

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Struktur apung lepas pantai *Floating Production Unit (FPU)* merupakan fasilitas Migas berbentuk kapal yang menetap di lepas pantai. FPU Jangkrik sukses dibangun dengan *Intergrated Topside Module (ITM)* yang memiliki berat 15.000 ton dapat dirakit dan dibangun secara simultan. Berdasarkan pengalaman itu, maka tahun 2024 PT EMB merencanakan akan membangun sebuah struktur apung FPU dengan ukuran yang sama dengan FPU Jangkrik yang dinamakan FPU North (SKK MIGAS, 2017). SKK Migas sebagai owner dari FPU North memberi ketentuan syarat bahwa pembangunan FPU North dalam hal ini Hull dan Topside FPU North harus dibangun di Indonesia. Hal ini menjadi tantangan terbesar bagi PT.EMB mengingat keterbatasan kapasitas fasilitas peralatan galangan dan kondisi galangan di Indonesia yang masih belum memenuhi kapasitas dalam membangun struktur FPU North yang besar dengan target waktu pembangunan yang singkat. Oleh karena itu, PT EMB mengupayakan pembangunan Topside FPU North menggunakan konsep *ITM (Intergrated Topside Module)* yaitu merangkaikan seluruh pembangunan modul-modul topside menjadi satu-kesatuan yang utuh. *ITM* ini akan di *loadout* ke Hull-FPU dengan metode *skidding*.

Struktur FPU North terdiri dari Hull dan Topside. Topside merupakan bagian atas struktur lepas pantai tempat terpasangnya peralatan-peralatan sesuai dengan fungsi dari struktur tersebut (Kurniashanti D.P., 2018). Umumnya, struktur topside FPU terdiri dari beberapa module dengan fungsi masing-masing yang disusun secara terpisah di atas topside. Namun pada FPU North, akan menggunakan inovasi pada bagian topside yaitu seluruh module-module di atas topside dirangkai menjadi satu kesatuan yang dinamakan dengan "*Intergrated Topside Module (ITM)*".

Intergrated Topside Module (ITM) merupakan susunan dari module-module dengan fungsi berbeda yang dirangkai menjadi satu-kesatuan yang utuh di atas hull. Module-module ini terdiri dari *Gas Turbin Generator, Export Gas Compressore*, dll. Penggunaan konsep ini dilakukan karena memiliki keunggulan dapat mempersingkat waktu pengerjaan, lebih ekonomis dan dapat meminimalisir resiko kecelakaan kerja.

Dalam pembangunan sebuah FPU, salah satu tahapan pekerjaan yang dilakukan adalah proses *Loadout* (Diar Eka Satria Prabowo, 2018). Menurut GL Nobel Denton Guideline No. 0013/REV7, *Loadout* adalah proses perpindahan bangunan lepas pantai dari *yard* ke atas *barge* dengan menggerakkan struktur secara horizontal ataupun dengan metode pengangkatan *lifting*. *Loadout* adalah proses menarik



ke atas barge untuk ditransportasikan ke site tempat struktur instalasi (Kurniashanti D.P., 2018). *Loadout* adalah proses menarik FPU untuk proses penggabungan Hull dan ITM. Metode yang es *loadout ITM* ke atas Hull menggunakan metode *skidding*, yaitu ditumpu oleh *skidshoe* yang duduk diatas *skidway* kearah Hull- (D.P., 2018). Berdasarkan API RP 2A WSD 21th edition, *loadout* dilakukan dengan rencana instalasi dimana memenuhi kondisi lingkungan

seperti kedalaman perairan di *Jetty* tempat *Loadout* yang diizinkan selama operasi *loadout*. Pertimbangan penggunaan metode *skidding* ini antara lain adalah ketersediaan alat angkat yang tidak memadai untuk melakukan proses *lifting*, ukuran dan berat *Intergrated Topside Module (ITM)* yang sangat besar yang melebihi kapasitas alat angkat yang tersedia dan juga pertimbangan dari efisiensi operasi *loadout* (Diar Eka Satria Prabowo, 2018). Salah satu faktor yang sangat penting dalam pemilihan metode *loadout* yaitu faktor ekonomi (M.Rosyid et al, 2012).

Metode *Skidding* ini merupakan proses *LoadOut Intergrated Topside Module (ITM)* ke atas *Hull* yang pertama kali akan dilakukan di Saipem yard, Indonesia tahun 2027. Metode *skidding* dapat mengangkat struktur dengan berat lebih dari 2000 ton yang tidak dapat dilakukan metode lain (Agnis, 2013). Keamanan *skid* selama proses operasi merupakan proses yang paling riskan dalam proses *loadout*. Biasanya berat dan ukuran dari struktur yang diangkat, akan mempengaruhi kinerja dari *skid* (Arifta, 2014). Kegagalan dalam proses instalasi ini dapat menyebabkan kerusakan pada member lokal, cacat pada transportasi barge, menjungkirbalikkan struktur dan barge bersamaan, bahkan dapat menyebabkan kehilangan struktur total (Tri, 2013).

Dalam proses *loadout* dibutuhkan perencanaan teknik yang matang agar secara teknis dapat berjalan dengan lancar. Proses ini termasuk tahap yang cukup kritis, karena stabilitas *Hull-FPU* harus diperhitungkan dengan cermat sebelum dan setelah ada *ITM* di atasnya (Chakrabarti, 2005). Perubahan Kondisi Barge setelah ada beban di atasnya dari yang semula *No List* menjadi *List* ke salah satu sisi, baik itu *List to Port* atau *Starboard* maupun *trim* buritan atau sebaliknya akan mempengaruhi terhadap stabilitas pada *Hull-FPU*. Tinggi *Jetty/dermaga* tempat *loadout ITM* mesti diperhitungkan dengan cermat, begitu juga dengan perhitungan jumlah beban yang dibutuhkan *Hull-FPU* agar saratnya sama dengan tinggi *dermaga*, sehingga pengaturan pengisian volume tanki ballast *Hull-FPU* diperlukan sebelum *ITM* berada di atas *hull*. Ketika *ITM* telah naik pada *Hull-FPU*, besar volume tanki ballast yang harus dikurangi untuk dapat membuat *Hull-FPU* tetap dalam sarat yang ditentukan. Sehingga ketika *ITM* bergerak dari ujung sisi *Hull-FPU* sampai ke titik tengah barge, kebutuhan volume tanki ballast yang kemudian harus disesuaikan volumenya dengan pergerakan *ITM* diatas *Hull-FPU* untuk membuat *Hull-FPU* tetap dalam posisi *even keel* harus dihitung dengan cermat.

Proses *Ballasting* ini tentunya tidak sama dengan ballast system pada umumnya. Pada saat proses *Load-Out ITM* ke atas *Hull-FPU*, *Ballast system* yang ada pada bagian *Hull-FPU* belum selesai, dan juga kapasitas pompa ballast yang terdapat dalam *Hull-FPU* tidak akan mencukupi untuk memompa air ke dalam tanki. Hal ini disebabkan jumlah air ballast yang diperlukan untuk *ballasting* sangat besar dan dalam waktu yang harus cepat dilakukan agar *hull* tetap dalam kondisi *even keel*. Sehingga



s pompa external yang diperlukan harus diperhitungkan dengan proses *Loadout ITM* berjalan dengan lancar.

Ballast memiliki peran krusial dalam menjaga kestabilan kapal selama pengosongan dan pengisian ballast tangki-tangki yang terkontrol menyesuaikan draft kapal agar sesuai dengan kondisi pasang surut na proses *skidding loadout*. Dengan pengaturan sistem ballast juga dapat mengimbangi perubahan titik berat kapal (KG) akibat

pertambahan beban dari ITM ke atas hull. Pengendalian titik berat KG dan draft yang tepat melalui penempatan ballast di tangki bawah menjadi kunci dalam menjaga GM tetap positif. Pasang surut harus diperhitungkan dalam perencanaan waktu operasi *skidding loadout* untuk mencegah over-draft. Proses Ballasting dan proses *skidding LoadOut Intergrated Topside Module* inilah yang akan menjadi tantangan berikutnya karena dalam prosesnya akan berpacu dengan waktu yaitu proses pemompaan air ballast dari luar kapal ke dalam tangki ballast yang harus dengan cepat mengisi tangki yang sudah ditentukan dan pengisian tangki ballast tersebut harus terus berjalan seiring dengan proses *skidding loadout Integrated Topside Module* berlangsung. Selain itu, dalam proses *skidding load out intergrated topside module* harus memperhatikan penyesuaian waktu pasang air laut pada jetty yard yang tidak akan berlangsung lama. Jika kondisi perairan di jetty sudah pada kondisi *Low-Tide*, maka draft yang diperlukan untuk proses *skidding LoadOut* ITM tidak akan mencukupi lagi. Dalam proses *skidding loadout Intergrated Topside Module (ITM)* tidak boleh ada yang *miss* dari perhitungan dan proses pengaturan ballast di lapangan karena akibatnya akan fatal terhadap struktur yang ada pada hull maupun pada struktur ITM topside.

Banyak penelitian yang telah dilakukan mengenai proses *loadout* ataupun metode *skidding*. Kurniashanti Dwi Prastyaningrum, 2018 mengidentifikasi dan menganalisis risiko kecelakaan kerja dalam proses *loadout* menggunakan metode *skidding*. Diar Eka Satria Prabowo, 2018 melakukan penelitian menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) untuk menentukan metode *loadout* terbaik berdasarkan beberapa kriteria, termasuk ketersediaan alat angkut dan efisiensi operasi, dengan hasil menunjukkan bahwa metode *skidding* memiliki prioritas lebih tinggi mengungguli metode *lifting* dan *dolly*. Rachmad Dwi Pradana, 2016 melakukan analisa perbandingan biaya dan waktu antara metode *skidding* dan *multiwheel* dalam proses *loadout* struktur jacket, dengan hasil menunjukkan bahwa metode *skidding* lebih ekonomis dan efisien dari metode *multiwheel*. Muh.Ilham Hidayat melakukan analisa kinerja metode *skidding* pada proses *loadout* struktur jacket platform. Muh. Delfriawan, 2022 melakukan analisis ballast pada barge saat proses *loadout* Topside platform menggunakan metode simulasi Software.

Oleh karena itu, dengan adanya proses *skidding load-out Intergrated Topside Module* ke atas hull, maka penelitian ini memusatkan perhatian pada "Analisis Pengendalian Titik Berat dan Sarat Kapal Dalam Proses *Skidding LoadOut Intergrated Topside Module* pada Stabilitas *Floating Production Unit North*".

1.1 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan sebelumnya, maka rumusan masalah pada penelitian ini yaitu :



1. Bagaimana pengendalian titik B, G dan Sarat Kapal dalam proses *skidding loadout Intergrated Topside Module* pada FPU NN?

2. Bagaimana penyesuaian waktu pasang air laut yang tepat untuk mengantisipasi kegagalan dalam proses *skidding load-out Intergrated Topside Module* ke atas hull?

3. Bagaimana perbandingan biaya dan waktu antara proses *skidding loadout Intergrated Topside Module* dengan metode lain?
4. Bagaimana penentuan tinggi kedalaman *jetty yard*?

1.2 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah, maka penulis membatasi masalah pada :

1. Analisa dilakukan pada proses Ballasting saat Skidding Load Out Intergrated Topside Module ke atas hull berlangsung.
2. Analisa dilakukan pada kondisi *high tide* dan *low tide*.
3. Perhitungan dilakukan dengan bantuan software GHS.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menentukan pola hubungan koordinat G, B dan Sarat Kapal agar proses Skidding Loadout Intergrated Topside Module (ITM) berjalan stabil.
2. Menemukan konsep solusi yang tepat yaitu mendapatkan data perhitungan ballasting, mengetahui pola tahapan proses ballasting yang aman saat proses skidding load-out Intergrated Topside Module (ITM) berlangsung.
3. Mendapatkan data perhitungan tinggi kedalaman jetty yard yang aman saat proses skidding loadout berlangsung, sehingga dapat memilih shipyard mana yang bisa menjadi tempat pelaksanaan proses skidding Load-Out Topside ke hull FPU GN.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian Tesis ini adalah:

1. Bagi akademik :

Sebagai bahan referensi untuk penelitian selanjutnya dan pemahaman mengenai "Analisis pengendalian titik berat dan sarat kapal dalam proses *skidding loadout Integrated Topside Module (ITM) pada FPU GN*" bagi generasi-generasi teknik perkapalan yang akan datang dalam pembuatan dan penyusunan Tesis.

2. Bagi perusahaan :

Memberikan kontribusi sebagai informasi kepada pihak perusahaan mengenai kondisi pola tahapan ballasting yang dianggap aman pada proses skidding load-out topside ke hull berlangsung.

1.5 Novelty (Kebaruan)

Kebaruan dalam penelitian ini dapat dilihat dalam beberapa aspek :

1. ITM sebagai Beban Terintegrasi, Bukan Komponen Terpisah

Penelitian ini memandang *Integrated Topside Module (ITM)* sebagai satu kesatuan beban terintegrasi yang memiliki distribusi berat, titik berat, dan karakteristik struktur yang kompleks. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang menganalisis topside dalam bentuk beberapa modul terpisah. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih realistis terhadap respons stabilitas FPU selama proses loadout, karena seluruh efek momen berat dan pergeseran titik secara simultan.



Stabilitas dilakukan terhadap ITM sebagai sistem terintegrasi, aksi antara massa besar, elevasi tinggi, dan posisi longitudinal-it dievaluasi secara menyeluruh.

2. Skidding sebagai Proses Transfer Beban Bertahap dan Kontinu

Penelitian ini memperlakukan metode skidding loadout bukan hanya sebagai metode pemindahan struktur, tetapi sebagai proses transfer beban bertahap dan kontinu yang memengaruhi stabilitas kapal pada setiap posisi ITM. Pendekatan ini berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya meninjau kondisi awal dan akhir saja.

Kebaruan:

Setiap tahapan skidding dianalisis secara detail untuk mengamati perubahan KG, LCG, TCG, draft, dan parameter hidrostatik lainnya, sehingga dinamika stabilitas selama proses berlangsung dapat dipahami secara lebih mendalam.

3. Integrasi Konsep ITM dan Skidding dalam Analisis Stabilitas

Penelitian ini mengintegrasikan konsep ITM sebagai beban terpusat berukuran besar dengan karakteristik skidding sebagai pergerakan beban horizontal. Kombinasi kedua konsep ini menghasilkan pola perubahan stabilitas yang unik, khususnya pada FPU yang beroperasi di dermaga.

Kebaruan:

Belum banyak penelitian yang mengkaji pengaruh simultan beban ITM yang besar dan proses skidding horizontal terhadap perubahan titik berat dan sarat kapal secara terintegrasi.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan penelitian ini disusun dalam kerangka penyajian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi pengantar yang memuat garis-garis besar pembahasan bab-bab selanjutnya, meliputi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian.

BAB II METODE PENELITIAN

Bab ini berisi lokasi penelitian, metode pengumpulan dan sumber data, pengumpulan data dan diagram alur penelitian.

BAB III HASIL PENELITIAN

Bab ini berisi hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB IV PEMBAHASAN



Bab ini berisi pembahasan mengenai masalah yang ada, yakni proses skidding load-out integrated topside module ke hull FPU modelan geometri FPU pada software. Seluruh hasil perhitungan dan dikaji hingga menghasilkan kesimpulan untuk menjawab ini.

BAB V KESIMPULAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan pembahasan.



Optimized using
trial version
www.balesio.com

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk penelitian analisis kasus bersifat analisis perancangan, yang menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, penafsiran terhadap data tersebut, serta menampilkan “Analisis Pengendalian Titik Berat dan Sarat Kapal Dalam Proses Skidding LoadOut Intergrated Topside Module pada FPU GN”.

2.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Saipem Shipyard Tanjung Balai Karimun dan Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa dengan waktu penelitian dilaksanakan dari bulan Agustus 2024 hingga bulan November 2024.

2.3 Bahan dan Alat

Pada penelitian ini digunakan peralatan dan *software* dalam membantu keberlangsungan penelitian, peralatan dan *software* tersebut adalah sebagai berikut

1. Komputer/Laptop

Penelitian ini menggunakan komputer sebagai alat utama, yang selain membuat laporan juga berfungsi sebagai alat untuk menjalankan program aplikasi yang digunakan untuk menggambar model dan menganalisis data penelitian.

2. *Software GHS*

Software GHS digunakan untuk pemodelan, analisis hidrostatis dan simulasi stabilitas. Data konstruksi yang di input ke dalam *software GHS* dapat menjadi sebuah model kapal. Data Berat dan titik berat digunakan dalam menganalisis stabilitas, proses ballasting dalam penelitian ini.

2.4 Metode Penelitian

2.4.1 Penyajian Data

Penelitian ini menggunakan data FPU North yang terdiri dari data ukuran utama, berat dan titik berat *hull* dan *Intergrated Topside Module (ITM)*.

A. Hull



memiliki bentuk hull seperti Barge, dengan ukuran utama sebagai

: 200 m
: 46 m
: 15 m

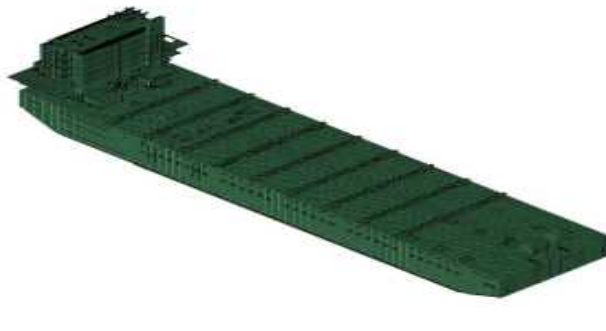
Data berat dan titik berat *Hull* diperoleh dari hasil perhitungan Departemen Engineering yang dirangkum ke dalam sebuah *Weight Control Report*. Berat dan titik berat hull dapat dilihat pada Tabel 2.1 :

Tabel 2.1 Berat dan Titik Berat Hull

Berat (Ton)	Titik Berat Hull (Barge)		
	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
37716,70	84,51	0,35 (S)	10,630

(Sumber: Hasil Olahan Departemen Engineering, 2024)

Dengan catatan bahwa berat hull ini belum termasuk item yang belum terpasang, air ballast dan peralatan pendukung proses load out dan ITM. Bentuk hull FPU North sebagai barge pada umumnya dengan bangunan atas pada bagian buritan seperti Gambar 2.1 :



Gambar 2.1 Bentuk Hull FPU North

(Sumber : Hasil Olahan Departemen Engineering, 2024)

B. Intergrated Toside Module (ITM)

Intergrated Topside Module (ITM) memiliki ukuran utama sebagai berikut :



: 124,2 m
 : 42 m
 : 23,5 m

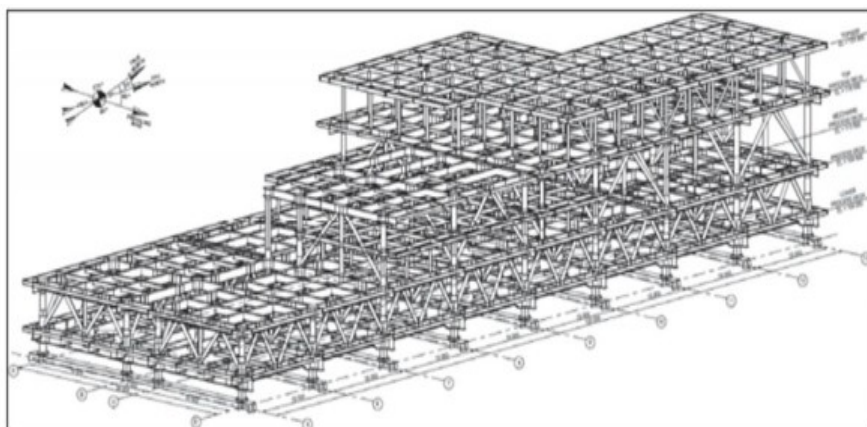
sebuah *Weight Control Report*. Struktur ITM tidak simetris, struktur pada bagian startboard lebih banyak. Berat dan titik berat ITM dapat dilihat pada Tabel 2.2 :

Tabel 2.2 Berat dan Titik Berat Intergrated Topside Module ITM)

Berat (Ton)	Titik Berat Intergrated Topside Module (ITM)		
	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
15462,45	100,547	0,500 (P)	12,263

*Hasil Olahan Departemen
(Sumber: Engineering, 2024)*

Bentuk dari struktur Intergrated Topside Module dapat dilihat pada Gambar 2.2 :



Gambar 2.2 Struktur Intergrated Topside Module (ITM)
(Sumber : Hasil Olahan Departemen Engineering, 2024)

2.4.2 Analisa Data

Adapun langkah – langkah yang akan dilakukan pada proses analisis ini adalah sebagai berikut:



Penelitian dilakukan dengan pengumpulan data awal dari berbagai jurnal ilmiah, buku, literatur, web resmi, serta industri yang berkaitan dengan tema penelitian, serta mencari data FPU dan Intergrated Topside Module yang akan diteliti.

Melakukan studi literatur dan diskusi dengan engineer departemen terkait metode pengaturan, perhitungan Volume *Ballast*, dan penentuan kapasitas pompa pada proses *Loadout* dengan metode *skidding*.

Sistem ballast diperlukan untuk mengendalikan nilai titik berat KG agar stabilitas barge selama proses *skidding loadout* tetap stabil, mengontrol *trim* dan *list* akibat pergeseran beban ITM, menjaga posisi *barge deck* tetap sejajar dengan *quayside* atau *skidway*, mengompensasi beban ITM yang masuk secara bertahap.

Menurut standar DNV (DNVGL-ST-N001, DNV-OS-H201/H202) bahwa ballast system harus mampu mengatasi perubahan draft yang terjadi akibat perubahan beban dan pasang surut laut dalam waktu aman, ballast sistem harus dilakukan simultan dan terkontrol pada beberapa tanki untuk menjaga kestabilan *trim* dan *list*.

3. Tahapan Ketiga

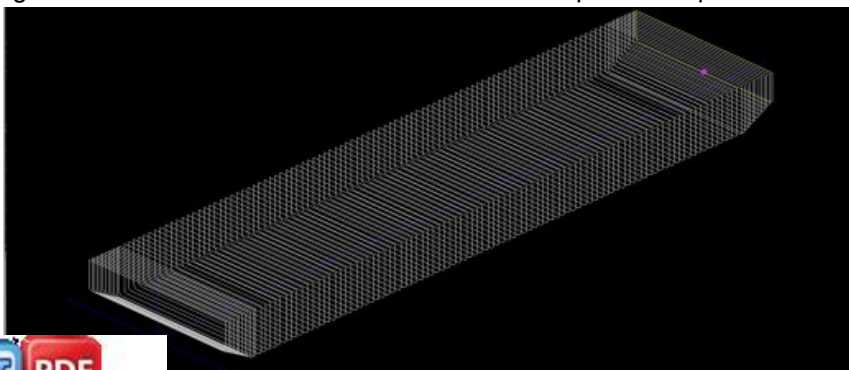
Melakukan studi literatur dan diskusi engineer departemen terkait metode pengendalian titik berat dan sarat kapal pada proses *skidding loadout ITM*. Data diambil dari industri terkait maupun dari sumber lainnya berupa :

- a. Mengidentifikasi beban yang bekerja pada proses *skidding loadout ITM*
- b. Mengidentifikasi sistem ballasting yang bekerja saat proses *skidding loadout ITM*
- c. Mengidentifikasi kondisi perairan di sekitar jetty Saipem yard sebagai lokasi pelaksanaan *skidding loadout ITM*.

4. Tahapan Keempat

Setelah melakukan studi literatur terkait metode pengendalian titik berat dan sarat kapal pada proses *skidding loadout ITM* menggunakan GHS software, dilanjutkan dengan pengolahan data berupa:

- a. Pemodelan hull FPU North menggunakan GHS Software. Pemodelan dilakukan dengan penginputan data ordinat dari gambar Lines plan menggunakan bahasa program GHS Software. Bentuk hull FPU North dapat dilihat pada Gambar 2.3



Pemodelan Hull FPU North menggunakan GHS Software



Posisi tangki pada hull FPU North menggunakan GHS Software. Pemodelan dilakukan dengan penginputan data ordinat dan posisi tangki-tangki

berdasarkan gambar General Arrangement dan Construction Profile menggunakan bahasa program GHS Software.

- c. Penginputan data berat dan lokasi titik berat (LCG, TCG, VCG) *hull* dan *Integrated Topside Module (ITM)* menggunakan bahasa program GHS software.

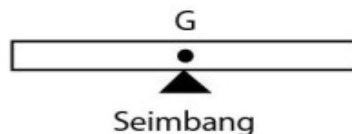
5. Tahapan Kelima

Melakukan simulasi pengendalian titik berat dan sarat kapal pada proses *skidding loadout ITM* ke atas hull FPU menggunakan GHS software.

Pada tahap ini, setiap pergeseran beban ITM ke atas hull pada proses *skidding loadout* akan menyebabkan pergeseran titik berat sehingga perlu diperhatikan kondisi trim dan list agar stabilitas kapal tetap dalam kondisi aman. Titik berat (center of gravity) dikenal dengan titik G dari sebuah kapal, merupakan titik tangkap dari semua gaya-gaya yang menekan ke bawah terhadap kapal. Letak titik G ini di kapal dapat diketahui dengan meninjau semua pembagian bobot di kapal, makin banyak bobot yang diletakkan di bagian atas maka makin tinggilah letak titik G nya. Secara definisi titik berat (G) ialah titik tangkap dari semua gaya – gaya yang bekerja ke bawah. Letak titik G pada kapal kosong ditentukan oleh hasil percobaan stabilitas. Perlu diketahui bahwa, titik G kapal sangat bergantung pada penempatan beban pada kapal. Jadi selama tidak ada berat yang di geser, titik G tidak akan berubah walaupun kapal oleng atau mengangguk.

Dalam kondisi kapal terapung, lokasi titik G diketahui, tetapi dengan proses pemuatan *skidding*, beban modul ITM akan dinaikkan ke *main deck FPU*. Hal ini akan menyebabkan lokasi titik G berubah, sehingga perlu diketahui lokasi titik G di akhir proses *skidding*.

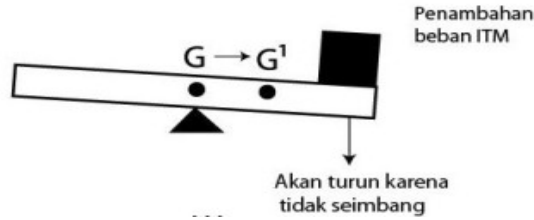
Jika kapal diibaratkan sebagai timbangan dengan titik tumpu di titik G, maka ilustrasinya ditunjukkan pada Gambar 2.4:



Gambar 2.4 Ilustrasi Titik G Kapal sebagai Titik Tumpu pada Timbangan Balok

Bila sebuah balok homogen mempunyai berat W , maka letak titik beratnya (G) adalah pada titik tengahnya, sehingga apabila sebuah tuas diberikan pada titik beratnya, maka balok tersebut akan berada dalam keadaan setimbang.

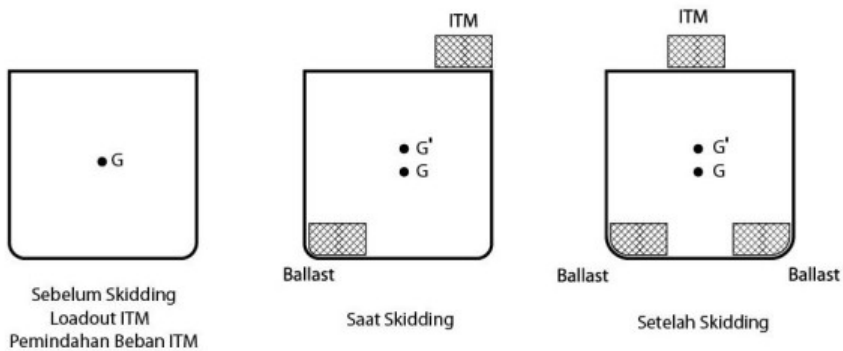




Gambar 2.5 Ilustrasi Pergeseran Lokasi Titik G Setelah Beban Tambahan W diberikan pada Salah Satu Sisi Timbangan Balok

Jika timbangan balok diberi beban tambahan sebesar "W" dengan jarak "d" pada salah satu sisinya, posisi timbangan balok akan menjadi tidak seimbang sehingga sisi yang diberi beban tambahan akan turun dan sisi lainnya akan naik. Hal ini terjadi karena pusat gravitasi balok (G) bergeser ke (G') lebih dekat ke sisi yang diberi beban tambahan akibat momen dari bagian yang ditambahkan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.

Hal ini juga berlaku untuk kapal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6:



Gambar 2.6 Ilustrasi Letak Titik G Bergeser Setelah Beban Tambahan Modul ITM Diterapkan pada Satu Sisi Kapal

Jika kapal dalam kondisi kapal kosong, pusat gravitasi "G" terletak di tengah. Ketika terdapat beban tambahan modul ITM di atas *main deck*, pusat gravitasi (G) bergeser ke (G') dan bergerak ke atas mendekati sisi tempat modul ITM ditambahkan di *main deck* kapal.



baru ditambahkan ke kapal, total pusat gravitasi sistem akan roses *loadout* terutama ketika memindahkan modul besar seperti \approx *Module* ke atas *main deck* kapal atau barge, penting untuk pergeseran titik berat (center of gravity shift) karena hal ini ung terhadap stabilitas kapal.

Berikut adalah rumus dan penjelasan untuk menghitung pergeseran titik berat kapal saat proses loadout.

a. Rumus Pergeseran Titik Berat

Jika beban baru ditambahkan ke kapal, maka titik berat total sistem akan bergeser. Pergeseran ini dapat dihitung dengan menggunakan Rumus Momen Gaya sebagai berikut:

$$GG_x = \frac{w \cdot d_x}{W + w} \quad (1)$$

Keterangan:

GG_x = Pergeseran titik berat kapal (dalam meter)

W = Berat kapal sebelum loadout (ton)

w = Berat modul atau beban yang dimuat ke kapal (ton)

dx = Jarak antara titik berat beban yang ditambahkan dan titik berat kapal semula (meter), x merupakan arah pergeseran (bisa x , y , z sesuai sistem koordinat)

Ketika modul berat dimuat ke atas kapal, pusat gravitasi sistem berubah karena massa total dan distribusi berat berubah. Pergeseran titik berat bergantung langsung pada besarnya beban dan jaraknya dari pusat berat kapal.

Jika modul diletakkan tepat di atas pusat gravitasi kapal, maka tidak terjadi pergeseran horizontal, hanya perubahan ketinggian titik berat (vertikal).

Selama proses skidding loadout, berat bertambah secara bertahap dan simultan sehingga perlu dilakukan pemantauan pergeseran secara dinamis.

b. Kontrol Titik Berat (LCG, TCG, KG) pada Proses Skidding Loadout

Dalam proses pemuatan skidding, pergerakan modul ITM menyebabkan perubahan distribusi berat pada FPU, sehingga mengubah pusat gravitasi longitudinal (LCG), pusat gravitasi transversal (TCG), dan pusat gravitasi vertikal (KG). Perubahan pusat gravitasi sangat menentukan nilai GM, yang merupakan parameter utama stabilitas awal kapal.

Ketika modul ITM mulai digeser ke atas main deck FPU, berat total kapal berubah dan pusat gravitasi gabungan (G) bergeser.

Rumus Perhitungan Titik Berat Gabungan:



apat 3 massa: lambung kapal, modul ITM dan ballast, maka:

$$\frac{G_{Hull} + W_{ITM} \times KG_{ITM} + W_{Ballast} \times KG_{Ballast} + W_{Aux} \times KG_{Aux} + W_{Ramps} \times KG_{Ramps}}{W_{Hull} + W_{ITM} + W_{Ballast} + W_{Aux} + W_{Ramps}} \quad (2)$$

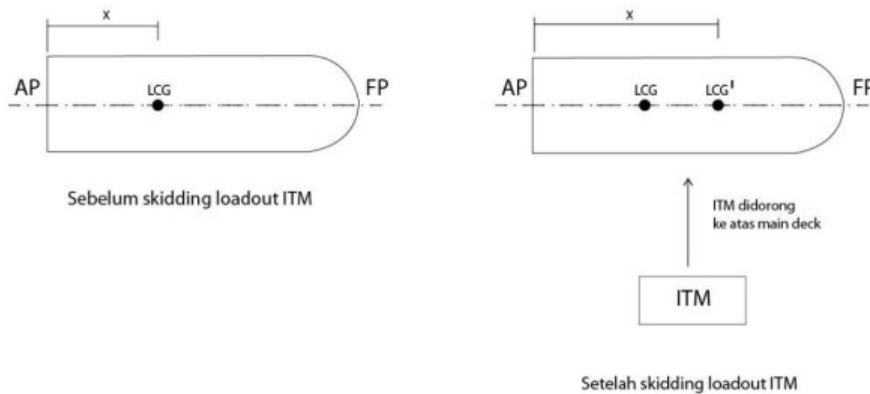
$$LCG_{Total} = \frac{W_{Hull} \times LCG_{Hull} + W_{ITM} \times LCG_{ITM} + W_{Ballast} \times LCG_{Ballast} + W_{Aux} \times LCG_{Aux} + W_{Ramps} \times LCG_{Ramps}}{W_{Hull} + W_{ITM} + W_{Ballast} + W_{Aux} + W_{Ramps}} \quad (3)$$

$$TCG_{Total} = \frac{W_{Hull} \times TCG_{Hull} + W_{ITM} \times TCG_{ITM} + W_{Ballast} \times TCG_{Ballast} + W_{Aux} \times TCG_{Aux} + W_{Ramps} \times TCG_{Ramps}}{W_{Hull} + W_{ITM} + W_{Ballast} + W_{Aux} + W_{Ramps}} \quad (4)$$

Saat modul ITM bergerak di sepanjang jalur skidding, nilai LCG₂ berubah terus-menerus, menyebabkan titik berat gabungan bergeser. Hal ini menjadi salah satu alasan mengapa pemuatan dikategorikan sebagai operasi kritis (Chakrabarti, 2005).

c. Pergeseran Beban ITM Selama Proses *Skidding Loadout*

Ketika ITM bergeser secara horizontal di atas lambung kapal, total pusat titik berat (LCG_{total}) kapal + ITM akan berubah secara dinamis karena titik berat LCG modul ITM bergerak relatif ke bagian *midship* kapal.



Gambar 2.7 Ilustrasi Letak Titik Berat LCG Setelah Penambahan Modul ITM di atas Main Deck Selama Proses *Skidding Loadout*

Gambar 2.7 menunjukkan perubahan posisi LCG sebelum dan sesudah modul ITM didorong ke atas *main deck*. Setelah modul ITM dinaikkan ke *main deck*, posisi titik berat LCG akan bergeser ke LCG¹, menjauh dari posisi LCG awal dan mendekati lokasi modul ITM yang ditempatkan di *main deck*.

Rumus perubahan letak titik berat LCG akibat pergeseran beban dapat ditunjukkan pada persamaan (5):

$$\Delta LCG = \frac{W_{ITM} \times \Delta x}{W_{Total}} \quad (5)$$



at modul ITM (ton)

ak perpindahan modul ITM secara longitudinal dari posisi awal (m)

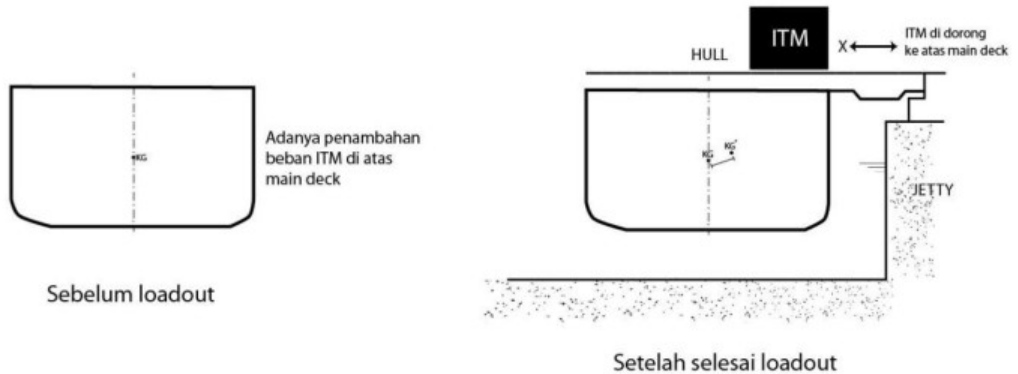
W_{Total} : Total berat kapal + module ITM +Ballast + ramps + auxiliary (ton)

Artinya:

Semakin berat modul ITM dan semakin jauh dari *midship*, semakin besar pergeseran titik berat total kapal. Efek ini harus dikompensasi dengan sistem *ballast* untuk menjaga keseimbangan *trim* (selisih antara *draft* depan dan belakang).

d. Pergeseran Titik Berat Vertikal (KG) Saat Beban ITM Ditempatkan di atas *Main Deck*

Saat beban ITM berada di atas dek, secara otomatis akan meningkatkan titik berat vertikal KG kapal (karena bobot ditambahkan pada posisi yang lebih tinggi).



Gambar 2.8 Ilustrasi Letak Pergeseran Titik Berat Vertikal (KG) Setelah Penambahan Modul ITM di atas Main Deck Selama Skidding Loadout

Gambar 2.8 menunjukkan perubahan posisi titik berat vertikal KG sebelum dan sesudah modul ITM didorong ke atas *main deck*. Setelah modul ITM dinaikkan ke atas *main deck*, posisi KG akan bergeser ke KG' , menjauh dari posisi KG awal dan mendekati lokasi modul ITM yang ditempatkan di *main deck*.

Rumus Titik Berat Vertikal (KG):

$$KG_{Total} = \frac{W_{Hull} \times KG_{Hull} + W_{ITM} \times KG_{ITM} + W_{Ballast} \times KG_{Ballast} + W_{Aux} \times KG_{Aux} + W_{Ramps} \times KG_{Ramps}}{W_{Hull} + W_{ITM} + W_{Ballast} + W_{Aux} + W_{Ramps}}$$



at kapal (*barge*)
 : Berat Vertikal Kapal
 at Modul ITM

- KG_{ITM} : Titik Berat Vertikal ITM
 $W_{Ballast}$: Berat Ballast
 $KG_{Ballast}$: Titik berat Vertikal Ballast
 W_{Aux} : Berat Auxiliary
 KG_{Aux} : Titik Berat Vertikal item Auxiliary
 W_{Ramps} : Berat Item Ramps
 KG_{Ramps} : Titik Berat Vertikal Ramps

Jika titik berat vertikal naik dari posisi awalnya, hal ini dapat mengurangi GM (stabilitas metasentrik).

Oleh karena itu, diperlukan penambahan air *ballast* di bagian *double bottom* untuk mengurangi nilai KG.

e. Pergeseran Titik Berat Transversal (TCG)

Jika terjadi ketidakseimbangan selama *loadout* (misalnya, ITM sedikit miring saat *skidding*), maka terjadi pergeseran transversal.

Rumusnya:

$$\Delta TCG = \frac{W_{ITM} + \Delta y}{W_{Total}} \quad (6)$$

Di mana:

- W_{ITM} : Berat modul ITM (ton)
 Δy : Jarak perpindahan beban ITM dari posisi awal ke *midship* (m)
 W_{Total} : Berat total kapal + modul ITM + Ballast + Auxiliary + Ramps (ton)
 TCG : Titik berat transversal, diukur dari garis tengah

Hal ini menunjukkan kapal terjadi miring di salah satu sisi (*list*), yang kemudian dikoreksi dengan transfer *ballast* kiri-kanan.

6. Tahapan Keenam

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap setiap tahapan *skidding loadout ITM*, yang meliputi :

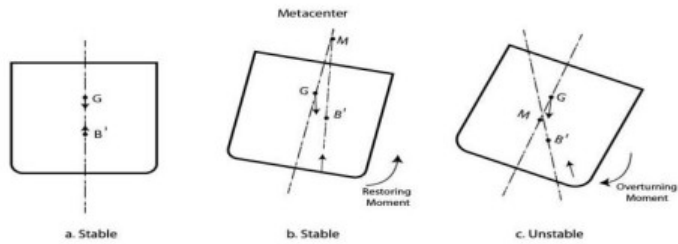
- a. Bagaimana pengaruh pergeseran beban ITM ke atas hull terhadap perubahan letak titik berat KG, KB, dan Sarat Kapal.



a. Pergeseran Beban ITM dan Stabilitas (GM):

Stabilitas kapal dinilai berdasarkan tinggi metasentriknya (GM). Semakin rendah GM, yang berarti stabilitas menurun.

Keseimbangan atau kondisi ekuilibrium terbagi menjadi 3 jenis, yaitu keseimbangan stabil, keseimbangan netral, dan keseimbangan tidak stabil. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.9 :



Gambar 2.9 Stabilitas Struktur Terapung
(Sumber : chegg.com, 2020)

Untuk kondisi sudut putar yang kecil pada struktur terapung, besar jarak antara titik pusat gaya gravitasi dengan titik metasentris (GM) dan jarak antara titik pusat gaya apung dengan titik metasentris (BM) secara berturut-turut ditunjukkan pada persamaan (7) dan (8). (Journée & Massie, 2001: 54 & 57).

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (7)$$

$$\overline{BM} = \frac{I}{\nabla} \quad (8)$$

Dimana:

\overline{GM} = Jarak titik pusat gravitasi ke titik metasentris [m]

\overline{KB} = Jarak dasar struktur (keel) ke titik metasentris [m]

\overline{BM} = Jarak titik pusat gaya apung ke titik metasentris [m]

\overline{KG} = Jarak dasar struktur (keel) ke titik pusat gravitasi [m]

I = Momen inersia dari bidang air [m⁴]

∇ = Volume struktur terapung yang terendam air laut [m³]

Tinggi metasentra dihitung:

$$\overline{MG} = \overline{KM} - \overline{KG} \quad (9)$$

Dimana:



Metasentra relatif terhadap keel (dipengaruhi oleh bentuk lambung)

Metasentra vertikal gabungan

Penambahan KG akibat *ballast* akan meningkatkan GM. Namun, peningkatan draft, sehingga diperlukan keseimbangan.

b. Bagaimana mekanisme proses Ballasting dalam mengendalikan letak titik berat KG, KB, dan sarat kapal agar tetap dalam kondisi aman.

1. Pengaturan Ballast Selama Pemuatan:

Ballast digunakan untuk menjaga keselarasan antara *deck barge* dan dermaga, meminimalisir terjadinya *trim*, TCG mendekati nol (*no list*). Pengaturan *ballast* harus dinamis agar dapat mengikuti pergerakan modul ITM.

Rumus untuk perubahan *draft* akibat *ballast*:

Jika air ballast ditambahkan sebesar ΔW_b :

$$\Delta T = \frac{\Delta W_b}{TPC} \quad (10)$$

Dimana:

TPC = Ton Per Sentimeter Perendaman

2. Trim dan Momen Longitudinal:

Perpindahan modul menghasilkan momen longitudinal:

$$ML = W_2 \times (LCG_2 - LCG_{Midship}) \quad (11)$$

Trim dihitung menggunakan rumus :

$$Trim = \frac{ML}{MTC} \quad (12)$$

Dimana :

MTC = Moment untuk mengubah trim 1 cm

c. Bagaimana peran sistem ballasting dalam mengantisipasi fluktuasi pasang surut.

7. Tahapan Ketujuh

Tahapan akhir pada penelitian ini adalah membuat kesimpulan terhadap proses ballasting pada tiap tahapan *loadoutnya* dalam mengendalikan pergeseran letak titik berat KG, KB, dan perubahan sarat dalam menjaga kestabilan kapal dalam kondisi aman. Ketika pengecekan analisa ballasting dinyatakan aman dan berhasil maka tahapan selanjutnya adalah memaparkan dan merangkum setiap hasil dalam bentuk tabel ataupun grafik. Hasil yang telah diperoleh kemudian disimpulkan dan dibuat saran untuk penelitian selanjutnya



Penelitian

ra ringkas, diagram alur penelitian ini dapat digambarkan dalam g terlihat pada Gambar 2.10 sebagai berikut.

