

**SKRIPSI**

**ANALISIS PENGARUH PELAT PEREDAM PITCH DI DASAR  
SPAR TERHADAP REDAMAN**

Disusun dan diajukan oleh

**ANDIKA SARIFUDDIN**

**D081 19 1033**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KELAUTAN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2023**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI****ANALISIS PENGARUH PELAT PEREDAM PITCH DI DASAR  
SPAR TERHADAP REDAMAN**

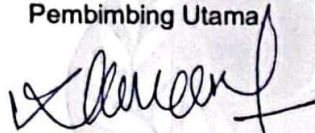
Disusun dan diajukan oleh

**ANDIKA SARIFUDDIN**  
D081 19 1033

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Sarjana pada Program Studi Teknik Kelautan  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal ...~~24.10.2013~~  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



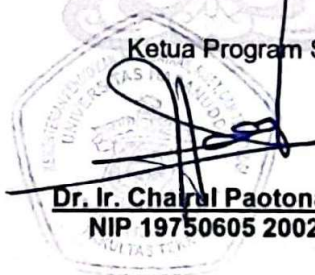
**Prof. Daeng Paroka, ST., MT., Ph. D.**  
NIP. 19720118 199802 1001

Pembimbing Pendamping,



**Fuad Mahfud Assidiq, ST., MT.**  
NIP. 19950929 202101 5001

Ketua Program Studi,



**Dr. Ir. Charal Paotonan, ST., MT**  
NIP 19750605 200212 1003

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Andika Sarifuddin  
NIM : D081191033  
Program Studi : Teknik Kelautan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul "ANALISIS PENGARUH PELAT PEREDAM PITCH DI DASAR SPAR TERHADAP REDAMAN" Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu, semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 24 Agustus 2023

Yang Menyatakan



  
Andika Sarifuddin  
D081191033

## ABSTRAK

**ANDIKA SARIFUDDIN.** *Analisis Pengaruh Pelat Peredam Pitch Di Dasar SPAR Terhadap Redaman.* (Dibimbing oleh Prof. Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D. dan Fuad Mahfud Assidiq, ST., MT.)

Kemajuan peradaban manusia dikala ini diiringi pula dengan meningkatnya permintaan guna memenuhi kebutuhan energi, termasuk kebutuhan terhadap minyak serta gas bumi. Aktivitas eksplorasi serta eksploitasi sumber daya minyak, energi, serta gas dikala ini semakin bergerak ke laut dalam. *SPAR* (Single Point Anchor Reservoir) merupakan jenis struktur terapung yang beroperasi pada laut sangat dalam (ultra-deepwater) mencapai kedalaman lebih dari 1000 m. Sistem *SPAR* tersebut dapat berfungsi sebagai rig dan sebagai *wind turbine*.

*SPAR* memiliki kemampuan gerak *pitch* yang besar karena ketinggian saratnya yang cukup dalam. Untuk mengurangi gerakan *pitch* tersebut, diperlukan adanya penambahan *pitch damping* dari sistem *SPAR* platform untuk menambah redaman terhadap gerakan tersebut. Pelat peredam *pitch* dapat menjadi solusi alternatif sebagai penambahan *pitch damping* untuk mengurangi gerakan *pitch* agar fungsi dari *SPAR* menjadi lebih optimal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan pelat peredam *pitch* di dasar pada *SPAR*.

Peningkatan *pitch damping* antara metode eksperimen dan numerik menunjukkan bahwa penambahan pelat peredam *pitch* di dasar *SPAR* menambah redaman hingga 12x redaman semula. Peningkatan besarnya *pitch damping* disebabkan oleh penurunan amplitudo *motion* yang menunjukkan bahwa adanya penambahan pelat peredam *pitch* dapat mengurangi besarnya amplitudo pada tiap siklus serta mempercepat redaman yang terjadi. Peningkatan nilai *pitch damping* yang terjadi, dipengaruhi pula dengan memanjangnya periode natural dari *SPAR*. Yang mana dengan memanjangnya periode natural dari struktur menandakan bahwa struktur beresilasi lebih lambat akibat penambahan pelat peredam *pitch* di dasar *SPAR*.

**Kata Kunci:** *DecayTest*, Periode Natural, *Pitch Damping*, *SPAR*.

## ABSTRACT

**ANDIKA SARIFUDDIN.** *Analysis of the Effect of Pitch Plate Damper in SPAR bottom on Damping.* (Supervised by Prof. Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D. and Fuad Mahfud Assidiq, ST., MT.)

*The advancement of human civilisation has been accompanied by an increasing demand for energy, including oil and gas. Exploration and exploitation of oil, energy and gas resources are now increasingly moving to the deep sea. SPAR (Single Point Anchor Reservoir) is a type of floating structure that operates in ultra-deepwater reaching depths of more than 1000 m. The SPAR system can function as a rig and as a wind turbine.*

*SPAR has a large pitch motion capability due to its deep draft. To reduce the pitch motion, it is necessary to increase pitch damping of the SPAR platform system to increase the damping of the motion. Pitch plate can be an alternative solution as an additional pitch damping to reduce pitch motion so that the function of SPAR becomes more optimal. The purpose of this study is to determine how the effect of the addition of pitch plate damper on the bottom of The SPAR.*

*The increase in pitch damping between experimental and numerical methods shows that the addition of pitch plate damper in the bottom of SPAR increases the damping up to 12x the original damping. The increase in the magnitude of pitch damping is caused by a decrease in motion amplitude, which shows that the addition of a pitch plate can reduce the amplitude of each cycle and accelerate the damping that occurs. The increase in pitch damping value that occurs is also influenced by the lengthening of the natural period of the SPAR. The lengthening of the natural period of the structure indicates that the structure oscillates more slowly due to the addition of the pitch plate on the SPAR bottom.*

**Keyword :** *Decay Test, Natural Periode, Pitch Damping, SPAR.*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI .....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN .....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT .....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
KATA PENGANTAR.....	x
BAB I LATAR BELAKANG.....	1
1.1.    Latar Belakang.....	1
1.2.    Rumusan Masalah .....	3
1.3.    Tujuan Penelitian .....	3
1.4.    Manfaat Penelitian .....	3
1.5.    Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA dan DASAR TEORI.....	5
2.1.    Tinjauan Pustaka .....	5
2.2.    Dasar Teori .....	6
2.2.1.    SPAR Platform .....	6
2.2.2.    Beban Hidrodinamika .....	8
2.2.3.    Gaya Eksitasi .....	9
2.2.4.    Gaya Reaksi.....	10
2.2.5.    Persamaan Gerak Bangunan Apung .....	12
2.2.6.    Periode Natural.....	14
2.2.7.    Titik Berat .....	14
2.2.8.    Jari-jari Girasi .....	15
2.2.9.    Kekakuan Struktur.....	15
2.2.10.    Koefisien Massa Tambah .....	16
2.2.11.    Redaman.....	16
2.2.12. <i>Decay Test</i> .....	17
2.2.13.    Koefisien Linier .....	19
2.2.14.    Teori Pemodelan .....	19
2.2.15.    Simulasi Numerik.....	21
2.2.16.    ANSYS Aqwa .....	22
2.2.17.    Validasi.....	24

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	25
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	25
3.2 Prosedur Penelitian.....	27
3.2.1. Studi Literatur .....	27
3.2.2. Persiapan dan Analisis Pemodelan .....	27
3.2.3. Perandacangan Model.....	29
3.2.4. Persiapan Instrumen Perekam Gerakan.....	29
3.2.5. Pengujian Model.....	30
3.2.6. Pengolahan Data.....	30
3.2.7. Simulasi Numerik.....	30
3.2.8. Perbandingan Hasil Studi Analisis .....	30
3.2.9. Kesimpulan.....	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Pemodelan Struktur .....	31
4.1.1 Pemodelan Model Eksperimen.....	31
4.1.2 Pemodelan Model Numerik .....	32
4.2 Massa Total Model.....	33
4.3 Distribusi Beban Model .....	35
4.4 Menghitung Titik Berat Model.....	37
4.4.1 Titik Berat Model tanpa Pelat peredam .....	37
4.4.2 Titik Berat Model dengan Pelat peredam .....	38
4.5 Menghitung Jari-jari Girasi .....	38
4.5.1 Jari-jari Girasi Model tanpa Pelat peredam.....	39
4.5.2 Jari-jari Girasi Model dengan Pelat peredam.....	39
4.6 Data dan properti SPAR Keseluruhan .....	40
4.7 Analisis eksperimen <i>Free Floating Decay Test</i> .....	41
4.8 Analisis Metode Numerik <i>Free Floating Decay Test</i> .....	49
4.9 Perbandingan Hasil Studi Analisis.....	60
BAB V.....	61
KESIMPULAN .....	61
5.1 Kesimpulan .....	61
5.2 Saran .....	61
DAFTAR PUSTAKA.....	62
LAMPIRAN I .....	64

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1. 1</b> Jenis-jenis SPAR.....	2
<b>Gambar 2. 1</b> Tipe SPAR.....	7
<b>Gambar 2. 2</b> Alternatif Bangunan SPAR.....	8
<b>Gambar 2. 3</b> Enam Jenis Gerak Bangunan Apung.....	12
<b>Gambar 2. 4</b> Hasil pengujian <i>free decay test</i> .....	17
<b>Gambar 2. 5</b> P-Q analisis dari <i>decay test</i> .....	19
<b>Gambar 2. 6</b> Proses diskritasi ( <i>Meshing</i> ).....	24
<b>Gambar 3. 1</b> Rancang model SPAR dengan Pelat peredam .....	28
<b>Gambar 3. 2</b> Model Pelat peredam.....	29
<b>Gambar 4. 1</b> Model eksperimen SPAR.....	32
<b>Gambar 4. 2</b> Model numerik SPAR .....	33
<b>Gambar 4. 3</b> Model SPAR dengan <i>pelat peredam</i> sebelum pengujian .....	41
<b>Gambar 4. 4</b> Grafik <i>Free Decay</i> model SPAR tanpa pelat peredam.....	42
<b>Gambar 4. 5</b> Grafik <i>Free Decay</i> model SPAR dengan pelat peredam .....	43
<b>Gambar 4. 6</b> Grafik <i>Pitch Decay</i> model SPAR dengan <i>full scale</i> .....	45
<b>Gambar 4. 7</b> Grafik <i>PQ analysis</i> model SPAR tanpa pelat peredam.....	47
<b>Gambar 4. 8</b> Grafik <i>PQ analysis</i> model SPAR dengan pelat peredam.....	47
<b>Gambar 4. 9</b> Grafik perubahan <i>Pitch Damping</i> metode eksperimen.....	48
<b>Gambar 4. 10</b> Grafik perubahan periode natural metode eksperimen.....	49
<b>Gambar 4. 11</b> Model SPAR setelah diinput.....	50
<b>Gambar 4. 12</b> Hasil <i>Meshing</i> pada SPAR .....	50
<b>Gambar 4. 13</b> Input sudut kemiringan awal struktur .....	52
<b>Gambar 4. 14</b> Hasil Tabel hidrostatik SPAR dengan pelat peredam di lunas .....	53
<b>Gambar 4. 15</b> Hasil Tabel hidrostatik SPAR tanpa pelat peredam di lunas.....	53
<b>Gambar 4. 16</b> Grafik <i>Decay test</i> SPAR dengan pelat peredam.....	54
<b>Gambar 4. 17</b> Grafik <i>Decay test</i> SPAR tanpa pelat peredam .....	55
<b>Gambar 4. 18</b> Grafik <i>Pitch Decay</i> model SPAR metode numerik.....	56
<b>Gambar 4. 19</b> Grafik <i>PQ analysis</i> model SPAR tanpa pelat peredam.....	57
<b>Gambar 4. 20</b> Grafik <i>PQ analysis</i> model SPAR dengan pelat peredam .....	58
<b>Gambar 4. 21</b> Grafik perubahan <i>Pitch Damping</i> metode numerik.....	59
<b>Gambar 4. 22</b> Grafik perubahan <i>Pitch Damping</i> metode numerik.....	59



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Teori pemodelan ke Prototipe dalam Mekanika berdasarkan Penskalaan <i>Froude</i> (Chakrabarti, 1994) .....	20
<b>Tabel 3. 1</b> Dimensi Mini SPAR .....	27
<b>Tabel 3. 2</b> Data Kolam MOB Lab Hidrodinamika - BRIN.....	27
<b>Tabel 4. 1</b> Hasil skala menggunakan aturan <i>Froude</i> .....	31
<b>Tabel 4. 2</b> Hasil penimbangan berat material model tanpa pelat peredam .....	34
<b>Tabel 4. 3</b> Hasil penimbangan berat material model dengan pelat peredam.....	34
<b>Tabel 4. 4</b> Perhitungan massa dan momen inersia pipa PVC .....	35
<b>Tabel 4. 5</b> Perhitungan massa dan momen inersia material <i>ballast</i> .....	36
<b>Tabel 4. 6</b> Perhitungan massa dan momen inersia material <i>Topside</i> .....	36
<b>Tabel 4. 7</b> Perhitungan massa dan momen inersia material pelat peredam .....	37
<b>Tabel 4. 8</b> Perhitungan titik berat model tanpa pelat peredam.....	37
<b>Tabel 4. 9</b> Perhitungan titik berat model dengan pelat peredam .....	38
<b>Tabel 4. 10</b> Perhitungan jari-jari girasi model tanpa pelat peredam .....	39
<b>Tabel 4. 11</b> Jari-jari girasi model tanpa pelat peredam.....	39
<b>Tabel 4. 12</b> Perhitungan jari-jari girasi model dengan pelat peredam.....	39
<b>Tabel 4. 13</b> Jari-jari girasi model dengan pelat peredam .....	40
<b>Tabel 4. 14</b> Data dan properti SPAR keseluruhan .....	40
<b>Tabel 4. 15</b> periode dan amplitudo puncak <i>decay</i> model tanpa Pelat peredam..	42
<b>Tabel 4. 16</b> periode dan amplitudo puncak <i>decay</i> model dengan Pelat peredam .....	44
<b>Tabel 4. 17</b> periode dan amplitudo puncak <i>decay</i> SPAR <i>full scale</i> .....	45
<b>Tabel 4. 18</b> Hasil eksperimen <i>Decay Test</i> .....	46
<b>Tabel 4. 19</b> Besar <i>pitch damping</i> SPAR tanpa dan dengan pelat peredam di dasar .....	48
<b>Tabel 4. 20</b> Statistik <i>Meshing</i> pada simulasi numerik .....	51
<b>Tabel 4. 21</b> Periode dan amplitudo puncak <i>decay</i> model dengan Pelat peredam .....	54
<b>Tabel 4. 22</b> periode dan amplitudo puncak <i>decay</i> model tanpa Pelat peredam..	55
<b>Tabel 4. 23</b> periode dan amplitudo puncak <i>decay</i> SPAR metode numerik .....	56
<b>Tabel 4. 24</b> Hasil simulasi <i>Decay Test</i> .....	57
<b>Tabel 4. 25</b> Besar <i>pitch damping</i> SPAR tanpa dan dengan pelat peredam di dasar .....	58
<b>Tabel 4. 26</b> Perbandingan antara hasil eksperimen dan numerik.....	60

## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakaatuh.*

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dan atas kehendakNya lah segala hambatan dalam penelitian serta penulisan skripsi ini dapat diatasi. Salawat serta salam penulis panjatkan kehadiran Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini dibuat penulis sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, dengan judul:

“Analisis Pengaruh Pelat Peredam *Pitch* Di Dasar SPAR Terhadap Redaman”

Doa, dorongan moril dari kedua orang tua Bapak **Alm. Sarifuddin** dan Ibu **Almh. Samsang** merupakan dukungan yang selalu menguatkan hati untuk setiap tahapan penelitian dan penulisan skripsi ini, serta keberhasilan penulis sampai tahap skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Keberhasilan skripsi ini, tak luput pula berkat bantuan dari berbagai pihak yang diterima penulis, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan secara tulus dan ikhlas kepada yang terhormat:

1. Bapak **Prof. Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D.** selaku dosen pembimbing utama serta kapala labo DOFLER yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan Skripsi ini
2. Bapak **Fuad Mahfud Assidiq, ST., MT.** selaku dosen pembimbing pendamping yang ditengah-tengah kesibukannya telah meluangkan waktu dan pikiran untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga terselesaikannya penulisan skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan yang telah mengesahkan skripsi ini.
4. **Dosen–Dosen Departemen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya selama dalam proses perkuliahan.
5. **Staf Tata Usaha Departemen Teknik Kelautan**, yang telah membantu segala aktivitas administrasi baik selama perkuliahan serta dalam penyelesaian skripsi ini.

6. Saudari **Rati Ahmad** yang selalu menemani serta memberikan semangat, motivasi, waktu, dukungan dan bantuannya kepada penulis.
7. **Teman-teman Mahasiswa khususnya Teknik Kelautan 2019**, yang selalu memberi motivasi dan dukungannya serta waktu yang telah kita lalui bersama dalam suka dan duka.
8. Kepada seluruh pihak yang tak sempat penulis ucapkan satu per satu, terima kasih yang sebesar-besarnya untuk segala sumbangsih selama proses penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan sebagai bahan untuk menutupi kekurangan dari penulisan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

*Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.*

Gowa, 24 Agustus 2023



**Andika Sarifuddin**

# BAB I

## LATAR BELAKANG

### 1.1. Latar Belakang

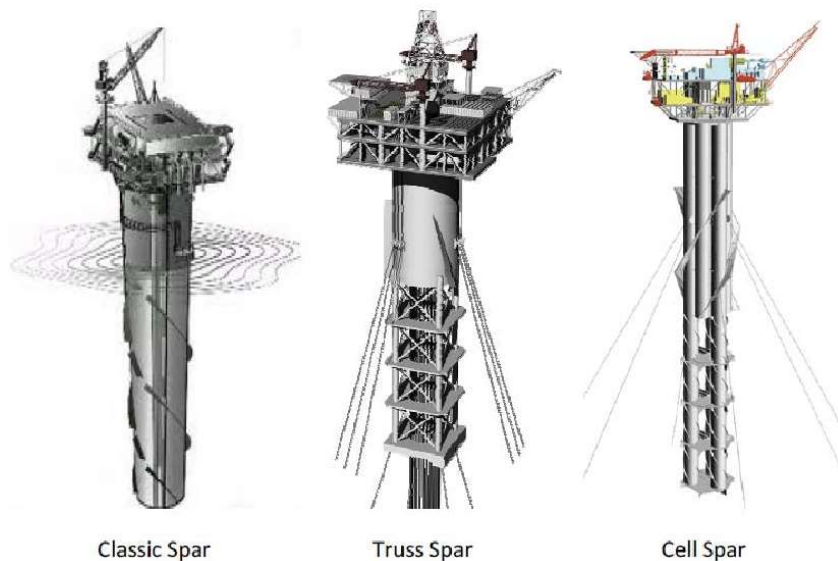
Kemajuan peradaban manusia dikala ini diiringi pula dengan meningkatnya permintaan guna memenuhi kebutuhan energi, termasuk kebutuhan terhadap minyak serta gas bumi. Aktivitas eksplorasi serta eksploitasi sumber daya minyak, energi, serta gas dikala ini semakin bergerak ke laut dalam. Pada laut dalam, kegiatan eksplorasi dan eksploitasi tersebut membutuhkan jenis infrastruktur yang berbeda dari infrastruktur pada laut dangkal (Gemilang, 2012).

Anjungan lepas pantai merupakan struktur atau bangunan yang di bangun di lepas pantai. Menurut jenis strukturnya, anjungan lepas pantai dibagi dalam tiga kelompok yaitu, struktur terpancang (*fixed structure*) atau disebut juga sebagai *pile-supported platform*, struktur terapung (*floating structure*) dan struktur lentur (*compliant structure*) (Dinaryo, 2016). Berkembangnya teknologi pengeboran migas lepas pantai, membuat suatu anjungan lepas pantai yang terpancang (*fixed platform*) menjadi tidak efisien bila dibandingkan dengan anjungan terapung (*floating platform*) yang dapat berpindah dari satu lokasi ke lokasi yang lain dan dapat berfungsi hingga kedalaman yang sangat dalam.

SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) merupakan jenis struktur terapung yang beroperasi pada laut sangat dalam (*ultra-deepwater*) mencapai kedalaman lebih dari 1000 m. Sehingga struktur jenis terpancang tidak memungkinkan untuk beroperasi di laut dalam karena kurang efektif baik dari sisi teknis maupun ekonomis (Chan, 1990).

SPAR Platform merupakan salah satu struktur produksi jenis terapung. Sejak instalasi pertamanya, SPAR menjadi semakin banyak digunakan karena kestabilan dan biayanya yang cukup efektif untuk bangunan lepas pantai. SPAR Pertama kali dibuat pada tahun 1990-an untuk Ladang *Neptune* di *Gulf of Mexico* (GoM), SPAR yang masih sederhana ini terdiri dari satu silinder dengan sarat yang cukup dalam berada di bawah struktur. Di dunia hulu migas, *SPAR Platforms* dapat dibagi menjadi tiga jenis: *Classic SPAR*, *Truss SPAR*, dan *Cell SPAR*. *SPAR* memiliki banyak fungsi, seperti untuk *drilling*, *production*, dan *storage*. Struktur SPAR umumnya terbagi kedalam empat bagian, bagian atas tersusun atas dua dari empat tingkat *deck*, badan utama didukung oleh *upper deck*, *riser*, dan

*mooring system*. Struktur SPAR sangatlah kuat dan rumit, oleh karena itu, SPAR sangatlah cocok untuk beroperasi di laut dalam.



**Gambar 1. 1** Jenis-jenis SPAR

Periode natural dari *classic* SPAR umumnya relatif sekitar 25 hingga 30 detik. Hal tersebut dikarenakan redaman pada badan vertikal SPAR yang tidak terlalu signifikan. Oleh karena itu *Classic* SPAR memerlukan sebuah solusi desain yang efektif untuk melakukan eksplorasi migas pada wilayah laut yang ganas dan terdapat cadangan minyak yang melimpah dengan lebih stabil dan aman (Sudhakar, 2014).

SPAR memiliki kemampuan gerak *pitch* yang besar karena ketinggian saratnya yang cukup dalam. Untuk mengurangi gerakan *pitch* tersebut, diperlukan adanya penambahan redaman dari sistem SPAR platform untuk menambah redaman terhadap gerakan tersebut. Pelat peredam dapat menjadi solusi alternatif sebagai penambahan redaman untuk mengurangi gerakan *pitch* sehingga jika sistem SPAR tersebut berfungsi sebagai RIG dan memiliki *riser*, *riser* tersebut akan lebih aman akibat gerakan *pitch*-nya yang minimum dan stabil. Dan jika sistem SPAR tersebut berfungsi sebagai *wind turbine* dapat berfungsi dengan lebih efisien karena angin yang menggerakkan baling-baling pada *wind turbine* akan bekerja dengan maksimal.

Pelat peredam ditambahkan pada bagian *keel* dari SPAR, oleh sebab itu dampak yang ditimbulkan tidak hanya pada *pitch damping*, namun juga akan menambah *added mass* dari sistem. Oleh karena itu penambahan Pelat peredam

untuk meningkatkan performa kestabilan dari SPAR perlu untuk diteliti pengaruhnya terhadap redaman.

Sebelumnya Uma (2017) telah meneliti lebih dalam mengenai pengaruh *heave damping* akibat penambahan *circular plates* di *keel* pada badan lambung SPAR. Dan Ardhianutama (2019) juga telah meneliti mengenai pengaruh *heave damping* pada SPAR akibat penambahan *heave pelate* di keel. Dalam penelitian tugas akhir ini, akan dilakukan studi eksperimen dan numerik dari model SPAR. Topik yang dibahas pada penelitian ini adalah mengenai analisis *pitch damping* akibat modifikasi penambahan pelat peredam di *keel* SPAR.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas memberikan landasan bagi penulis untuk melakukan penelitian ini yaitu :

1. Berapa Besar perbedaan *pitch damping* pada SPAR akibat pengaruh penambahan pelat peredam di dasar SPAR ?
2. Bagaimana perbandingan *pitch damping* pada SPAR dari hasil eksperimen dengan perhitungan numerik ?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai penulis pada penelitian tugas akhir ini yaitu:

1. Mengetahui perbedaan besaran *pitch damping* pada SPAR akibat pengaruh penambahan pelat peredam di dasar.
2. Mengetahui perbandingan *pitch damping* pada SPAR antara hasil eksperimen dengan perhitungan numerik.

## 1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Dapat digunakan sebagai acuan serta pertimbangan dalam menganalisis damping pada umumnya.
2. Dapat digunakan sebagai acuan serta pertimbangan dalam menganalisis pengaruh penggunaan pelat peredam pada *classic* SPAR.
3. Dapat dijadikan referensi untuk penelitian mengenai pengaruh penambahan pelat peredam terhadap *pitch damping* pada SPAR.

### 1.5. Ruang Lingkup

Karena banyak aspek yang tidak dapat diteliti pada penelitian tugas akhir ini, maka untuk memperjelas ruang lingkup penelitian diperlukan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Studi eksperimen dilakukan pada model dari *mini* SPAR.
2. Studi eksperimen menyesuaikan kondisi dan keadaan kolam *Manuevering Ocean Engineering Basin* (MOB), Balai Teknologi Hidrodinamika – BRIN.
3. Studi eksperimen dilakukan tanpa adanya gaya eksitasi.
4. Analisis redaman SPAR hanya dilakukan pada gerakan *Pitch*.
5. Studi eksperimen dilakukan dengan kondisi tidak tertambat.
6. Pola aliran di sekitar struktur dan pelat peredam tidak dipertimbangkan.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA dan DASAR TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

*SPAR* merupakan satu-satunya jenis platform yang memerlukan gerakan *heave* dan *pitch* yang cukup kecil agar *riser* yang terpasang pada *SPAR* menjadi aman dan ekonomis. Bahkan hingga badai 100 tahunan, *SPAR* masih dapat menahan gerakannya dengan didukung oleh sistem tambat taut (*mooring*) (S. Chakrabarti, 2005). Oleh karena kemampuannya untuk bertahan pada lingkungan yang ekstrem, telah banyak penelitian dilakukan dengan objek *SPAR Platform*. Dinaryo (2016) telah meneliti operabilitas *seakeeping* dari *SPAR Platform* tipe *truss* di Selat Makassar, dengan hasil analisis bahwa besarnya gerakan rata-rata struktur *SPAR* masih belum melampaui jauh dari kriteria operasi. Sebelumnya Koo (2004) juga telah meneliti *SPAR Platform* dengan terpasang *mooring lines* dan *riser system* yang diasumsikan berada pada kondisi badai di *North Sea*, juga masih dalam kondisi yang sangat stabil untuk respon gerakan *heave* dan *pitch*.

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Jain & Agarwal (2003), kekakuan serta redaman dari *SPAR Platform* dengan sistem tambat *catenary* dianalisis menggunakan Teori Gelombang Airy dan Gaya Morison. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa besarnya kekakuan tali tambat mempengaruhi respon gerakan yang cukup signifikan. Berikutnya Jameel dkk (2017) meneliti pengaruh *mooring drag* dan inersia pada respon dari *SPAR Platform* dengan kesimpulan bahwa konfigurasi sistem *mooring lines* berpengaruh pada besarnya gaya hambat dan inersia akibat adanya besarnya *hydrodynamic damping*.

Ardhianutama (2019) telah membuat model mini *SPAR* dengan penambahan *Heave Pelate di Keel* dan melakukan analisis *Heave Damping* pada *SPAR* akibat penambahan *Heave Pelate di Keel*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa adanya penambahan *heave pelate* pada *keel* *SPAR* dengan rasio diameter *heave pelate* sebesar 1.3x dari diameter *SPAR*, dapat menambah besarnya *heave damping* hingga 49%. Gumelar (2018) memodelkan *SPAR Helical Strakes* pada sistem tambat taut dengan analisis studi eksperimen dan numeris. Variasi ketinggian *fairlead* menjadi perbedaan pada penelitian tersebut dengan hasil bahwa *Helical Strakes* dapat mengurangi nilai maksimum dari mode gerakan *heave* dan *pitch*.



Assidiq dkk (2023) telah melakukan uji eksperimen gerakan *pitch* pada SPAR tipe *floating offshore wind turbine* (FWOT) dengan penambahan pelat vertikal yang bervariasi pada gelombang reguler. Penelitian eksperimen tersebut menunjukkan bahwa variasi 4 pelat vertikal memiliki kinerja penurunan gerakan *pitch* paling optimal. Sarifuddin dkk (2022) telah melakukan simulasi numerik terhadap variasi kecepatan aliran pada pelat vertikal di lunas SPAR. Aliran turbulensi terbanyak terjadi pada variasi kecepatan 0,1 m/s, Simulasi kecepatan aliran setelah melewati pelat vertikal akan mengalami turbulensi dan kecepatannya mengecil akibat aliran mengalami turbulensi dengan rasio 1,52. Hidayatullah dkk (2023) melakukan penelitian model eksperimen dengan SPAR FWOT dengan penambahan tiga pelat vertikal dengan variasi lubang pada pelat vertikal. Variasi lubang pada pelat vertikal memiliki pengaruh yang pada besar kemiringan pada model, pelat vertikal dengan enam lubang memiliki redaman gelombang terbesar. Assidiq dan paroka (2023) meneliti tentang penambahan pelat vertikal pada SPAR dengan berbagai variasi pelat vertikal pada badan SPAR. Ditemukan bahwa penambahan pelat vertikal dengan variasi 4VP-6H, 5VP-3H, dan 4VP-S mereduksi gerak *pitch* dengan lebih baik. Pelat vertikal dengan lubang juga lebih efektif dalam mengurangi gerak *pitch* dari pada pelat yang solid.

## 2.2. Dasar Teori

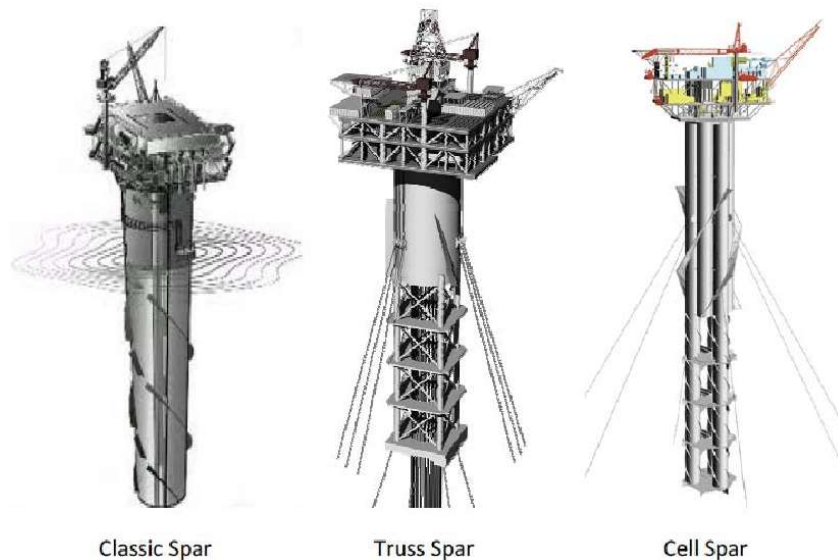
### 2.2.1. SPAR Platform

SPAR adalah jenis anjungan lepas pantai tipe *deep draught installation* yang terdiri dari *hull system* dengan *topside deck* yang berada di atasnya. Bagian hull dari struktur ini terbagi atas *upper hull*, *mid-section*, dan *lower hull*. Sedangkan bagian *topside deck* berupa deck yang berjenis *space frame truss* yang menyediakan ruang untuk peralatan produksi, *workover* dan *drilling rig*.

SPAR sendiri umumnya di kenakan jangkar hingga ke dasar laut dengan menggunakan lebih dari satu tautan *mooring*. SPAR Platform dikembangkan pada tahun 1990 dan tipe SPAR Platform yang pertama kali diinstal merupakan Neptune SPAR pada tahun 1990 di Teluk Meksiko. Pada tahun-tahun selanjutnya SPAR Platform telah menjadi salah satu platform yang banyak digunakan dalam proses eksplorasi serta eksploitasi di laut dalam sehingga pengembangan teknologi pada SPAR Platform terus ditingkatkan. Desain dari SPAR Platform berbeda dari anjungan lepas pantai yang lain. Jika bangunan lepas pantai terapung lain umumnya berbentuk persegi, SPAR Platform berbentuk silinder yang berfungsi untuk mempertahankan posisinya saat sedang beroperasi (Kurian, 2011). Silinder

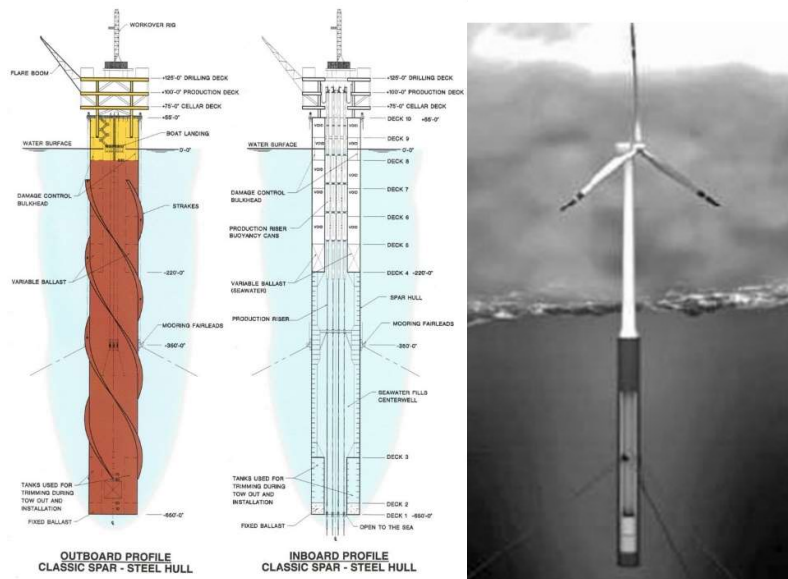
diberi beban di bagian bawah dengan mengisi ruangan dengan material yang rapat dibandingkan dengan air laut sehingga dapat menurunkan *Center of Gravity* (CoG) dari struktur sampai berada di bawah *Center of Bouyancy* (CoB) dan memberi stabilitas pada struktur (Chakrabarti, 2005).

Konsep penggunaan SPAR dalam kebutuhan pengeboran, produksi, dan *storage system* sebenarnya sudah diterapkan pada tahun 1980-an. Setelah dilakukan beberapa kajian dan usaha atas kerjasama industri minyak dan gas pada tahun 1996, Oryx energy dan CNG berhasil memasang SPAR. Semua SPAR Platform beroperasi di Teluk Meksiko dan hanya satu SPAR Platform yang beroperasi di luar Teluk Meksiko yaitu di Malaysia. Hingga saat ini sudah terdapat 3 generasi jenis SPAR Platform yaitu Classic SPAR, Truss SPAR, dan Cell SPAR (Dinaryo, 2016).



**Gambar 2.1** Tipe SPAR

SPAR *platform* terdiri dari tiga bagian yaitu *topside*, *hull*, dan *mooring*. Topside merupakan bangunan atas struktur *multi-level* yang dapat dikonfigurasi menjadi beberapa alternatif, jika SPAR digunakan sebagai rig maka *topside* dari SPAR itu sendiri akan menjadi bangunan *multi-level* untuk pengeboran sedangkan jika SPAR difungsikan menjadi *wind turbine* maka *topside* akan menjadi *wind turbine*.



(a) SPAR sebagai rig      (b) SPAR sebagai *Wind Turbine*

**Gambar 2.2** Alternatif Bangunan SPAR

### 2.2.2. Beban Hidrodinamika

Suatu struktur terapung akan menerima beban hidrodinamika. Beban hidrodinamika yang diterima oleh struktur terapung dapat dipahami sebagai dua jenis diantaranya:

1. Gaya dan momen yang dialami oleh struktur terapung, saat struktur ditahan untuk beresilasi namun menerima gelombang datang. Beban ini disebut sebagai beban akibat eksitasi gelombang. Beban ini secara umum terdiri dari gaya tekanan (yang biasa disebut *Froude Krylov Force*) dan gaya difraksi.
2. Gaya dan momen yang dirasakan oleh struktur terapung, saat struktur digetarkan dengan frekuensi yang serupa dengan gaya eksitasi gelombang yang datang. Namun, pada kali ini, tidak ada gelombang yang mengenai struktur. Beban hidrodinamika yang didapat dari masalah ini adalah beban massa tambah (*added mass*), beban redaman (*damping*) dan beban kekakuan (*restoring force*). Beban ini dapat juga dianggap sebagai beban reaksi akibat pergerakan struktur.

Dari dua jenis beban hidrodinamika tersebut dapat dihubungkan secara linear sehingga gaya hidrodinamik total pada struktur terapung merupakan penjumlahan dari jenis 1 dan 2.

### 2.2.3. Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi yang diterima dari struktur terjadi akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak merata ini disebut sebagai gaya Froude-Krylof. Selain itu, pada struktur dengan ukuran yang cukup besar, bentuk struktur juga akan menyebabkan perubahan distribusi tekanan. Efek dari perubahan distribusi tekanan akibat adanya struktur yang besar ini disebut dengan gaya difraksi. Gaya Froude-Krylof dapat ditemukan menggunakan Persamaan 2.1.

$$F_{Eksitasi} = \int \rho \cdot n_i \cdot dA \quad (2.1)$$

Dimana :

$\rho$	= Tekanan gelombang untuk perairan dalam	(N/m <sup>2</sup> )
$n_i$	= Vektor satuan arah normal	
$dA$	= Luasan Struktur	(m <sup>2</sup> )

Persamaan 2.1 menghubungkan antara distribusi tekanan yang diakibatkan medan gelombang dengan luas permukaan dari struktur. Distribusi tekanan gelombang di laut dalam untuk struktur didapat dengan menggabungkan persamaan potensial gelombang dengan persamaan Bernoulli sehingga didapat Persamaan 2.2

$$p = \rho g \zeta_a e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.2)$$

Dimana :

$\rho$	= Massa jenis air disekitar struktur	(Kg/m <sup>3</sup> )
$g$	= Percepatan gravitasi	(m/s <sup>2</sup> )
$\zeta_a$	= Amplitudo gelombang	(m)
$k$	= Angka gelombang	(rad/m)
$z$	= Posisi di sumbu vertikal, dengan nilai 0 di permukaan air	(m)
$\omega$	= Frekuensi gelombang	(rad/s)
$t$	= Waktu	(s)
$x$	= Posisi di sumbu horizontal, searah gelombang	(m)

#### 2.2.4. Gaya Reaksi

Gaya reaksi pada struktur dipengaruhi oleh *added mass*, redaman dan kekakuan pada struktur. Berikut penjelasan masing-masing komponen tersebut.

##### a. Massa

Massa struktur SPAR bisa dapat dihitung dengan cara mengalikan massa jenis dengan volume pada struktur yang tercelup. Perhitungan massa struktur SPAR sederhana dapat didapatkan dengan Persamaan 2.3

$$m = \rho \pi r^2 T \quad (2.3)$$

Dimana :

$m$	= Massa struktur	(Kg)
$\rho$	= Massa jenis air	(Kg/m <sup>3</sup> )
$r$	= Jari-jari SPAR	(m)
$T$	= Sarat struktur	(m)

##### b. Massa Tambah

Dalam eksperimen yang dilakukan Bessel mengenai osilasi berbentuk pendulum di air dan di udara, ia menemukan bahwa walaupun dengan massa pendulum yang sama, pendulum yang di dalam air mempunyai massa yang lebih besar daripada pendulum yang di udara. Perbedaan massa inilah yang kemudian Bessel menginterpretasikannya sebagai masa tambah (*added mass*).

efek penambahan massa ini diakibatkan oleh ikut Bergeraknya fluida di sekitar benda yang tercelup kedalam air. Pergerakan fluida tersebut menambah energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal tambah. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda maka akan menghasilkan komponen massa. Massa inilah yang dianggap sebagai massa tambah. Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak benda tersebut. Persamaan 2.4 merupakan persamaan dari gaya massa tambah, dimana merupakan perkalian antara massa tambah dengan percepatan gerak benda terapung.

$$F_a = a_i \ddot{\xi}_i \quad (2.4)$$

Dimana :

$i$	= Mode gerak struktur dengan 1 ( <i>surge</i> ), 2 ( <i>sway</i> ), 3 ( <i>heave</i> ), 4 ( <i>roll</i> ), 5 ( <i>pitch</i> ), dan 6 ( <i>yaw</i> )
-----	---

$$a = \text{Massa tambah} \quad (\text{Kg})$$

$$\ddot{\xi} = \text{Percepatan gerak struktur} \quad (\text{m/s}^2)$$

c. Redaman

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur. Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk benda dan mode gerak benda. Sebagai gaya reaksi, gaya ini mempunyai Persamaan 2.5, persamaan ini merupakan perkalian antara redaman benda dengan kecepatan gerak benda.

$$F_b = b_i \dot{\xi}_i \quad (2.5)$$

Dimana :

$i$  = Mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*), dan 6 (*yaw*)

$b$  = Redaman struktur (N. s/m)

$\dot{\xi}$  = Kecepatan gerak struktur (m/s)

d. Kekakuan

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, tanpa gelombang, struktur tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini hanya terjadi pada 3 mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak *heave* ( $\xi_{33}$ ), *pitch* ( $\xi_{44}$ ) dan *roll* ( $\xi_{55}$ ). Kekakuan struktur mempunyai Persamaan 2.6, persamaan ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak.

$$F_c = c_i \xi_i \quad (2.6)$$

Dimana :

$i$  = Mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*), dan 6 (*yaw*)

$c$  = Kekakuan struktur (N/m)

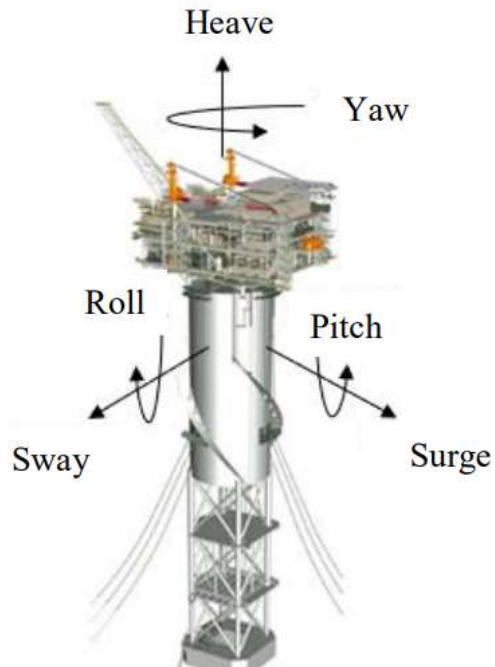
$\xi$  = Respon gerak struktur (m)

### 2.2.5. Persamaan Gerak Bangunan Apung

Gerakan bangunan apung yang terdiri dari enam derajat kebebasan dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu gerak translasi dan gerak rotasi. Gerak translasi yaitu merupakan gerak dimana bangunan apung berpindah atau bergeser terhadap satu sumbu, seperti gerak lurus. Sedangkan gerak rotasi merupakan gerak dimana bangunan apung berputar dengan poros putar sumbu tertentu. Enam Jenis gerak dari struktur terapung mempunyai penamaan masing-masing yaitu:

1. Gerak translasi :
  - a. *Surge*, gerak translasi sejajar sumbu x.
  - b. *Sway*, gerak translasi sejajar sumbu y.
  - c. *Heave*, gerak translasi sejajar sumbu z.
2. Gerak rotasi :
  - a. *Roll*, gerak rotasi di sumbu x.
  - b. *Pitch*, gerak rotasi di sumbu y.
  - c. *Yaw*, gerak rotasi di sumbu z.

Gerak bangunan apung pada SPAR digambarkan oleh Gambar 2.3:



**Gambar 2.3** Enam Jenis Gerak Bangunan Apung

Persamaan gerak bangunan apung dapat dianalisis menggunakan hukum II Newton sesuai Persamaan 2.7.

$$\Sigma F = m_i \ddot{\zeta}_i \quad (2.7)$$

Dimana :

$i$  = Mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*), dan 6 (*yaw*)

$\Sigma F$  = Resultan gaya (N)

$m$  = Massa struktur (kg)

$\ddot{\zeta}$  = Percepatan gerak struktur (m/s<sup>2</sup>)

Persamaan 2.7 menunjukkan hubungan antara resultan gaya dengan massa benda dan percepatan benda. Resultan gaya untuk benda terapung merupakan pengurangan gaya aksi dengan gaya reaksi. Hal ini dikarenakan gaya aksi (gaya eksitasi) memberi gaya pada struktur sedangkan gaya reaksi merupakan gaya yang dilakukan oleh struktur dapat dilihat pada Persamaan 2.8.

$$\Sigma F = F_{Eksitasi} - F_{Reaksi} \quad (2.8)$$

Dengan memasukkan pengertian gaya eksitasi dan gaya reaksi pada struktur terapung yang terkena gelombang, maka Persamaan 2.8 dapat dikembangkan menjadi Persamaan 2.9.

$$\Sigma F = F_{Eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \quad (2.9)$$

Dimana :

$\Sigma F$  = Resultan gaya (N)

$F_{Eksitasi}$  = Gaya eksitasi gelombang (N)

$F_a$  = Gaya inersia (N)

$F_b$  = Gaya redaman (N)

$F_c$  = Gaya pengembali (N)

Dengan memasukkan Persamaan 2.4, 2.5, dan 2.6 ke Persamaan 2.8 dan 2.9 maka akan diperoleh Persamaan 2.10 dan 2.11

$$m_i \ddot{\zeta}_i = F_{eksitasi} - (a_i \ddot{\zeta}_i + b_i \dot{\zeta}_i + c_i \zeta_i) \quad (2.10)$$



$$(m_i + a_i)\ddot{\xi}_i + b_i\dot{\xi}_i + c_i\xi_i = F_{eksitasi} \quad (2.11)$$

Dimana :

$i$	= Mode gerak struktur dengan 1 ( <i>surge</i> ), 2 ( <i>sway</i> ), 3 ( <i>heave</i> ), 4 ( <i>roll</i> ), 5 ( <i>pitch</i> ), dan 6 ( <i>yaw</i> )	
$F_{eksitasi}$	= gaya eksitasi gelombang	(N)
$m$	= Massa struktur	(Kg)
$a$	= Massa tambah	(Kg)
$\ddot{\xi}$	= Percepatan gerak struktur	(m/s <sup>2</sup> )
$b$	= Redaman struktur	(N. s/m)
$\dot{\xi}$	= Kecepatan gerak struktur	(m/s)
$c$	= Kekakuan struktur	(N)
$\xi$	= Respon gerak struktur	(m)

#### 2.2.6. Periode Natural

Periode natural adalah waktu yang dibutuhkan untuk bergetarnya suatu sistem selama satu kali. Periode natural adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk menempuh satu putaran penuh dari suatu getaran saat terganggu dari posisi keseimbangan statis dan kembali ke posisi awalnya. Periode natural juga sering disebut secara lengkap dengan “periode getar alami struktur” (*natural fundamental period*), dimana makna “alami” tersebut digunakan untuk menggambarkan setiap getaran untuk menekankan fakta bahwa hal tersebut merupakan properti alami dari struktur yang bergantung terhadap massa dan kekakuan yang bergetar secara bebas tanpa adanya gaya luar.

Getaran bebas terjadi disaat struktur berosilasi karena aksi dari suatu gaya yang bekerja di dalam struktur tanpa adanya gaya luar. Kekuatan-kekuatan yang bekerja tersebut muncul dari kecepatan awal (*initial velocity*) dan perpindahan (*displacement*) yang dimiliki struktur pada awal fase getaran bebasnya. Sebagaimana diketahui, periode getar alami struktur, yang selanjutnya dapat disebut sebagai periode natural adalah properti dinamik dari suatu sistem struktur.

#### 2.2.7. Titik Berat

Setiap partikel dalam suatu benda tegar memiliki berat tersendiri. Berat keseluruhan benda adalah resultan dari seluruh gaya gravitasi berarah vertikal

kebawah dari semua partikel. Resultan ini bekerja melalui suatu titik pusat tunggal, yang disebut titik berat (pusat gravitasi).

Titik berat merupakan titik tangkap gaya berat benda. Resultan dari seluruh gaya berat benda yang terdiri atas bagian-bagian kecil benda dinamakan gaya berat. Sebuah benda terdiri dari banyak partikel. Setiap partikel mempunyai massa, oleh karena itu, tiap partikel memiliki berat serta titik berat yang berbeda-beda. Partikel-partikel tersebut masing-masing mempunyai gaya berat dengan resultan gaya berat tersendiri. Total gaya berat dapat kita anggap berpusat terhadap suatu titik yang disebut sebagai titik berat. Mendapatkan titik berat dari suatu struktur dapat ditemukan menggunakan Persamaan 2.12.

$$\text{Titik berat} = \frac{\text{Total Momen Struktur}}{\text{Total Massa Struktur}} \quad (2.12)$$

#### 2.2.8. Jari-jari Girasi

jari-jari girasi merupakan jarak dari titik pusat massa dimana apabila massa keseluruhan dikonsentrasikan pada jarak tertentu, akan memiliki momen inersia massa yang sama. Jari-jari girasi dapat ditemukan dengan menggunakan Persamaan 2.13.

$$\text{Jari - jari girasi} = \sqrt{\frac{\text{Total Momen inersia Struktur}}{\text{Total Massa Struktur}}} \quad (2.13)$$

#### 2.2.9. Kekakuan Struktur

Disaat struktur terapung bergerak di permukaan air tenang tanpa gelombang, struktur tersebut memiliki kekakuan untuk dapat kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini hanya dapat terjadi pada tiga mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak *heave*, *pitch* dan *roll*. Mode gerak ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatis dari struktur itu sendiri. Kekakuan struktur hanya dimiliki oleh tiga gerak tersebut dikarenakan dalam gerak tersebut terdapat gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda ke posisi awalnya yang disebut gaya pengembali (*restoring force*). Kekakuan struktur pada gerak *pitch* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.14.

$$C = \rho g VGM \quad (2.14)$$

Dimana :

$C$	= Kekakuan struktur	(N.m)
$\rho$	= Massa jenis air laut	(kg/m <sup>3</sup> )

$g$	= Percepatan gravitasi	(m/s <sup>2</sup> )
$V$	= Volume displacement struktur	(m <sup>3</sup> )
$GM$	= Garis metasentra	(m)

#### 2.2.10. Koefisien Massa Tambah

Pemasangan pelat peredam dapat menambah karakteristik massa tambah, maupun inersia tambah, serta redaman struktur pada SPAR pada arah gerak *pitch*, kemudian berdampak pada penambahan nilai periode natural struktur sehingga resonansi pada struktur dapat dihindarkan. Besarnya penambahan nilai dari karakteristik inersia tambah dan redaman sangat erat bergantung pada bentuk, ukuran, porositas, jumlah dan peletakkan dari pelat peredam pada struktur SPAR. Inersia tambah dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.15 (Hongyan et al., 2011).

$$a_I = \frac{C \cdot T_n^2}{4\pi^2 \cdot I} \quad (2.15)$$

Dimana :

$a_I$	= <i>Coefficient added inertia</i>	
$C$	= Kekakuan struktur	(N.m)
$T_n$	= Periode natural	(s)
$I$	= inersia struktur	(Kg.m <sup>2</sup> )
$\pi$	= 3,14	

#### 2.2.11. Redaman

Redaman merupakan dampak yang diperoleh akibat adanya disipasi energi dari struktur. Redaman dapat mengakibatkan struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama dapat menjadi semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk struktur dan mode gerak struktur. Besarnya *Pitch Damping* dapat didapatkan oleh Persamaan 2.16 dan 2.17 (Raed et al., 2021):

$$B' = B_1 + \frac{8B_2}{3\pi} \omega_n y_k \quad (2.16)$$

$$I = \frac{\Delta}{g} y_k^2 \quad (2.17)$$

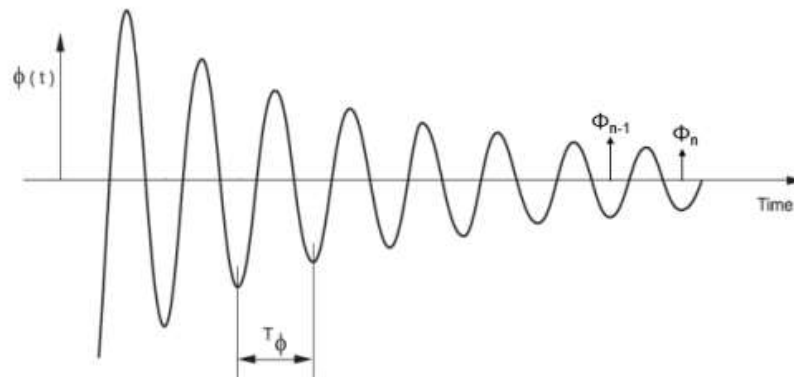
Dimana :

$B'$	= <i>Pitch Damping</i>	(N)
$B_1$	= Linier <i>Pitch Damping</i>	
$B_2$	= Kuadratik <i>Pitch Damping</i>	
$\omega_n$	= Frekuensi natural	(Hz)
$y_k$	= jari-jari girasi untuk Pitch	(m)
$I$	= inersia struktur	(Kg.m <sup>2</sup> )
$g$	= gravitasi	(m/s <sup>2</sup> )
$\Delta$	= massa struktur	(Kg)

### 2.2.12. Decay Test

*Free Decay Test* dengan model dicoba di air dapat dilakukan tidak hanya untuk gerakan-gerakan tertentu yang memiliki gaya atau momen hidromekanik seperti gerakan *heave*, *pitch*, dan *roll*. Tetapi juga dapat dilakukan untuk gerakan lainnya: *surge*, *sway*, dan *yaw* (Journee dan Massie, 2001).

Dari *free decay test*, periode natural dan *damping coefficients* dapat diperoleh. Gambar 2.4 menunjukkan contoh hasil perekaman selama pengujian *decay test* untuk gerakan teredam sempurna, contoh dibawah merupakan rekaman pengujian *decay test* kapal dengan gerakan *heave free floating* (MARIN Report No. 22808-3-OB) .



**Gambar 2. 4** Hasil pengujian *free decay test*

(MARIN Report No. 22808-3-OB)

Dimana :

$\phi(t)$	= Rentang waktu gerakan $\phi$
$\phi_N$	= Amplitudo gerakan dari osilasi ke-n, (°)

$T_n$  = Periode natural dari gerakan  $\phi$ , (s)

Dimana  $\delta$  adalah *logarithmic decrement*. *Decrement* dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.18 (Sudhakar, 2014).

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left( \frac{\phi_{N-1}}{\phi_N} \right) \quad (2.18)$$

Dimana:

$N$  = Jumlah cycle

$\phi_N$  = Amplitudo puncak dari osilasi ke-N, (°)

$\phi_{N-1}$  = Amplitudo puncak dari osilasi ke-N-1, (°)

Selanjutnya *damping ratio* dapat ditemukan dari *logarithmic decrement* pada Persamaan 2.19.

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{2\pi}{\delta} \right)^2}} \quad (2.19)$$

*Damping ratio* dapat digunakan untuk menemukan frekuensi natural tidak teredam  $\omega_n$  dari frekuensi natural teredam  $\omega_d$  seperti Persamaan 2.20.

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T_n} \quad (2.20)$$

Dimana  $T_n$ , Periode osilasi, merupakan waktu antara dua amplitudo puncak. Frekuensi natural dan periode natural dapat mudah ditemukan menggunakan Persamaan 2.21 dan 2.22 (Sudhakar, 2014).

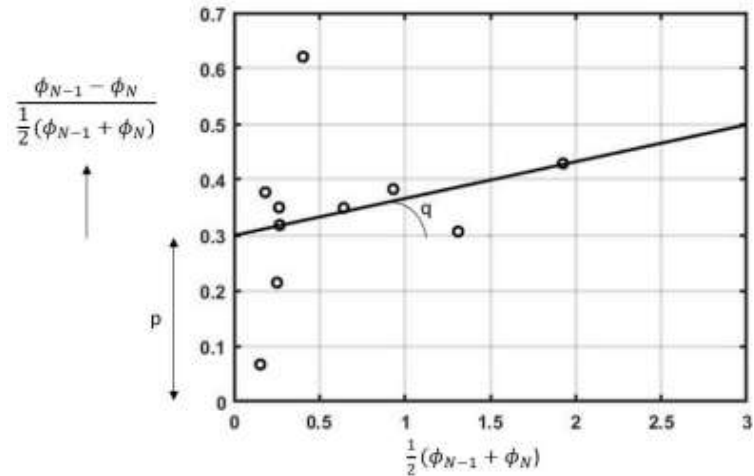
$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.21)$$

Maka :

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (2.22)$$

### 2.2.13. Koefisien Linier

Koefisien linear dapat diperoleh melalui *decay test* dengan membagi penurunan amplitudo gerak dengan rata-rata amplitudo gerak dan diplotkan dengan rata-rata amplitudo gerak, dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** P-Q analisis dari *Decay test*

(MARIN Report No.22808-3-OB)

Nilai  $p$  dan  $q$  dapat diperoleh melalui *fitting line* dari titik-titik data yang diperoleh melalui *decay test*.

Koefisien  $p$  dan  $q$  dapat digunakan untuk mendapatkan *linear*  $B_1$  dan *quadratic*  $B_2$  *damping coefficients* melalui rumusan masing-masing seperti berikut (MARIN Report No.22808-3-OB) :

$$B_1 = 2p \frac{\Delta + a_l}{T_n} \quad (2.23)$$

dan

$$B_2 = \frac{3}{8} q (\Delta + a_l) \quad (2.24)$$

### 2.2.14. Teori Pemodelan

Apabila model bangunan apung akan diuji pada towing tank atau wave basin, maka pertanyaan berikutnya adalah bagaimana memastikan bahwasanya kondisi pada saat pengujian yang diskalakan dapat secara akurat merepresentasikan kondisi sesungguhnya yang akan diterima oleh bangunan

apung. Untuk menjawab pertanyaan ini, kondisi saat pengujian harus disamakan secara geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya (Munson, et al. 2013).

Dalam pengujian eksperimen, model yang dibuat haruslah identik terhadap struktur aslinya dalam hal geometri. Perbedaan dimensi antara model dan struktur asli dapat dilakukan dengan penskalaan sehingga model dapat dikatakan sebanding dengan struktur asli. Untuk suatu satuan yang memiliki komponen panjang (meter) maka penskalaan dapat dilakukan dengan Persamaan 2.25.

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} \quad (2.25)$$

Dimana  $L_s$  dan  $L_m$  dua dimensi (diameter, panjang, dll) yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan prototipe dan model, dan  $\lambda$  merupakan rasio skala diantara keduanya. Adapun untuk satuan inersia yang memiliki komponen berat (Ton) dan luas ( $m^2$ ), maka faktor skala menjadi berubah sebagaimana Persamaan 2.26.

$$\lambda^5 = \frac{L_s}{L_m} \quad (2.26)$$

**Tabel 2. 1** Teori pemodelan dari prototipe dalam Mekanika berdasarkan Penskalaan Froude (Chakrabarti, 1994)

Variabel	Dimensi	Skala	Catatan
Geometri			
Panjang	L	$\lambda$	Semua karakteristik dimensi objek
Volume	$L^3$	$\lambda^3$	Untuk setiap bagian dari objek
Sudut	-	1	Sudut
Jari-jari Girasi	L	$\lambda$	Terukur dari titik tetap
Momen Inersia	$ML^2$	$\lambda^5$	Diukur dari titik tetap
Titik Gravitasi	L	$\lambda$	Diukur dari titik acuan

Variabel	Dimensi	Skala	Catatan
Periode Natural	T	$\lambda^{1/2}$	Periode dimana gaya inersia = gaya pengembali
	Mekanika Gelombang		
Tinggi Gelombang	L	$\lambda$	Jarak tegak lurus antara lembah dan puncak
Periode Gelombang	T	$\lambda^{1/2}$	Waktu yang dibutuhkan satu gelombang
Panjang Gelombang	L	$\lambda$	Jarak horizontal dari puncak ke lembah
	Kinematika dan Dinamika		
Waktu	T	$\lambda^{1/2}$	Waktu mulai dianggap sebagai waktu nol
Perpindahan	L	$\lambda$	Jarak antara dari posisi semula dan posisi akhir
Faktor Redaman	-	l	Rasio dari redaman dan koefisien redaman kritis

### 2.2.15. Simulasi Numerik

Simulasi numerik merupakan pemodelan yang menggunakan rumus-rumus matematika yang diselesaikan dengan mentransformasikan fisik permukaan ke dalam bentuk komputasi yang kemudian diselesaikan secara numerik melalui bantuan perangkat lunak.

Pada dasarnya simulasi numerik mengubah persamaan-persamaan diferensial parsial yang sebelumnya kontinuitas, momentum, dan energi menjadi persamaan-persamaan aljabar. Persamaan yang sebelumnya kontinum (memiliki jumlah sel tak terhingga) diganti menjadi model diskrit (jumlah sel terhingga). Terdapat tiga teknik solusi numerik (metode diskritisasi) dengan metode yang berbeda, yaitu *finite difference*, *finite element* dan *finite volume methods*. Metode diskritisasi dipilih pada untuk menentukan kestabilan dari program numerik/CFD. Beberapa metode diskritisasi yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan-persamaan diferensial parsial, diantaranya adalah :



### 1. Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*)

pada metode ini area aliran dipisahkan menjadi satu set poin grid dan fungsi kontinyu (kecepatan, tekanan, dan lainnya) didekati dengan nilai-nilai diskrit dan fungsi-fungsi ini dihitung pada titik-titik grid tertentu. Turunan dari fungsi didekati dengan menggunakan perbedaan antara nilai fungsi pada titik lokal grid dibagi dengan jarak grid.

### 2. Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode ini membagi masalah besar menjadi lebih kecil dan sederhana yang disebut elemen hingga. Persamaan sederhana yang memodelkan seluruh kasus kemudian disusun menjadi sebuah sistem persamaan yang lebih luas. Persamaan konservasi kekekalan massa, momentum, dan energi ditulis dalam bentuk yang tepat untuk setiap elemen, dan hasil dari set persamaan aljabar untuk bidang aliran diselesaikan secara numerik.

### 3. Metode Volume Hingga (*Finite Volume Method*)

*Finite volume method* adalah metode untuk mewakili dan mengevaluasi persamaan diferensial parsial dalam bentuk aljabar. Metode ini sama seperti *finite difference method* dan *finite element method*, nilai-nilai dihitung di tempat terpisah pada geometri yang di mesh. Metode ini mengacu pada volume kecil disekitar *node* pada *mesh*. Dalam metode ini, volume integral dalam persamaan diferensial yang memiliki istilah divergensi dikonversi ke integral menggunakan teori divergensi.

#### 2.2.16. ANSYS Aqwa

ANSYS Aqwa adalah program penghubung antara perhitungan difraksi ANSYS Aqwa dan model elemen hingga. Aqwa mengambil hasil dalam bentuk tekanan dan gerakan untuk arah dan frekuensi gelombang tertentu dan secara otomatis menerapkannya sebagai tekanan dan percepatan ke ANSYS *Mechanical Structural* atau ANSYS elemen hingga.

ANSYS Aqwa menyediakan perangkat rekayasa untuk menyelesaikan efek dari gelombang, angin dan arus pada bangunan laut mengapung maupun *fixed*, termasuk : SPAR, *floating production, storage, and offloading (FPSO)*, *semi-submersible*, *Tension Leg Platforms (TLP)*, kapal, dan bangunan pemecah gelombang. ANSYS Aqwa menyediakan dua perangkat lunak yaitu *Hydrodynamic diffraction* dan *Hydrodynamic response*.

Aqwa *Hydrodynamic Diffraction* menyediakan lingkungan yang terintegrasi untuk mengembangkan hidro utama parameter dinamis yang diperlukan untuk

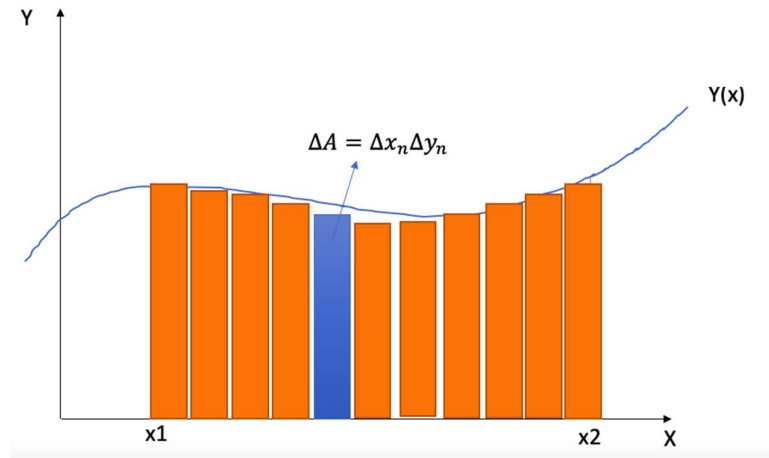
melakukan gerakan kompleks dan analisis respons. Tiga dimensi- analisis radiasi dan difraksi linier sional dapat dilakukan dengan banyak benda, dengan mempertimbangkan sepenuhnya efek interaksi hidrodinamik yang terjadi antara tubuh. Sementara terutama dirancang untuk mengambang struktur, badan tetap seperti pemecah gelombang atau struktur berbasis gravitasi dapat dimasukkan dalam model. Perhitungan gaya gelombang orde kedua melalui matriks fungsi transfer kuadrat penuh memungkinkan digunakan pada berbagai kedalaman air.

*Aqwa Hydrodynamic Time Response* memberikan kemampuan analisis dinamis untuk melakukan per-penilaian bentuk struktur terapung dalam domain waktu. Berbagai koneksi fisik, seperti tali tambat, fender, dan artikulasi, disediakan untuk memodelkan kondisi penahan kapal. Selain itu, simulasi *sea-keeping* dapat dilakukan dengan menyertakan kecepatan maju efek. Efek *slow-drift* dan kondisi gelombang ekstrim dapat diselidiki, dan kondisi kerusakan, seperti kerusakan garis, dapat dimasukkan untuk mempelajari efek sementara yang mungkin terjadi.

*Aqwa* merupakan aplikasi metode numerik yang sudah sangat populer untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan hidrodinamika yang kompleks menggunakan metode numerik. Salah satu faktor yang sangat penting dalam menentukan kualitas hasil simulasi *Aqwa* adalah meshing atau *gridding*. Proses ini secara umum menghabiskan waktu 70-80% dari keseluruhan proses pembuatan model *Aqwa*.

*Meshing* adalah proses diskritisasi domain fluida yang kontinyu menjadi domain komputasi yang diskrit sehingga dapat diselesaikan persamaan-persamaan aliran fluida di dalamnya dan menghasilkan solusi. Secara sederhana, proses diskritisasi dapat dilihat pada Gambar 2.6 dan dapat ditulis pada Persamaan 2.27.

$$A = \Delta x_1 \Delta y_1 + \Delta x_2 \Delta y_2 + \Delta x_3 \Delta y_3 + \Delta x_4 \Delta y_4 \quad (2.27)$$



**Gambar 2. 6** Proses diskritisasi (*Meshing*)

### 2.2.17. Validasi

Untuk melihat selisih dari hasil eksperimen dan metode numerik, maka perlu dilihat suatu ukuran dari selisih kedua metode tersebut, yaitu selisih dari besaran hasil simulasi dengan yang benar-benar terjadi. Hal ini bisa dilakukan dengan membandingkan besaran hasil simulasi dengan hasil eksperimen. Persamaan yang digunakan untuk melihat selisih adalah *mean square error* dan *root mean square error* dapat dilihat pada Persamaan 2.28 dan 2.29.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\bar{x}_i - x]^2 \quad (2.28)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2.29)$$

Dimana :

$MSE$  = Rata-rata kuadrat kesalahan

$RMSE$  = Akar dari rata-rata kuadrat kesalahan

$N$  = Jumlah data

$\bar{x}_i$  = Nilai eksperimen

$x$  = Nilai simulasi numerik