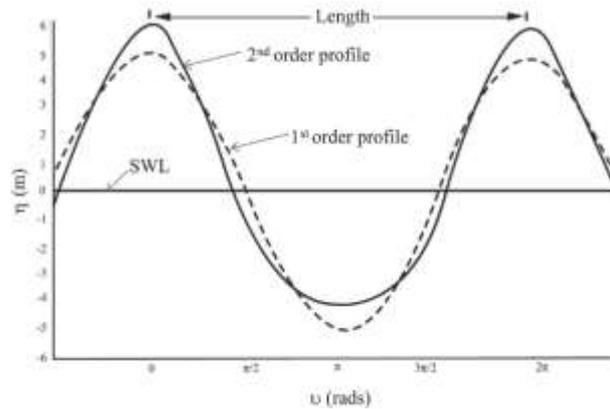
linier atau disebut juga teori Airy. Teori ini banyak digunakan karena asumsi yang sederhana. Selain teori airy, ada beberapa teori lain seperti teori gelombang Stokes, Cnoidal dan Solitary.

Teori Airy termasuk ke dalam teori Stokes orde pertama. Teori yang dikembangkan oleh Airy pada 1845, didasarkan pada gerakan ombak yang cukup kecil sehingga kondisi batas dari *free surface*-nya dapat dilinearisasi. Dengan mengabaikan orde yang lebih tinggi dari persamaan yang digunakan pada teori Stokes, maka teori Airy relatif untuk ketinggian ombak yang kecil dibandingkan panjang ombak, seperti terlihat pada Gambar 2.5 berikut.



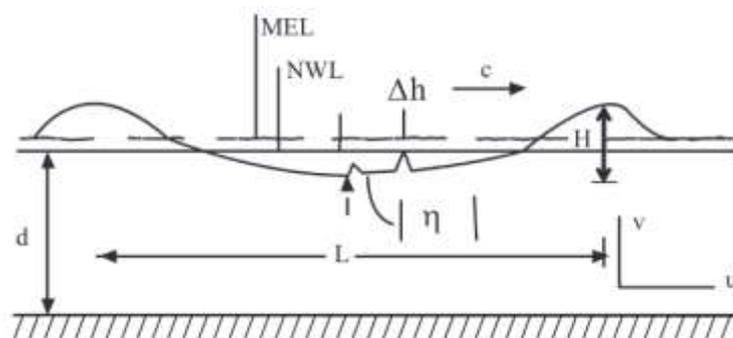
Gambar 2.5 Sketsa definisi gelombang
(Sumber : Mulyabakti dkk., 2016)

Untuk merepresentasikan kondisi ombak yang menengah, dapat digunakan teori Stokes pada orde tinggi. Teori Stokes mengasumsikan kecepatan potensial sebagai deret kuadrat dari parameter gangguan dan solusi diperoleh jika kondisi ombak tidak terlalu curam dan kedalaman laut tidak terlalu rendah (Sarpkaya, 2010). Teori Stokes merupakan modifikasi dari teori Airy yang tidak cukup pada keadaan ombak yang besar. Perhitungan pada teori Stokes memakai konsep non-linearitas dan memiliki orde tinggi. Pada umumnya, semakin tinggi orde dari teori ombak, maka akan semakin tinggi batasan dari ketinggian ombak yang bisa diprediksi. Pada teori ini, kenaikan ombak, kecepatan orbital, perpindahan, kecepatan jalannya massa dan tekanan merupakan variabel yang tidak diabaikan. Pada Gambar 2.6 dapat dilihat perbedaan bentuk profil ombak dengan teori Airy (Sundar, 2016).



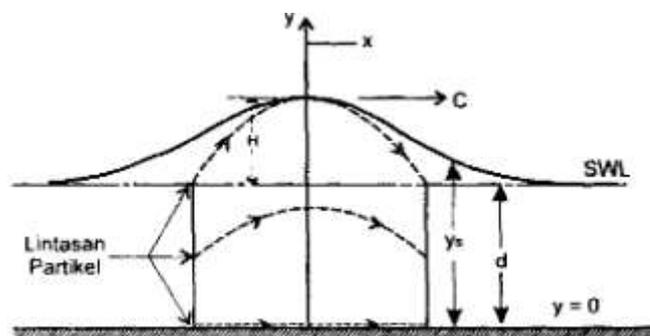
Gambar 2.6 Perbandingan teori Airy dan Stokes
(Sumber: Sundar, 2016).

Pada kondisi laut yang dangkal, dapat digunakan teori Cnoidal. Teori ini pertama kali dikemukakan oleh Korteweg dan Devries pada 1895. Teori Cnoidal merepresentasikan ombak yang curam dengan puncak ombak yang lancip dan lembah ombak yang cekung dalam. Teori Cnoidal memiliki keterbatasan yaitu tidak valid terhadap kondisi panjang ombak yang sangat panjang atau tidak terhingga. Apabila panjang gelombangnya bertambah menuju tak hingga, bentuk teori ini berubah mendekati teori *solitary*. Deformasi dari ombak dilakukan dengan menggunakan teori ini, yang sangat baik mendeskripsikan gerakan ombak pada perairan dangkal. Pada Gambar 2.7 dapat dilihat lebih jelas bentuk profil dari ombak cnoidal (Sundar, 2016).



Gambar 2.7 Gelombang Cnoidal
(Sumber: Sundar, 2016).

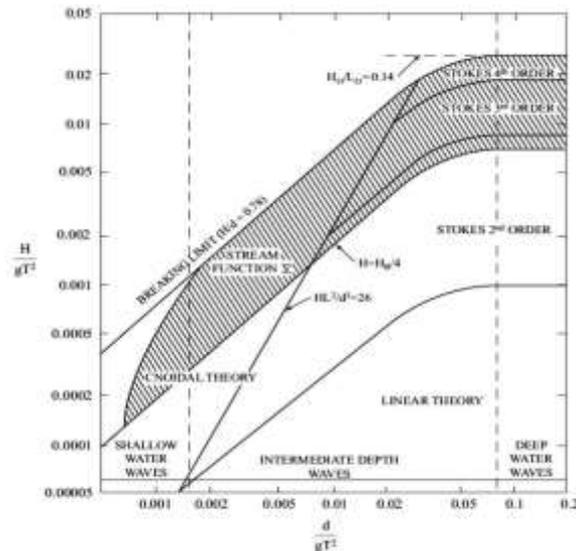
Ombak *solitary* merupakan sebuah gelombang translasi, dimana kecepatan partikel airnya hanya berpindah ke arah penjalaran gelombang. Penggunaan teori ombak solitary harus berdasarkan beberapa parameter yang dihasilkan ombak yaitu periode, ketinggian dan kedalaman. Setiap teori ombak penerapannya hanya berlaku dalam kondisi tertentu. Profil ombak *solitary* benar-benar berada di atas *still water level* (ketinggian air tetap) dan bentuk *crest*-nya menjadi lebih tinggi dengan profil *trough* yang lebih mendatar menjadikannya tidak periodik serta memiliki panjang gelombang yang tidak jelas. Ombak solitary ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 Gelombang *solitary*

(Sumber: Sundar, 2016).

Parameter ombak yaitu periode, ketinggian, dan kedalaman merupakan hal yang penting untuk memilih teori ombak. Tidak semua teori ombak cocok untuk diterapkan pada segala kondisi. Wilayah penerapan teori ombak dibagi berdasarkan periode, ketinggian dan kedalaman dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 validasi untuk bermacam teori ombak (Sumber: Le Méhauté, 1976).

2.4 Persamaan Morison

Persamaan Morison disusun oleh Morison pada tahun 1950 untuk menggambarkan gaya gelombang horizontal yang bekerja pada sebuah benda bertelapak secara vertikal yang terpancang di dasar perairan hingga timbul ke permukaan air. Morison menyatakan bahwa gaya yang ditimbulkan oleh gelombang permukaan utuh (*unbroken surface wave*) pada sebuah benda bertelapak secara vertikal tersebut tersusun dari dua komponen gaya yaitu komponen gaya inersia dan gaya seret (*drag force*). Partikel air yang menyebar pada gelombang akan membawa sebuah momentum. Momentum tersebut akan berujung pada terbentuknya gaya inersia yang akan mengalami akselerasi ketika melewati sebuah benda bertelapak.

Dengan kombinasi antara dua gaya tersebut serta komponen kecepatan dan percepatan, perhitungan dapat dilakukan untuk melihat gaya yang terjadi pada benda. Studi yang telah dilakukan oleh Keulegan dan Carpenter (1958), menunjukkan bahwa gaya-gaya non-dimensional berhubungan dengan parameter KC dan kemudian dilaporkan bahwa koefisien *drag* dan inersia memiliki hubungan dengan bilangan Keulegan-Carpenter (KC). Dengan

demikian, persamaan Morison didapat dengan cara menggabungkan komponen gaya inersia dan komponen gaya seret di atas. Jadi gaya per satuan panjangnya adalah:

$$F = \rho C_I A \ddot{u} + \frac{1}{2} \rho C_D D u |u| \quad (2.1)$$

Untuk nilai kecepatan pada persamaan Morison yaitu :

$$u = \frac{\pi 0,6m}{0,65s} \times \frac{\cosh(k \times 0,6)}{\sinh(k \times 0,6)} \times \cos \omega \quad (2.2)$$

Dan untuk nilai percepatannya yaitu:

$$u = \frac{2\pi^2 0,6m}{0,65s^2} \times \frac{\cosh(k \times 0,6)}{\sinh(k \times 0,6)} \times \sin(-\omega) \quad (2.3)$$

Dimana :

F = Gaya morison per satuan panjang, N/m

ρ = Massa jenis air laut, kg/m³

A = Luas penampang struktur, m²

D = Diameter luar struktur, inch, mm

C_I = Koefisien inersia

C_D = Koefisien seret

u = Kecepatan horizontal partikel gelombang, m/s

\ddot{u} = Percepatan horizontal partikel gelombang, m/s²

2.5 Teori Getaran Pada TLP

Getaran merupakan struktur yang memiliki massa dan elastisitas yang dapat bergerak relatif dan terjadi secara berulang-ulang dalam interval waktu tertentu. Getaran dapat menimbulkan bunyi, merusak komponen mesin, mengubah gaya yang tidak diinginkan, dan dapat menggerakkan benda yang didekatnya. Getaran dapat terjadi karena adanya eksitasi baik dari dalam maupun dari luar sistem. akan tetapi, efek dari getaran yang ditimbulkan sangat bergantung pada frekuensi, eksitasi dan elemen-elemen dari sistem getaran itu sendiri (Girdhar dkk. 2004).

Eksitasi getaran sama sekali tidak dapat dihilangkan, namun dapat dilakukan upaya untuk meminimalkan efek gaya-gaya eksitasi yang terjadi terhadap sistem. Umumnya, sebuah benda tidak menginginkan getaran karena dapat menyebabkan kerusakan. Namun tidak semua getaran yang terjadi menyebabkan efek yang merugikan, tetapi ada juga efek getaran yang dapat dimanfaatkan. (Yue-min dan Yantek, 2009).

Gerak osilasi dari sistem mekanik di sekitar titik/posisi seimbang dapat didefinisikan sebagai getaran mekanik. Getaran dapat terjadi karena adanya gaya eksitasi. Hampir semua mesin yang bergerak akan mengalami getaran. Pada beberapa hal, getaran yang berlebih sangat tidak diinginkan karena getaran dapat mengganggu kenyamanan, menyebabkan ketidakpresisian, mengurangi kualitas kerja mesin-mesin perkakas, dan bahkan getaran juga dapat merusak konstruksi mesin.

Berbagai upaya dilakukan untuk dapat meredam atau bahkan meminimalisir getaran. Meredam getaran dilakukan dengan cara meminimalkan gaya-gaya eksitasi. Akan tetapi, dapat juga dilakukan dengan memasang suatu peredam. Untuk itu meredam getaran berarti menurunkan simpangan massa yang terjadi karena gaya eksitasi getaran (Dewanto, 1999).

Gerakan bolak-balik dalam jangka waktu tertentu disebut dengan Getaran. Getaran berkaitan dengan gerak bolak-balik benda dan gaya yang terkait dengan gerak tersebut. Setiap benda yang memiliki nilai massa dan elastisitas dapat bergetar. Sebagian mesin dan teknik rekayasa struktur dapat bergetar sampai derajat tertentu dan biasanya rancangan tersebut memerlukan pertimbangan sifat osilasinya. Pada umumnya, ada dua jenis getaran, yaitu getaran bebas dan getaran paksa.

A. Getaran Bebas

Getaran bebas adalah getaran yang terjadi ketika sistem berosilasi akibat gaya pada sistem itu sendiri tanpa adanya gaya dari luar. Gaya yang bekerja pada sistem yaitu gaya inersia, gaya pegas, dan gaya gesek. Akibat gaya gesekan, getaran dapat hilang seiring dengan waktu. Getaran ini disebut getaran bebas (*free vibration*).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.4)$$

Atau :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (2.5)$$

B. Getaran Paksa

Getaran paksa merupakan gerak osilasi benda yang terjadi akibat adanya gaya dari luar yang bekerja pada sistem selama gerakan getarannya. Disamping mengikuti frekuensi gaya eksitasi, getaran paksa pada sistem cenderung berada pada frekuensi sendiri. Gaya eksitasi sinusoidal secara perlahan dapat menghilang akibat adanya gesekan. Dengan demikian sistem akan bergetar pada frekuensi gaya eksitasi dengan mengabaikan kondisi awal atau frekuensi pribadi sistem. Bagian getaran yang berlanjut terus disebut getaran keadaan *steady* atau respon sistem. Respon sistem sangat dibutuhkan dalam analisa getaran karena efek sinambungnya.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (2.6)$$

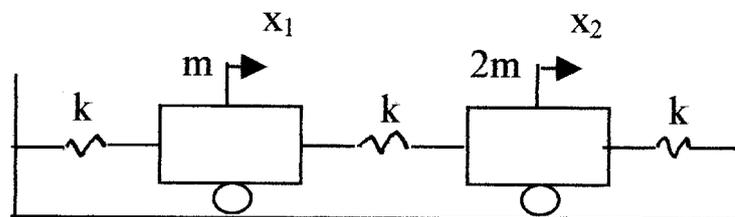
Getaran bebas dapat terjadi ketika gerakan dipertahankan oleh gaya gravitasi atau gaya elastisitas, seperti misalnya gerakan ayunan sebuah bandul atau getaran benda elastis. Dengan kata lain, sistem berosilasi karena gaya-gaya yang ada di dalam sistem itu sendiri (*inherent*) telah bekerja dan tidak ada gaya luar sistem yang bekerja. Getaran paksa disebabkan gaya periodik eksternal atau gaya *intermittent* yang diberikan pada sistem. Dengan kata lain, sistem berosilasi karena eksitasi gaya luar dan dipaksa untuk bergetar pada frekuensi eksitasi. Jika frekuensi eksitasi sama dengan salah

satu frekuensi natural sistem, maka akan didapat keadaan resonansi, dan osilasi besar yang berbahaya mungkin terjadi (Lesmana, 2002).

2.6 Sistem Getaran Dua Derajat Kebebasan

Sistem getaran dengan dua derajat kebebasan memiliki dua frekuensi natural dan memerlukan dua koordinat untuk menyatakan persamaan geraknya. Bila getaran terjadi pada frekuensi tersebut maka terdapat hubungan yang pasti antara amplitudo kedua koordinat dan konfigurasi dinyatakan sebagai ragam normal. Sehingga sistem getaran ini akan memiliki dua bentuk ragam normal sebagaimana frekuensi naturalnya.

Pada sistem getaran paksa maka frekuensi yang terjadi adalah frekuensi eksitasi dan amplitudo kedua koordinat akan terjadi maksimum pada kedua frekuensi naturalnya. Model dari sistem getaran dengan dua derajat kebebasan yang sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Sistem getaran dua derajat kebebasan
(Sumber : Dewanto, 1999)

Berdasarkan persamaan newton untuk masing - masing massa memberikan persamaan gerak sebagai berikut :

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_2 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = f_1(t) \quad (2.7)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + (c_2 + c_3) \dot{x}_2 - k_2 x_1 + (k_2 + k_3) x_2 = f_2(t) \quad (2.8)$$

Dimana

m_1 = massa pertama (kg)

m_2 = massa kedua (kg)

- c = koefisien redaman (Ns/m)
 k_1 = kekakuan pegas 1 (N/m)
 k_2 = kekakuan pegas 2 (N/m)
 k_3 = kekakuan pegas 3 (N/m)

2.7 Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) merupakan respon suatu benda akibat adanya gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur. Hal ini dikarenakan RAO adalah alat untuk mentransfer beban luar (gelombang) dalam bentuk respon pada suatu struktur. RAO menunjukkan informasi tentang karakteristik gerak struktur bangunan laut dalam bentuk grafik, dengan ordinat berupa rasio antara amplitudo gerakan sedangkan absisnya adalah frekuensi. Persamaan RAO untuk gerakan translasi adalah

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \quad (m/m) \quad (2.9)$$

Dimana :

$X_p(\omega)$ = Amplitudo struktur, m

$\eta(\omega)$ = Amplitudo gelombang, m

grafik respon gerak struktur terapung pada dasarnya terbagi bagi menjadi tiga bagian:

- a. Pertama adalah daerah sub-kritis. Yaitu bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang. Disebut juga *conturing* karena pada daerah ini bangunan laut akan mengikuti pola gelombang yang panjang, sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan sepadan dengan amplitudo gelombang.
- b. Kedua adalah daerah kritis, daerah pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kemudian diteruskan ke

pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi natural, yaitu daerah resonansi, sehingga respon gerakan mengalami pembesaran kurva, atau amplitudo gelombang akan beberapa kali lebih kecil daripada amplitudo gerakan.

- c. Ketiga adalah gerakan super kritis, merupakan daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode pendek). Pada daerah ini respon gerakan akan mengecil. Semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, atau semakin tinggi frekuensi gelombangnya, maka bangunan laut seperti sedang bergerak di atas air yang datar. kondisi ini dapat diistilahkan sebagai *platforming*.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan meliputi proses eksperimen dan perhitungan numerik dari *tension leg platform* yang terdampak gaya hidrodinamis akibat ombak. Eksperimen dilakukan dengan bantuan media akuarium dan alat pengombak yang kemudian dibandingkan dengan data yang didapatkan, termasuk gaya-gaya yang bereaksi pada *tension leg platform* selama dikenai gaya di dalam akuarium. Perhitungan numerik dapat dilakukan sebagai data acuan dari hasil eksperimen.

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilakukan dari bulan Januari 2023 hingga bulan Juni 2023 dan dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Struktur di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.2 Tahapan Penelitian

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan berbagai referensi, teori, dan data terkait dengan penelitian, baik itu jurnal penelitian yang telah dilakukan oleh sesama peneliti ataupun buku yang berkaitan. Proses studi literatur juga meliputi pengumpulan parameter yang dibutuhkan.

3.2.2 Persiapan Alat

Proses ini meliputi validasi dan kalibrasi alat uji pada laboratorium dengan menggunakan sensor *ultrasonic*.

3.2.3 Pengujian

Pengujian dilakukan apabila data, referensi dan persiapan alat simulasi telah selesai dan siap digunakan.

3.2.4 Analisis dan Pengolahan Data

Analisis dan pengolahan data dilaksanakan setelah pengujian selesai dan telah didapatkan data hasil eksperimen. Data yang diambil adalah gaya yang terjadi pada *tension leg platform*.

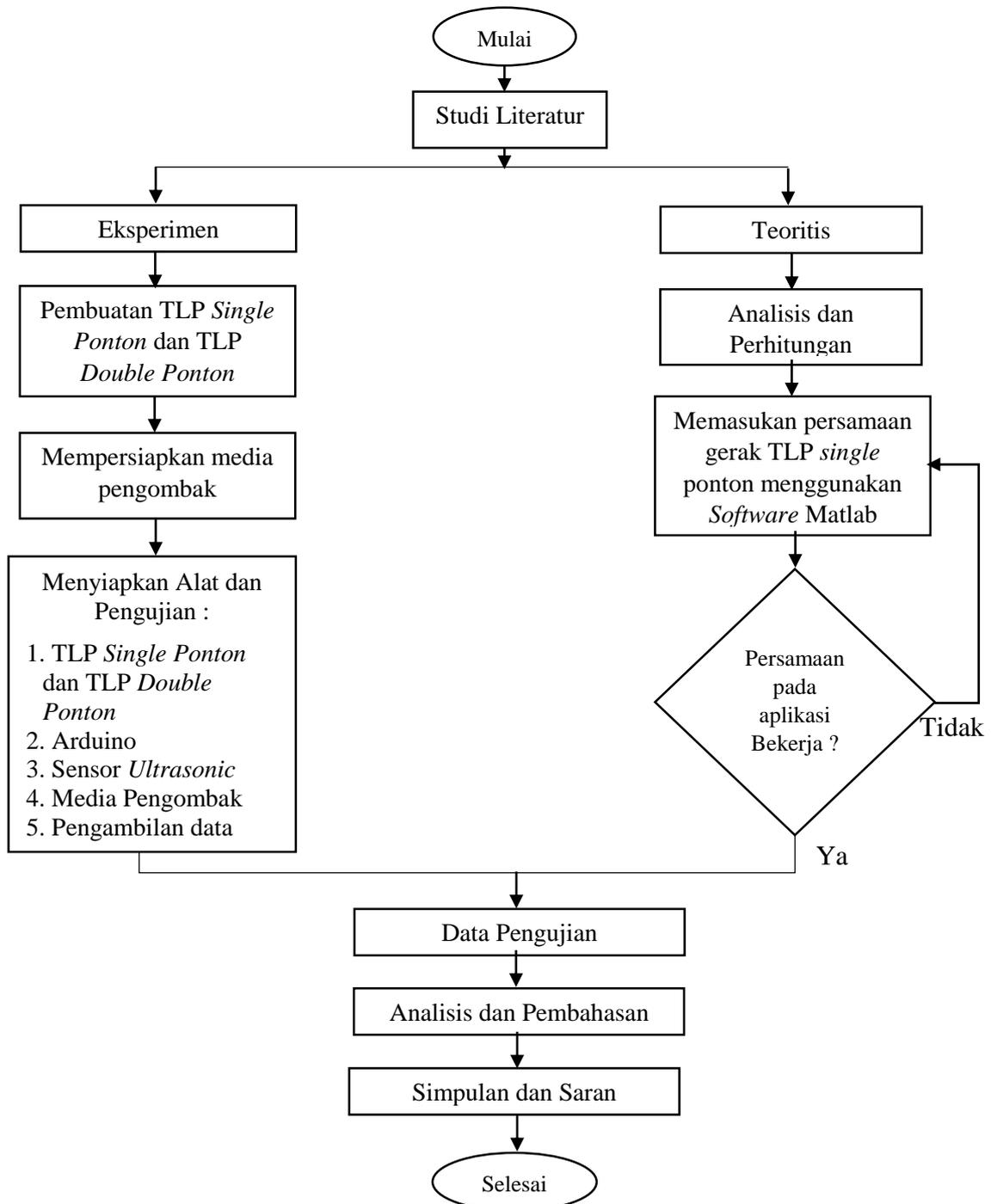
3.2.5 Pembuatan Laporan Akhir

Setelah analisis selesai, kesimpulan dibuat pada laporan akhir hasil penelitian.

3.3 Alur Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan referensi dan dasar teori yang telah didapatkan pada studi literatur. Studi literatur memanfaatkan buku dan jurnal terkait dengan penelitian. Buku dan jurnal diperoleh dengan memanfaatkan bantuan mesin pencari seperti *Google* dan fasilitas Perpustakaan Universitas Lampung. Setelah semua data dan referensi pendukung telah cukup, maka data-data tersebut dikumpulkan dan digabungkan. Proses pengumpulan data terkait dengan mencari informasi tentang simulasi dan percobaan yang sebelumnya pernah dilakukan. Setelah data siap, maka dilakukanlah tahapan simulasi dan eksperimen.

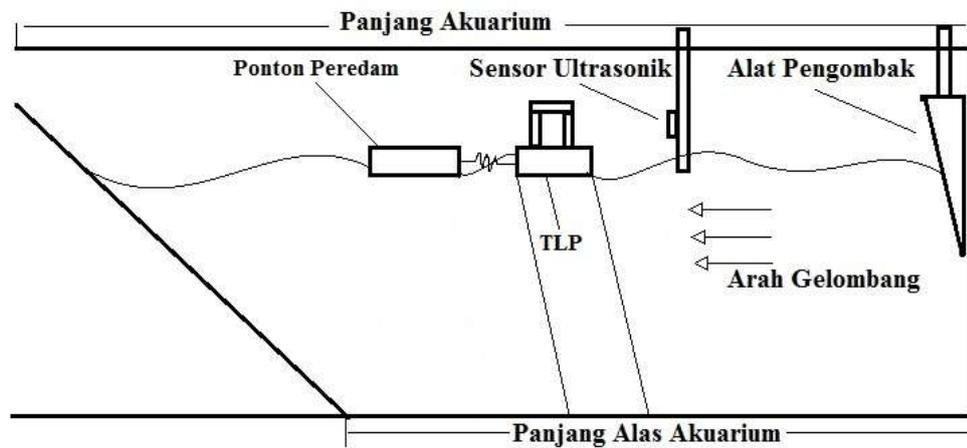
Eksperimen dilaksanakan bantuan *software* dan program Arduino, sensor *ultrasonic*, dan eksperimen dilakukan dengan menggunakan alat uji pengombak yang sudah tersedia di Laboratorium Mekanika Struktur. Sebelum ke tahap selanjutnya, terlebih dahulu kualitas data dinilai agar sesuai dengan kebutuhan. Kemudian, data dibandingkan dan dianalisis. Analisis dilakukan dengan data dari referensi. Terakhir, dilakukan pembuatan kesimpulan laporan penelitian yang disatukan dalam laporan hasil akhir penelitian. Secara umum, alur penelitian yang telah dilakukan, digambarkan pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

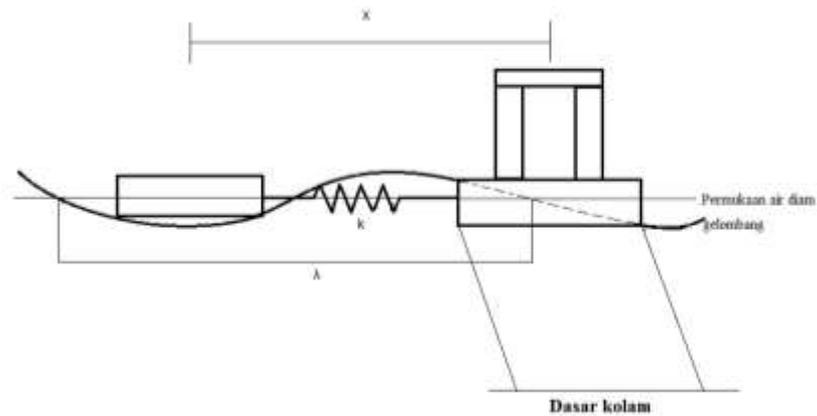
3.4 Metode Pengujian

Pengujian dilakukan dengan bantuan alat uji kolam pengombak dengan dimensi 360x80x80 cm dengan ketinggian air 60 cm. Kemudian dilakukan pembangkitan ombak menggunakan motor listrik dan mekanisme pembangkit ombak yang sudah didesain sedemikian rupa, sehingga ketika motor listrik dinyalakan, maka alat pengombak akan bergerak menghasilkan ombak dengan amplitudo dan frekuensi, seperti pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 Skema alat uji.

Pengujian pada penelitian ini menggunakan 2 TLP yaitu model TLP *single* ponton dan TLP *double* ponton dengan telapak persegi sebagai peredam dari gerakan TLP. Untuk respon dinamik, TLP ini menggunakan perhitungan teoritik dan eksperimen. Perhitungan secara teoritik bertujuan untuk mempermudah peneliti dalam melakukan mencari parameter atau optimasi terbaik dari struktur TLP dalam meredam gerakan gelombang air laut (eksitasi). Untuk lebih rincinya dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Konfigurasi Alat Uji.

Keterangan :

k = Konstanta pegas , (N/m)

x = Jarak antara TLP dengan ponton gandengan, (m)

λ = Panjang gelombang (m)

Setelah dilakukan pengujian dengan beberapa variabel, maka didapatkan beberapa data, diantaranya perbedaan panjang jarak antara TLP dengan gandengan, rasio massa ponton gandengan dengan ponton utama (m_{pg}/m_{pu}), dan RAO. Kemudian data dituliskan pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Variasi Pengujian

No	Jarak x	Massa (gram)	M_{pg}/m_{pu}	RAO
1	0	0		0,2993
2	$1/4 \lambda$	100	0,478	0,2257
		200	0,6	0,3335
		300	0,72	0,2201
3	$2/4 \lambda$	100	0,478	0,1893
		200	0,6	0,2707
		300	0,72	0,2789
4	$3/4 \lambda$	100	0,478	0,2570
		200	0,6	0,2402
		300	0,72	0,2368
5	λ	100	0,478	0,1934
		200	0,6	0,1998
		300	0,72	0,2386

Perhitungan dilakukan menggunakan nilai hasil eksperimen pada pengujian menggunakan parameter berdasarkan kondisi ombak di kolam pengujian yang terdapat di Laboratorium Mekanika Struktur. Validasi alat dilakukan dengan meletakkan TLP single ponton dan TLP *double* ponton ke dalam air dengan menambatkan TLP ke dasar kolam sesuai dengan kedalaman kolam. Kemudian untuk memulai pengujian, maka pembangkit ombak dinyalakan. Ketika ombak yang dihasilkan menghantam TLP, maka sensor yang berada di dekat TLP akan mengukur besaran yang terjadi. Sensor akan membaca jarak yang dihasilkan kemudian mengubahnya ke sinyal elektrik dan menginput sinyal ke aplikasi Arduino. Kalibrasi dilakukan sebanyak 3 kali untuk meminimalisir deviasi.

Setelah eksperimen selesai, maka verifikasi data dilakukan dengan membandingkan data *displacement*nya terhadap analisis numerik yang dilakukan pada aplikasi matlab. Pemilihan teori ombak merujuk pada data referensi. Hasil perhitungan dari analisis dan eksperimen alat kemudian dijadikan acuan dari keefektifan kerja alat. Kemudian hasil eksperimen dibandingkan dengan hasil percobaan dengan menggunakan simulasi. Setelah rangkaian eksperimen selesai maka dilakukan analisis data dan kemudian dilakukan dengan pembuatan laporan akhir penelitian.

3.5 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan secara eksperimen dengan menggunakan sensor *ultrasonic*. Sensor *ultrasonic* akan membaca gerakan TLP dan mengirimkan data ke aplikasi Arduino. Untuk memudahkan dalam menganalisis, data hasil pembacaan dari aplikasi Arduino dikirimkan ke dalam *software microsoft excel*.

Sensor *ultrasonic* adalah modul berupa sensor jarak yang dapat membaca sinyal dengan rentang jarak mulai dari mulai 2 cm hingga 400 cm (4 meter), dengan akurasi sekitar 3 mm. Pada sensor ultrasonik terdapat beberapa komponen seperti *receiver*, *transmitter*, dan *control circuit*. Sensor ini setiap detiknya membaca jarak spesimen dan mengirimkan sinyal berupa data hasil

pembacaan ke aplikasi Arduino. Adapun proses pengambilan data menggunakan sensor ultrasonic sebagai berikut:

1) *Setting* data program

Setting data program dilakukan menggunakan aplikasi Arduino. *Setting* data program bertujuan untuk membuat variabel jarak dan durasi. Langkah pertama yaitu pembuatan variabel untuk sensor pertama. Variabel echo pada pin 3 berfungsi sebagai receiver (penerima sinyal suara) dan *trigger* berfungsi sebagai *Transmitter* (pengirim sinyal) yang diset pada pin 2. Kemudian untuk sensor kedua dilakukan pembuatan variabel echo pada pin 5 dan variabel *trigger* pada pin 4. Setelah itu, klik done di pojok kiri atas apabila program arduino telah selesai dibuat dan sensor menunjukkan bacaan yang sesuai.

2) *Data Streamer (Microsoft Excel)*

Untuk memudahkan analisis, maka pembacaan data dari aplikasi Arduino diakuisisi ke dalam data *spreadsheet*. Akuisisi data dilakukan dengan menggunakan bantuan *Data Streamer* yang akan berbentuk matriks kolom. Proses pembacaan data akan dikatakan berhasil apabila mendapatkan output grafik dan nilai amplitudo perpindahan objek.

3.6 **Desain Kolam Ombak**

Kolam ombak pada Laboratorium Mekanika Struktur memiliki dimensi 360×80×80 cm. Pada salah satu bagian ujung kolam terdapat sebuah kaca miring dan tumpukan berongga dari potongan pipa yang digunakan untuk membantu profil dari ombak agar terdeformasi dengan baik dan ujung lainnya memiliki mekanisme pembaangkit ombak yang terpisah dengan kolam. Akuarium atau kolam terbuat dari kaca dengan ketebalan 10 mm yang disambungkan dengan menggunakan lem kaca yang ditambahkan lem silikon kemudian diperkuat dengan rangka besi siku. Rangkaian besi siku yang mengelilingi kolam ombak disambung dengan bantuan las agar lebih kokoh dan pada bagian bawah terdapat rangka kayu yang berfungsi menopang kolam menjauh dari lantai.

Mekanisme pembangkit ombak yang digunakan dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu sistem penggerak dan media ombak. Pada sistem penggerak terdapat komponen-komponen yang menjalankannya seperti motor listrik, sistem transmisi, *pulley*, *belt*, *gearbox*, poros, *bearing*, dan batang pendulum. Kemudian pada media ombak terdapat rangkaian mekanisme pembangkit ombak yang telah dirancang sedemikian rupa. Gerakan dari motor listrik diteruskan oleh sistem transmisi berupa *belt* dan *pulley* kemudian menggerakkan alat pengombak sehingga menghasilkan gelombang ombak dengan frekuensi dan amplitudo yang dapat ditentukan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian secara eksperimen yang telah dilakukan, penulis dapat menarik kesimpulan sebagai berikut.

Hasil respon TLP *single* ponton dengan TLP *double* ponton, tinggi gelombang sama yaitu 10cm, amplitudo ombak kedua TLP sama yaitu 3,25cm, frekuensi kedua TLP juga sama yaitu 1,7Hz, dan dengan periode yang sama yaitu 0,65s. nilai amplitudo pada TLP *single* ponton sebesar 1,972 cm dan -1,868cm. Kemudian pada pengujian TLP *double* ponton, amplitudo tertinggi ada pada jarak $x = 3/4 \lambda$ dengan rasio massa m_{pg}/m_{pu} 0,472 yaitu 3,069cm, sedangkan amplitudo terendah ada pada TLP *double* ponton pada jarak $x = 1/2 \lambda$ dengan rasio massa 0,72 sebesar -1,69cm. Adapun hasil terbaik (paling stabil dengan nilai RAO terendah) untuk TLP *double* ponton yang mampu menahan gaya gelombang adalah TLP dengan jarak $x = 1/2 \lambda$, dimana TLP tersebut mampu mempertahankan kestabilannya ketika mendapat gangguan secara horizontal dari air. Model TLP *double* ponton dengan jarak $x = 1/2 \lambda$ terbukti mampu meredam getaran pada variasi rasio massa m_{pg}/m_{pu} 0,472 daripada TLP variasi lainnya.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat penulis berikan pada penelitian ini diantaranya.

1. Melakukan pengujian dengan parameter dan variabel yang berbeda.
2. Melakukan penelitian lebih lanjut menggunakan aplikasi seperti Matlab dan Ansys.

DAFTAR PUSTAKA

- Akmal J., Tanti N., Lubis A., Intan D.F.K. 2022. Respon Dinamis Tension Leg Platform (TLP): Studi Komparasi Antara Penggunaan Ponton Telapak Lingkaran Dengan Ponton Telapak Bujur Sangkar. Vol. 8, Jurnal Teknik Mesin, Universitas Bangka Belitung.
- Almutahir.2016.Analisa Respon Gerak Struktur *Floating Wind Turbine Tipe Spar* Dengan Variasi Sistem Tambat. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Aprianto F. G., Ricky L. Tawekal.2020. Desain Dan Analisis Struktur Anjungan Lepas Pantai Tipe 4 Kaki Di Perairan Sumatera Bagian Tenggara. Program Studi Sarjana Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung Jalan Ganesha 10 Bandung.
- Dewanto Joni, 1999. Kajian Teoritik Sistem Peredam Getaran Satu Derajat Kebebasan. Jurnal Teknik Mesin Vol. 1, No. 2, Oktober 1999 : 156 – 162. Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin - Universitas Kristen Petra.
- Djarmiko, Eko. B., 2003. Analisis Kelelahan Struktur Bangunan Laut. Kursus singkat Offshore Structure Design and Modelling, Surabaya.
- El-gamal, A.R., and Refat, H.M., 2014. *Influence of the Density of Water on the Dynamic Behavior of Square Tension Leg Platform*. American Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol. 2, No. 4, pp. 122-129
- Girdhar, P., Scheffer C., 2004. *Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier. Netherland.
- Houston. 2003.*Floating Production Installations*, American Bureau of Shipping.
- Kharade, A.S., Kapadiya S.V., 2014. *Offshore Engineering: an Overview of Types and Loadings on Structures*. Int J. struct and Civil Engg.
- Le Méhauté, B., (1976), An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves (Springer Study Edition). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
<https://www.springer.com/gp/book/9783642855672>

- Lesmana, A., 2002. *Studi Parametrik Respon Dinamis Tension Leg Platform Pada Gelombang Reguler*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS.
- Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, J.W. and Scaaf, S.A., 1950. *The Forces Exerted by Surface Waves on Piles*. Petroleum Transactions AIME, Vol.189, pp.149-154.
- Mulyabakti,C., Jasin M. I., Mamoto, J.D. 2016 Analisis Karakteristik Gelombang Dan Pasang Surut Pada Daerah Pantai PAAL Kecamatan Likupang Timur Kabupaten Minahasa Utara. Jurnal Sipil Statik Vol.4 No.9 September 2016. Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi Manado.
- Prastianto, R.W., Sutha Gde. P. 2003. Respon Dinamik Nonlinier Struktur *Tension Leg Platform* Akibat Gaya Gelombang. Jurnal Teknik Sipil ITS Vol. 10, No. 3, hal. 81-91.
- Sa'dyah Mirba H. D., Eko B. Djatmiko, Murdjito. 2012. Analisis *Fatigue Top Side Support Structure Silindris Seastar Tension Leg Platform (TLP)* Akibat Beban Lingkungan *North Sea*. JURNAL TEKNIK ITS Vol. 1, No. 1.
- Sarpkaya, T., 2010. *Wave Forces On Offshore Structures*. Cambridge University Press.
- Sarpkaya, T., 1976. *Vortex Shedding and resistance in harmonic flow about smooth and rough circular cylinders at high reynolds number*. Naval Postgraduate School Monterey CA.
- SBMAtlantia. 2011. Matterhorn Seastar TLP [Online]. Available: <http://www.sbmatlantia.com/products/floatingsolution/tlps/seastar/matterhorn>.
- Soegiono, 2004. *Teknologi Produksi dan Perawatan Bangunan Laut*. Airlangga University Press, Surabaya.
- Sundar, V., 2016. *Ocean Wave Mechanics: Applications in Marine Structures*. John Wiley & Sons Ltd.
- Triadmojo, B., 1999. *Teknik Pantai*. FT. TGM, Yogyakarta
- Yanto Asmara, 2013. Analisa Unjuk Kerja Pengayak Getar Sebagai Sistem Getaran Dua Derajat Kebebasan Terhadap Pengayakan Abu Sekam Padi. Jurnal Momentum, Institut Teknologi Padang (ITP) Vol.15 No.2. Agustus 2013. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri.
- Yue-min, Z., 2009. "Dynamic Design Theory and Application of Large Vibrating Screen." *Procedia Earth and Planetary Science* 1. pp, 776-784.

Yantek, D.S., Camargo H.R., 2009. “*Structural Vibration as a Noise Source on Vibrating Screens.*” *Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers International Mechanical Engineering Congress and Exposition.* IMECE2009-12272. November 13-19.

