

ANALISA PENGARUH VARIASI BENTUK BOTTOM TERHADAP NILAI HEAVE DAN PITCH FPSO BERBENTUK SILINDER DI PERAIRAN LEPAS PANTAI UTARA NATUNA-INDONESIA

Mita Ardiana¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Eko Sasmito Hadi¹⁾

¹⁾Program Studi S1 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Email: mitardiana@gmail.com

Abstrak

Kepulauan Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik bahkan di Dunia. Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik Untuk mengeksplor cadangan hidrokarbon yang tersebar dibanyak titik maka FPSO menjadi salah satu alternatif pilihan yang diminati Investor dari segi investasi lebih efisien dari pada FSO karena FPSO bersifat mobile dan dapat melakukan proses produksi, serta reliability dalam pengoperasiannya. Revolusi teknologi dibidang FPSO tidak berhenti sampai disitu, kini FPSO tidak hanya berbentuk kapal tapi juga berbentuk silinder. FPSO silinder pertama di dunia adalah FPSO Sevan Piranema. Ditinjau dari performanya, bentuk bottom FPSO silinder dari Sevan Piranema saat ini memiliki olah gerak yang paling baik. Dalam penelitian ini, dilakukan modifikasi variasi bottom FPSO silinder. Dan pemodelan variasi bentuk bottom dengan bantuan Ansys Aqwa, yang bertujuan untuk mengetahui beban gelombang pada struktur dan selanjutnya untuk menganalisis karakteristik gerakan dari FPSO silinder. Dengan mempertimbangkan hasil analisis karakteristik gerakan FPSO silinder, dilakukan analisis operabilitas FPSO silinder untuk mengetahui hubungan karakteristik gerakan FPSO silinder dengan kemampuan operasinya di laut, dengan memperhatikan kriteria operasi yang telah ditentukan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa olah gerak terbaik/minimum untuk gerakan heave dan pitch secara keseluruhan berturut-turut didapatkan pada Model 5, Model 1, Model 3, Model 6, Model Sevan, Model 2 dan Model 4.

Kata kunci : *Seakeeping, FPSO Silinder, Heave, Pitch, Sevan Marine*

1. PENDAHULUAN

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2011) menjelaskan, Indonesia dikaruniai sumber daya alam melimpah. Sumber daya minyak dan gas yang diperkirakan mencapai 87,22 miliar barel dan 594,43 TSCF tersebar di Indonesia. Kepulauan Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik bahkan di Dunia. Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik Hal ini merujuk pada salah satu ladang gas yang terletak 225 kilometer (km) sebelah utara Natuna. Kurang lebih tersimpan cadangan gas alam dengan volume sebesar 222 triliun kaki kubik (TCT). Untuk mengeksplor cadangan hidrokarbon yang tersebar dibanyak titik maka FPSO menjadi salah satu

alternatif pilihan yang diminati Investor dari segi investasi lebih efisien dari pada FSO karena FPSO bersifat *mobile* dan dapat melakukan proses produksi, serta *reliability* dalam pengoperasiannya.

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) adalah sebuah fasilitas di atas bangunan terapung yang dioperasikan di suatu ladang minyak dan gas bumi lepas pantai yang berfungsi untuk menerima, memproses, menyimpan dan menyalurkan hidrokarbon yang secara permanen ditambatkan di tempatnya beroperasi dan dapat dipindahkan dari satu tempat ke tempat lain. Ditinjau dari bentuk bangunannya, FPSO terbagi menjadi dua yaitu berbentuk kapal dan berbentuk silinder. Revolusi teknologi

dibidang FPSO tidak berhenti sampai disitu, kini FPSO tidak hanya berbentuk kapal tapi juga berbentuk silinder. FPSO silinder pertama di dunia adalah FPSO Sevan Piranema. FPSO silinder tersebut merupakan hak paten dari Sevan Marine yang beroperasi pada tahun 2007 dilepas pantai Brazil dengan desain operasi di perairan ultra-dalam, mulai 1000 m – 1600 m [2]. Kemudian disusul dengan pembangunan FPSO silinder lainnya antara lain: FPSO Hummingbird, FPSO Voyageur dan FPSO Gollith.

2. Dasar Teori

2.1. Wilayah Natuna

Secara astronomis, Kabupaten Natuna terletak pada titik koordinat 1016' – 7019' LU dan 105000' – 110000' BT. Kepulauan Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik bahkan di Dunia. Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik Hal ini merujuk pada salah satu ladang gas yang terletak 225 kilometer (km) sebelah utara Natuna. Kurang lebih tersimpan cadangan gas alam dengan volume sebesar 222 triliun kaki kubik (TCT). Selain itu, gas hidrokarbon yang bisa ditambang mencapai 46 TCT. Angka itu tentu saja belum termasuk cadangan gas alam yang terdapat di bagian barat Natuna. Adapun kondisi lingkungan perairan lepas pantai Utara Natuna sebagai berikut:

Tabel 1 Data Lingkungan Perairan Utara Natuna

| No | Nama Wilayah Perairan | Kec. Angin (Knot) | Tinggi Gel. Sig (m) | Tinggi Gel. Maks (m) |
|----|---------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| 1 | Laut Cina Selatan, Utara Natuna | 15 - 20 KT | 1.0 - 2.0 | 2.0 - 3.0 |
| 2 | Perairan Kep. Natuna | 10 - 15 KT | 0.3 - 0.7 | 1.0 - 2.0 |
| 3 | Perairan Kep. Anambas | 8 - 13 KT | 0.3 - 0.7 | 0.7 - 1.5 |
| 4 | Laut Natuna | 10 - 15 KT | 0.3 - 0.7 | 1.0 - 2.0 |

2.1 FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*)

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) adalah sebuah fasilitas di atas bangunan terapung yang dioperasikan di suatu ladang minyak dan gas bumi lepas pantai yang berfungsi untuk menerima, memproses, menyimpan dan menyalurkan hidrokarbon yang secara permanen ditambatkan di tempatnya beroperasi dan dapat dipindahkan dari bentuk bangunannya, FPSO terbagi menjadi dua yaitu

berbentuk kapal dan berbentuk silinder.

Beberapa fungsi yang dimiliki oleh FPSO unit sehingga banyak sekali FPSO unit ini digunakan di seluruh dunia, yaitu :

- Untuk pengolahan Hidrokarbon
- Untuk penyimpanan minyak hasil penambangan
- Membantu proses pengeboran minyak

FPSO berbentuk kapal pada dasarnya adalah kapal dengan lambung tunggal yang difungsikan sebagai wahana untuk mengakomodasi fasilitas di atas geladak guna memproses produk migas dan sekaligus menyimpan di dalam tangki–tangki pada lambungnya sebelum produk ditransfer ke kapal – kapal tangki pengangkut untuk didistribusikan ke pasaran. Konsep FPSO pada dasarnya diperkenalkan untuk menggantikan sistem kombinasi anjungan produksi dengan fasilitas menyimpan terapung atau *Floating Storage Offloading* (FSO). Integrasi dua fungsi yang dapat diakomodasikan dalam satu wahana tentu akan memberikan efisiensi segi teknis dan ekonomis dari beberapa aspek, baik pada tahap pembangunan maupun operasinya.

Pada dasarnya FPSO berbentuk silinder memiliki fungsi kerja yang sama dengan FPSO berbentuk kapal yaitu sebagai wahana untuk mengakomodasi fasilitas di atas geladak guna memproses produk migas dan sekaligus menyimpan di dalam tangki – tangki pada lambungnya sebelum produk ditransfer ke kapal – kapal tangki pengangkut untuk didistribusikan ke pasaran.

Hanya saja terletak pada perbedaan bentuk dan performa hidrodinamika. FPSO silinder merupakan teknologi hasil desain dari Sevan Marine yang telah dipatenkan. FPSO berbentuk silinder ini dirancang untuk memberikan peningkatan gerakan, cadangan stabilitas yang lebih tinggi dan kapasitas beban geladak lebih tinggi dari unit konvensional dirancang untuk beroperasi di air ultra-dalam, mulai dari 1.000 sampai 1.600 meter.

2.4. Olah Gerak

Analisis gerak perilaku kapal di perairan yang sering disebut sebagai *seakeeping*. *Seakeeping* merupakan bidang studi yang meliputi

perilaku dan unjuk kerja kapal diatas gelombang yang menunjukkan kemampuan kapal untuk mempertahankan fungsi dalam menjalankan misinya dilaut. Jadi analisa seakeeping sangat diperlukan untuk melihat kemampuan kapal untuk bertahan dalam kondisi berbahaya pada saat menghadapi cuaca buruk. Sekarang Kinerja seakeeping menjadi semakin penting. Dengan komputer yang cepat dan software canggih yang tersedia, memungkinkan untuk mengetahui karakteristik seakeeping kapal untuk ditangani jauh lebih awal dalam desain spiral. Badan pengawas dan operator menjadi semakin sadar akan pentingnya menentukan persyaratan *seakeeping* yang harus dipenuhi kapal. Analisa *seakeeping* pada dasarnya terbagi menjadi 3 bagian, yaitu :

1. Estimasi kondisi lingkungan yang mungkin dihadapi oleh kapal
2. Prediksi karakteristik respon kapal
3. Spesifikasi dari kriteria yang digunakan untuk menilai perilaku seakeeping kapal.

Setiap struktur terapung yang bergerak di atas permukaan laut selalu mengalami gerakan osilasi. Ada 3 macam gerakan merupakan gerakan osilasi murni yaitu *heaving*, *rolling* dan *pitching*, karena gerakan ini bekerja di bawah gaya atau momen pengembali ketika struktur itu terganggu dari posisi kesetimbangannya.

Respon dari gerakan kapal meliputi:

- *Added mass inertial force* adalah penambahan massa pada kapal untuk kembali pada posisi semula.
- *Damping Force* adalah gaya peredam yang bellawanan arah dengan arah gerak yang menghasilkan pengurangan *amplitude* gerakan kapal secara berangsur-angsur.
- *Restoring Force* adalah gaya untuk mengembalikan kapal ke posisi semula (*equilibrium position*). Gaya ini merupakan gaya *bouyancy* tambahan.
- *Exciting Force* adalah gaya eksternal yang bekerja pada kapal yang berasal dari integrasi gaya apung tambahan dan gelombang sepanjang kapal.

2.4.1. Heave

Heave adalah gerakan kapal yang sejajar sumbu Z dan saat terjadi heaving kapal mengalami naik turun secara vertikal. Periode *Heaving* (T_h) :

$$T_h = \sqrt{2 \left(d \times \frac{C_b}{C_w} \right)} \text{ (detik)}$$

Dimana:

- d = Sarat kapal
- C_b = Koefisien blok
- C_w = Koefisien garis air

2.4.2. Pitch

Pitching adalah gerakan kapal yang memutar sumbu Y, ketika terjadi pitching kapal mengalami perubahan trim bagian bow dan stern secara bergantian.

Persamaan gerakan *pitching* dapat ditulis:

$$a \frac{d^2 \theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + c\theta = M_0 \cos \omega_e t$$

Dimana:

Inertia momen = $a \frac{d^2 \theta}{dt^2}$

a = momen inertiya yang sebenarnya

$\frac{d^2 \theta}{dt^2}$ = adalah percepatan sudut dari gerakan *pitching*

Periode *pitching*:

$$\frac{T_p}{\sqrt{L}} = C \sqrt{\frac{\Delta}{(0.01L)^3 g}}$$

Dimana:

C = Konstanta (0.009-0.01)

Periode *pitching* dipengaruhi oleh:

- Tipe kapal
- *Displacement* kapal
- Panjang kapal

2.5. Spektrum Gelombang

Pada penelitian ini spektra gelombang yang digunakan adalah spektra gelombang *ITTC* dengan 2 parameter sesuai pada Persamaan 4.1. Tinggi variasi gelombang signifikan (H_s) yang digunakan adalah 3 m, 2,5 m, 2 m, dan 1,5 m dengan variasi Periode Rata-rata (T_{av}) 6,09 detik, 5,60 detik, 4,82 detik dan 3,70 detik. Katagori perairan ini termasuk pada *Moderate Waters* atau termasuk pada *Sea State 4*.

$$S_{ITTC_s}(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(\frac{-B}{\omega^4}\right) \quad (1)$$

Dimana:

ω = frekuensi gelombang (rad/det)

$$A = 172,75 \frac{H_s}{T_{ave}^4}$$

$$B = \frac{691}{T_{ave}^4}$$

Spektrum gelombang (S_ω) yang dihasilkan dari persamaan (1) sangat bergantung pada nilai frekuensi gelombang. Akibat pengaruh kecepatan kapal dan sudut datang gelombang, maka frekuensi gelombang insiden (ω_w) akan berubah menjadi frekuensi gelombang papasan atau *encountering wave frequency* (ω_e). Gelombang papasan inilah yang digunakan untuk membuat spektrum gelombang papasan (S_e). Untuk menghitung frekuensi gelombang papasan dapat menggunakan persamaan (2)

$$\omega_e = \omega \left(1 - \frac{\omega V}{g} \cos \mu \right) \quad (2)$$

Dimana:

ω_e = frek. gelombang papasan (rad/det)

ω_w = frek. gelombang (rad/det)

V = kecepatan kapal (m/s)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

Pada kondisi sebenarnya, struktur terapung yang bergerak di laut akan mengalami eksitasi gelombang yang bersifat acak (random), sesuai dengan sifat alami dari gelombang laut. Dalam hal ini, suatu loncatan dalam pemecahan permasalahan gerak kapal di laut telah ditunjukkan oleh St. Denis dan Pierson pada awal tahun 50an. Peneliti tersebut mengungkapkan gerak kapal/struktur terapung di atas gelombang acak dapat dihitung dengan mentransformasikan spectrum gelombang, $S(\omega)$, menjadi spectrum respons gerakan kapal, $S_R(\omega)$. Data yang akan digunakan adalah RAO dan spektra gelombang, sehingga dengan fungsi transfer berikut dapat dihitung spektra respons:

$$S_R(\omega) = RAO^2 \times S_j(\omega) \quad (3)$$

Jika spektra respons telah didapat, maka nilai-nilai statistik gerakan dapat dihitung dengan menerapkan formulasi matematis berikut.

$$m_0 = \int_0^\infty S_j(\omega) d\omega \quad (4)$$

Bila variabel m_0 didefinisikan sebagai luasan di bawah kurva spektra, maka tinggi (*double amplitude*) signifikan dapat dihitung sebagai

$$H_s = 4.0 \sqrt{m_0} \quad (5)$$

dan amplitudo signifikan adalah setengah dari tinggi signifikannya, atau

$$\zeta_s = 2.0 \sqrt{m_0} \quad (6)$$

Sedangkan tinggi rata-rata adalah

$$\bar{H} = 2.54 \sqrt{m_0} \quad (7)$$

Dan amplitudo rata-rata adalah

$$\bar{\zeta} = 1.27 \sqrt{m_0} \quad (8)$$

Disamping luasan di bawah spektra, dalam hal ini dapat juga didefinisikan momen spektra ke 2 dan ke 4, sebagai berikut:

$$m_0 = \int_0^\infty \omega^2 S(\omega) d\omega \quad (9)$$

$$m_4 = \int_0^\infty \omega^4 S(\omega) d\omega \quad (10)$$

Berdasar definisi ini, maka variabel stokastik kecepatan dan percepatan gelombang atau gerakan dapat dihitung, seperti dengan pemakaian untuk displasemen. Misalnya, amplitudo kecepatan rata-rata adalah:

$$\bar{\dot{\zeta}} = 1.27 \sqrt{m_2} \quad (11)$$

$$\bar{\ddot{\zeta}}_s = 2.0 \sqrt{m_4} \quad (12)$$

Setelah nilai-nilai stokastik dari spektra respons telah didapatkan, maka selanjutnya dikolerasikan terhadap kriteria operasi.

2.6. Response Amplitudo Operator (RAO)

Respon gerakan kapal terhadap gelombang regular dinyatakan dalam RAO (*Response Amplitudo Operator*), dimana RAO adalah rasio antara amplitudo gerakan kapal (baik translasi maupun rotasi) terhadap amplitudo gelombang

pada frekuensi tertentu.

Respons gerakan RAO untuk gerakan translasi merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan kapal (Z_0) dengan amplitudo gelombang (ζ_0) (keduanya dalam satuan panjang) :

$$RAO = \frac{Z_0}{\zeta_0} \text{ (m/m)} \quad (13)$$

Sedangkan gerakan rotasi merupakan perbandingan amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang yang merupakan perkalian angka gelombang, $k_w = \omega^2/g$ dengan amplitudo gelombang :

$$RAO = \frac{\theta_0}{k_w \zeta_0} = \frac{\theta_0}{(\omega^2/g)\zeta_0} \text{ (rad/rad)} \quad (14)$$

Pada kenyataannya, gelombang di laut adalah gelombang acak sehingga respon kapal terhadap gelombang regular yang dinyatakan dalam RAO tidak dapat menggambarkan respon kapal pada keadaan sesungguhnya di laut. Untuk mendapatkan respon gerakan kapal terhadap gelombang acak dapat digambarkan dengan spektrum respon. Spektrum respon didapatkan dengan mengalikan spectrum gelombang (S_ζ) dengan RAO^2 :

$$S_{\zeta_r}(\omega) = RAO^2 \times S_\zeta(\omega) \quad (15)$$

2.7. Pengaruh *Bottom* pada FPSO Silinder

Pengaruh *Bottom* dapat memberikan dampak dalam mendesain bangunan lepas pantai, konstruksi, pembuatan dan pengoperasian bangunan lepas pantai yang berkaitan dengan karakteristik *seakeeping*, trim, dll.

Pengaruh perubahan *bottom* terhadap olah gerak yang dihasilkan, mempengaruhi terhadap beberapa perubahan, diantaranya:

1. Perubahan dalam tahanan gesek
2. Perubahan terhadap stabilitas
3. Perubahan terhadap olah gerak

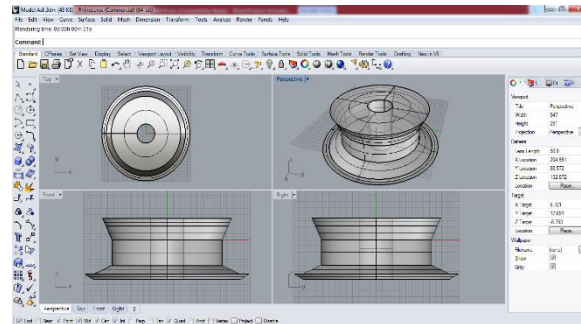
3. METODOLOGI PENELITIAN

Mengumpulkan data-data sebagai upaya menunjang selesainya penelitian

a. Data Primer

Pada penelitian ini akan dipakai FPSO berbentuk silinder yang didapat dari Sevan Marine. FPSO silinder ini dibangun untuk beroperasi di daerah Perairan Lepas Pantai Utara Natuna-Indonesia. Berikut data ukuran utama FPSO silinder :

| | |
|--------------------------|------------|
| Hull Diameter | : 93.00 m |
| Bilge Box Diameter | : 124.00 m |
| Bilge Box Plate Diameter | : 138.00 m |
| Main Deck Diameter | : 103.00 m |
| Process Deck Diameter | : 109.00 m |
| Main Deck Diameter | : 42.00 m |
| Process Deck Diameter | : 48.00 m |
| Draft, Ballast | : 22.00 m |
| Draft Loaded | : 31.00 m |
| Constant Draft | : 27.00 m |
| Freeboard to Ballast | : 20.00 m |
| Freeboard to Loaded | : 11.00 m |



Gambar 1 Model FPSO silinder

b. Data Sekunder

Beberapa literatur dan sumber informasi yang dibutuhkan diperoleh dari berbagai buku-buku, jurnal, artikel, internet dan diskusi

Tahap selanjutnya yakni pengolahan data dari hasil pengumpulan data. Data yang diperoleh selanjutnya diolah dengan software untuk membantu perhitungan dan analisa.

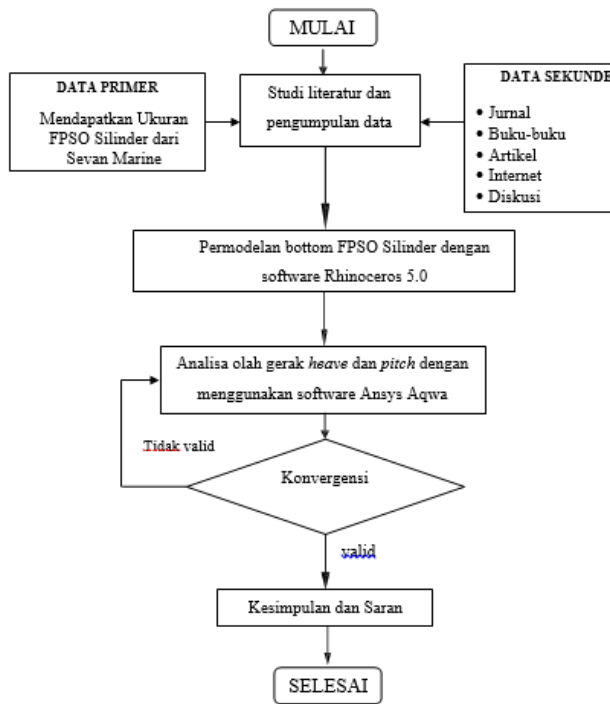
Penelitian ini difokuskan pada efek yang ditimbulkan oleh bentuk *bottom* FPSO silinder dengan menggunakan tiga tipe *bottom* terhadap olah geraknya). Penelitian ini disimulasikan untuk memperoleh nilai respon *seakeeping* yang paling baik.

Parameter yang dipakai adalah sebagai berikut :

- Parameter tetap :
 - a. Dimensi diameter *hull* FPSO silinder
 - b. Displacement
- Parameter peubah
 - a. Geometri bentuk *bottom* FPSO silinder
 - b. Draft

Berdasarkan data yang telah didapat dibuat desain *bottom* dengan software *Rhinoceros 5.0*,

analisa *heave* dan *pitch*, dan simulasi dengan menggunakan software Ansys Aqwa.



Gambar 2 Flow chart diagram

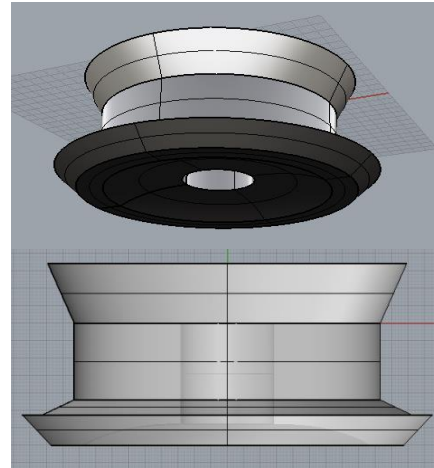
4. ANALISA

4.1. Pengolahan Data

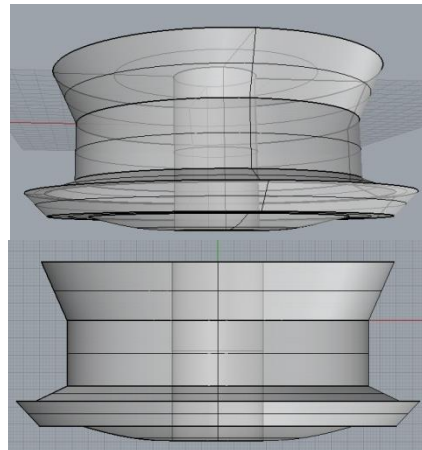
Secara umum proses modifikasi yang akan dilakukan adalah merubah bentuk dari bentuk *bottom* FPSO berbentuk silinder model asli menjadi beberapa bentuk variasi *bottom*.

Modifikasi yang dilakukan pada bentuk *bottom* FPSO berbentuk silinder dengan mempertahankan variabel tetap yaitu dimensi diameter *hull* FPSO silinder dan displacement.

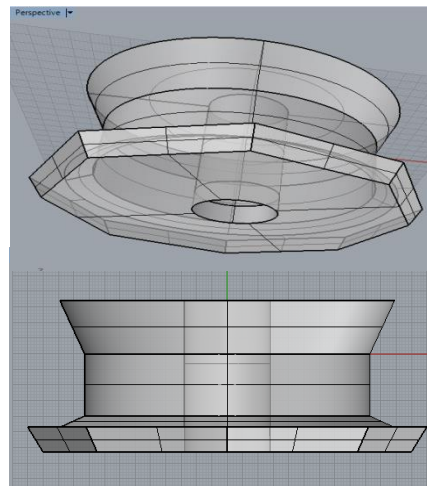
Untuk variabel yang akan diubah yaitu bentuk bentuk *bottom* FPSO silinder dan sarat (T). Dari variabel yang sudah ditentukan maka akan didapatkan beberapa model bentuk *bottom* FPSO silinder sebagai berikut.



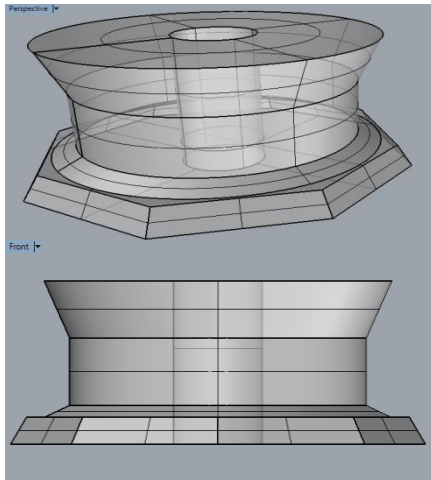
Gambar 3. Model 1



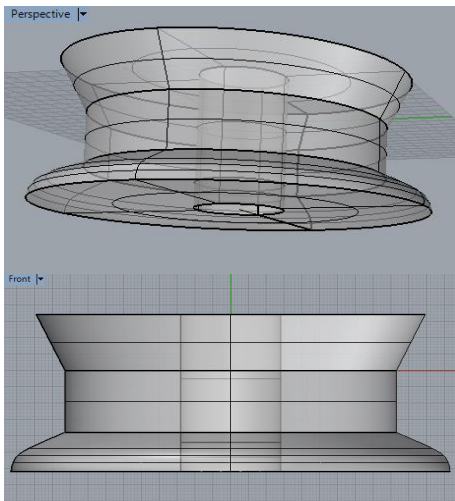
Gambar 4. Model 2



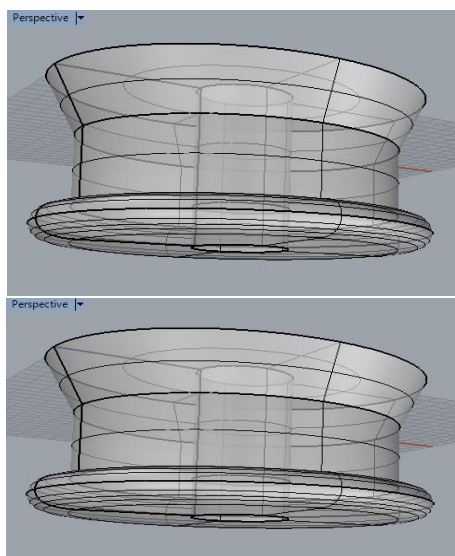
Gambar 5. Model 3



Gambar 6. Model 4



Gambar 7. Model 5



Gambar 8. Model 6

Berikut apabila model variasi *bottom* FPSO rancangan telah selesai didapatkan displasemen keenam variasi model FPSO rancangan. Displasemen ini kemudian digunakan untuk kepentingan validasi kepada FPSO acuan. Displasemen diharapkan bernilai 239446 ton atau setidaknya mendekati nilai tersebut, dengan toleransi *error* kurang dari 5%.

Tabel 2. Validasi *Displacement*

| Displacement | | Error |
|--------------|------------|--------------|
| Model 1 | 239446,432 | 239446 0,010 |
| Model 2 | 239446,864 | 239446 0,010 |
| Model 3 | 239446,327 | 239446 0,010 |
| Model 4 | 239446,967 | 239446 0,010 |
| Model 5 | 239445,421 | 239446 0,010 |
| Model 6 | 239446,531 | 239446 0,010 |

4.2. Studi Geografis

Pada penelitian ini perhitungan olah gerak kapal (*seakeeping*) di perlukan beberapa data geografis pendukung yaitu :

4.2.1. Kondisi Perairan (*Sea Condition*)

Kondisi perairan pada penelitian ini mengacu pada kondisi (*Sea State Code*) yang telah ditetapkan WMO (*World Meteorological Organization*) dengan peninjauan pada 3 (tiga) variasi kondisi laut dengan parameter yang berbeda meliputi 1/3 tinggi gelombang tertinggi (*significant wave height*), periode gelombang (*wave period*), dan kecepatan angin (*Sustained Wind Speed*). Variasi kondisi laut tersebut adalah ombak kecil (*Slight*), ombak sedang (*Moderate*), dan ombak besar (*Rough*).

Tabel 4.2 *World Meteorological Organization Sea State Code*

| <i>Sea State Code</i> | <i>Sustained Wave Heigt (H_{1/3})(m)</i> | <i>Sustained Wind Heigt (Knots)</i> | <i>Wave Period (s)</i> | <i>Description</i> |
|-----------------------|--|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| | <i>Rang</i> | | | |
| 3 | 0,5 – 1,25 | 11 – 16 | 7,5 | <i>Slight water</i> |
| 4 | 1,25 – 2,5 | 17 – 21 | 8,8 | <i>Moderate water</i> |
| 5 | 2,5 - 4 | 22 – 27 | 9,7 | <i>Rough water</i> |

Perairan Lepas Pantai Utara Natuna-Indonesia termasuk perairan yang banyak terjadi gelombang yang tidak terlalu tinggi atau sedang. Berdasarkan data Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika pada Tabel 4.2, Perairan Lepas

Pantai Utara Natuna memiliki tinggi gelombang rata-rata 1,0 m – 2,0 m dengan tinggi maksimum rata-rata 2 m – 3 m. Rata-rata kecepatan angin di Perairan Laut Jawa adalah 15 knot – 20 knot.

4.2.2. Evaluasi Karakteristik Olah Gerak

Pada penelitian ini, evaluasi olah gerak dilakukan untuk mendapatkan perilaku gerakan dari *bottom* yang divariasi. Perbandingan antara kinerja *bottom* FPSO Sevan Piranema dengan beberapa jenis *bottom* variasi dilakukan untuk mengetahui keunggulan dan kekurangan perilaku olah gerak satu sama lain. Hal ini diperlukan dalam memberikan rekomendasi desain *bottom* yang lebih baik untuk digunakan pada FPSO silinder.

Kriteria penerimaan kinerja olah gerak kapal ditentukan dalam *Nordforsk 1987* dan kriteria operasi pengeboran yang diadopsi dari kriteria operasi *Essar Wildcat* yang akan digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3. *Criteria for Acceleration and Roll, Nordforsk 1987*

| Description | RMS Vertical Acceleration |
|--------------------|---------------------------|
| Light Manual Work | 0.20 g |
| Heavy Manual Work | 0.15 g |
| Intellectual Work | 0.10 g |
| Transit Passengers | 0.05 g |
| Cruise Liner | 0.02 g |

Tabel 4. Kriteria operasi *Essar Wildcat* berdasarkan respons gerakan

| Operation | Heave | Pitch/Roll Single Amplitude |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Kenyamanan Operator | 0,2 g (m/s ²) | - |
| Land BOP on Wellhead | 2,4 m | 2,5 deg |
| Running BOP | 4,6 m | 2,5 deg |
| Running Casing | 4,6 m | 2,5 deg |
| Disconnect Riser | 5,5 m | 2,5 deg |
| Drilling or Tripping | 4,6 m | 2,5 deg |
| Hang-off | 2,2 m | 2,5 deg |
| Cementing | 2,2 m | 2,5 deg |
| Crane Operation | 5,5 m | 3 deg |
| End of Self Propelled Transit | - | 3 deg |
| Helicopter | 5,5 m | - |

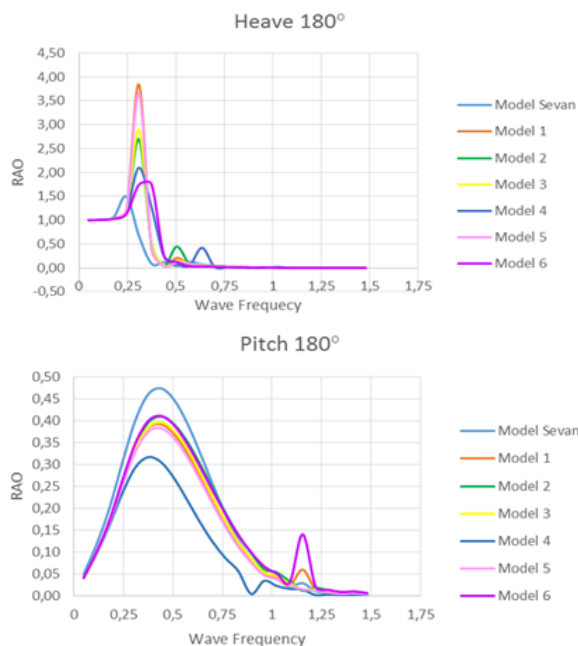
4.3. Perhitungan

Analisis olah gerak dihitung dengan menggunakan bantuan *Ansys Aqwa* yang

menggunakan *Hydrodynamic Diffraction*. Hasil analisa olah gerak kapal dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

1. RAO (*Response Amplitude Operator*) dari *heave* dan *pitch*
2. *Wave spectrum*
3. *Vertical acceleration*

Hasil analisa olah gerak ini berupa *Response Amplitude Operator* untuk *heave* dan *pitch*

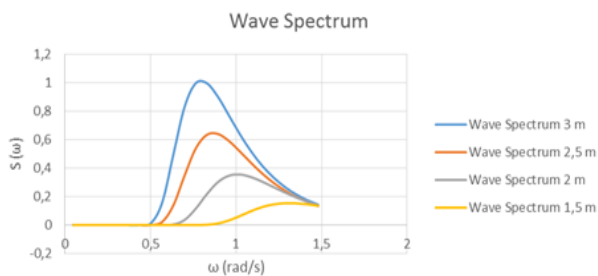


Gambar 9. Grafik RAO *heave* dan *pitch* pada sudut gelombang 180°

Dapat diamati karakteristik gerakan keenam model FPSO silinder, bahwa keenamnya mempunyai gerakan rotasional (*pitch*) yang cukup kecil, bahkan secara umum lebih kecil dari model FPSO acuannya, *Sevan Piranema*. Hal ini disebabkan oleh perbedaan geometri, konfigurasi, dan ukuran dimensi *bottom*, yang memberikan perbedaan luas penampang struktur yang berada dalam pengaruh gelombang, yang ini selanjutnya memberikan perbedaan karakteristik gerakan pula. Pada RAO *heave*, terlihat Model 1 mempunyai nilai maksimum tertinggi, 3,84 m/m, pada frekuensi 0.31 rad/s dan pada sudut gelombang 90°. Dan untuk RAO *pitch*, nilai maksimum tertinggi didapatkan pada Model 2, pada frekuensi 0.44 rad/s, sebesar 0,41 deg/m dan pada sudut gelombang 0°. Tabel dibawah ini menyajikan nilai RAO maksimum *heave* dan *pitch* disetiap variasi

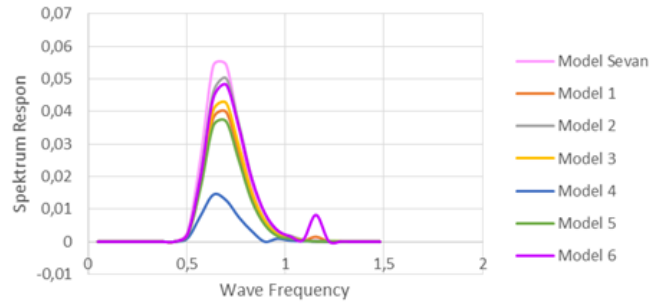
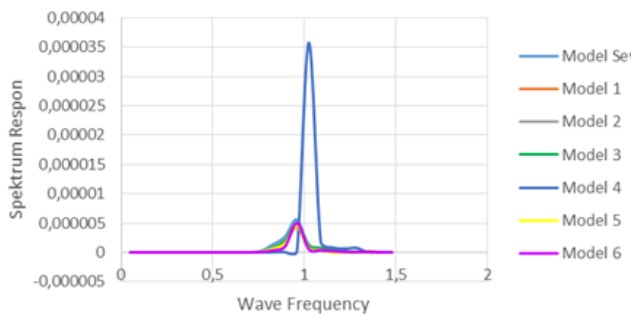
model pada frekuensi dan sudut gelombang tertentu.

Sebaran periode puncak spektra di Perairan Lepas Pantai Utara Natuna mempunyai rentang antara 3,70 detik s.d 6,09 detik dan rentang H_s antara 1,5 m s.d 3 m. Di setiap periode puncaknya terdiri dari variasi tinggi gelombang signifikan (H_s) tertentu. Gambar 4.14 berikut menunjukkan spektrum energi gelombang Perairan Lepas Pantai Utara Natuna pada setiap periode dengan menggunakan formula ITTC.



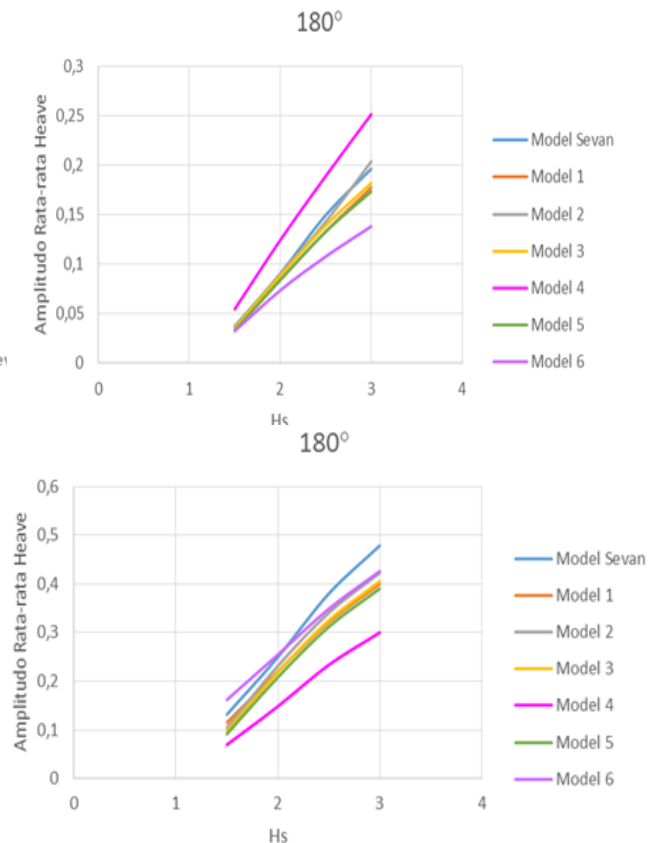
Gambar 10. Grafik *Wave Spectra* Perairan Lepas Pantai Utara Natuna pada setiap periode dengan menggunakan formula ITTC

Spektra respons didapatkan setelah melakukan perhitungan wave spectra dengan RAO. Dalam komputasi spektra respons ini, hanya dilakukan pada moda gerakan osilasi (*heave dan pitch*) yang sesuai dengan kebutuhan kriteria operasi. Grafik spektra respons ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 11. Grafik spektra respon gerakan *heave* pada sudut gelombang masuk 180° dan $T = 3,70$ detik

Luasan dibawah kurva spektra respons tiap gerakan atau disebut m_0 perlu didapatkan untuk nantinya digunakan untuk mencari nilai statistik tiap gerakan dengan mengaplikasikan persamaan (4). Selanjutnya, dengan menggunakan persamaan (6) dan (8), nilai amplitudo signifikan dan amplitudo rata-rata bisa didapat. Nilai amplitudo respons gerakan rata-rata di tiap gerakan inilah yang dikorelasikan dengan kriteria operasi, untuk didapatkan operabilitas di tiap periode dan tinggi gelombang signifikan.



Gambar 12. Nilai amplitudo respons gerakan rata-rata di tiap gerakan inilah yang dikorelasikan dengan kriteria operasi

Dari Gambar 12, dapat dilihat bahwa amplitudo gerakan keenam model variasi FPSO, untuk *heave* dan *pitch*, hingga tinggi gelombang signifikan tertinggi, tidak ada yang melampaui kriteria operasi. Meskipun pada beberapa model variasi FPSO silinder memiliki RAO maksimum yang tinggi tetapi pada frekuensi-frekuensi rendah. Dari beberapa variasi model FPSO silinder menunjukkan karakteristik gerakan yang lebih baik dari FPSO silinder Sevan Piranema pada beberapa gerakan.

Pola olah gerak terbaik/minimum untuk gerakan *heave* dan *pitch* secara keseluruhan berturut-turut didapatkan pada Model 5, Model 1, Model 3, Model 6, Model Sevan, Model 2 dan Model 4.

Karakteristik gerakan keenam model variasi *bottom* FPSO silinder di atas didapatkan dengan tiga langkah analisis. Pertama, dari analisis spektra gelombang, didapatkan nilai spektra gelombang tertinggi sebesar $0,996 \text{ m}^2/\text{rad/s}$, pada H_s 3 m dan T_p 6,09 detik. Kedua, dari analisis spektra respons, didapatkan spektra respons terbesar berturut-turut untuk gerakan *heave*, yaitu pada Model 4 sebesar $0,09 \text{ m}^2/\text{rad/s}$, Model 2 sebesar $0,05 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$, Model 3 sebesar $0,042 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$, Model 1 sebesar $0,04 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$, Model 5 sebesar $0,002 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$ dan Model 6 sebesar $0,0004 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$. Ketiga, dari analisis kenaikan intensitas gerakan dalam fungsi H_s 3 m, T_p 6,09 detik dan sudut gelombang masuk 0° , didapatkan hasil sebagai berikut. Untuk setiap sudut masuk gelombang, amplitudo *heave* dengan kenaikan terbesar dialami oleh Model 4, yaitu sebesar 0,089 m. Untuk kenaikan percepatan *heave*, nilai terbesar dialami oleh Model 4, yaitu sebesar $0,036 \text{ m/s}^2$. Sedangkan, amplitudo *pitch* dengan kenaikan terbesar dialami oleh Model 6, yaitu sebesar $0,11^\circ$. Untuk kenaikan percepatan *pitch*, nilai terbesar dialami oleh Model 6, yaitu sebesar $0,069 \text{ rad/s}^2$. Berikut merupakan nilai *amplitudo*, *velocity* dan *acceleration* masing-masing model terhadap sudut gelombang masuk.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Tujuan utama dalam penelitian ini adalah mendapatkan nilai *heave* dan *pitch* dari variasi bentuk *bottom* pada FPSO silinder dan mendapatkan bentuk *bottom* FPSO silinder yang memiliki nilai *heave* dan *pitch* yang lebih baik dari bentuk FPSO acuannya, yaitu FPSO Sevan Marine. Berdasarkan hasil analisis numerik untuk tiap-tiap olah gerak FPSO silinder. Meskipun tidak ada perbedaan yang significant, tampak bahwa:

1. Dari hasil analisa keseluruhan didapatkan hasil amplitudo gerakan keenam model variasi FPSO, untuk *heave* dan *pitch*, hingga tinggi gelombang signifikan tertinggi, tidak ada yang melampaui kriteria operasi. Meskipun pada beberapa model variasi FPSO silinder memiliki RAO maksimum yang tinggi tetapi pada frekuensi-frekuensi rendah. Dari beberapa variasi model FPSO silinder menunjukkan karakteristik gerakan yang lebih baik dari FPSO silinder Sevan Piranema pada beberapa gerakan.
2. Beberapa model variasi modifikasi *bottom* FPSO silinder lebih baik dibandingkan dengan model FPSO silinder Sevan Marine dalam gerakan *heave* dan *pitch*. Hal ini menunjukkan bahwa dari keenam model modifikasi, Model 5, Model 1, Model 3 dan Model 6 mempunyai redaman yang lebih baik pada gerakan *heave* dan *pitch* pada tinggi variasi gelombang signifikan (H_s) yang digunakan adalah 3 m, 2,5 m, 2 m, dan 1,5 m dengan variasi periode rata-rata 6,09 detik, 5,60 detik, 4,82 detik dan 3,70 detik.
3. Dari analisis spektra gelombang, didapatkan nilai spektra gelombang tertinggi sebesar $0,996 \text{ m}^2/\text{rad/s}$, pada H_s 3 m dan T_p 6,09 detik.
4. Dari analisa spektra respon, didapatkan spektra respons terbesar berturut-turut untuk gerakan *heave*, yaitu pada Model 4 sebesar $0,09 \text{ m}^2/\text{rad/s}$, Model 2 sebesar $0,05 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$, Model 3 sebesar $0,042 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$, Model 1 sebesar $0,04 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$, Model 5 sebesar $0,002 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$ dan Model 6 sebesar $0,0004 \text{ deg}^2/\text{rad/s}$.
5. Analisis kenaikan intensitas gerakan dalam fungsi H_s 3 m, T_p 6,09 detik dan setiap sudut masuk gelombang, amplitudo *heave* dengan kenaikan terbesar dialami oleh Model 4, yaitu

sebesar 0,089 m. Untuk kenaikan percepatan *heave*, nilai terbesar dialami oleh Model 4, yaitu sebesar 0,036 m/s². Sedangkan, amplitudo *pitch* dengan kenaikan terbesar dialami oleh Model 6, yaitu sebesar 0,11°. Untuk kenaikan percepatan *pitch*, nilai terbesar dialami oleh Model 6, yaitu sebesar 0,069 rad/s².

5.2. SARAN

1. Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan analisis kekuatan struktur untuk mengetahui apakah keenam FPSO silinder ini mampu untuk menopang *topsides* FPSO atau tidak.
2. Meskipun secara numerik variasi model *bottom* FPSO silinder ini telah dinyatakan layak dan aman untuk digunakan sebagai *bottom*, namun pembuktian secara eksperimen perlu dilakukan sebelum diaplikasikan secara riil.
3. Perlu dianalisa lagi olah gerak FPSO dengan menggunakan *mooring system*.

- [6] Iqbal, Muhammad dan Rindo, Good. 2015. *Optimasi Bentuk Demihull Kapal Katamaran untuk Meningkatkan Kualitas Seakeeping*. Kapal. Vol 12, No. 1.
- [7] Zarma, Nanang. 2014. Tugas Akhir. *Studi Karakteristik Seakeeping Kapal Ikan Tradisional dan Modern*. Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Semarang.
- [8] Komalasari, Rani. 2014. Tugas Akhir. *Studi Perbandingan Performa Hullform FPSO Berbentuk Silinder dan FPSO Berbentuk Kapal di Perairan Lepas Pantai Utara Natuna Indonesia*. Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Semarang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Paik, J.K. Thayamballi, A.K. 2007. *ShipShaped Offshore Installations: Design, Building, and Operation*". Cambridge University Press
- [2] Bathacarya Rameswar. 1978. *Dynamic of Marine Vehicles*. Maryland. JohnWiley&sons, Inc.
- [3] Djatmiko, E. B. 2006. *Analisis gelombang Acak*. Pembinaan Dasar Engineering dan Inspector bangunan Lepas Pantai Terpancang. Bandung
- [4] Djatmiko, E. B., 2003b, *Seakeeping: Perilaku Bangunan Apung diatas Gelombang*. Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya
- [5] Djatmiko, E. B dan Sudhira. B.P. 2014. *Studi Karakteristik Gerakan dan Operabilitas Anjungan Pengeboran Semi-submersible dengan Dua Kolom Miring dan Ponton Berpenampang Persegi Empat*. Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya