

ANALISIS TRANSPORTASI STRUKTUR BANGUNAN ATAS ANJUNGAN LEPAS PANTAI

Offshore Platform's Topside Transportation Analysis

Gene Adhiyasa¹ dan Prof. Ricky Lukman Tawekal, Ph. D²
Program Studi Sarjana Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Email : geneadhiyasa@students.itb.ac.id

PENDAHULUAN

Untuk mendukung kegiatan eksploitasi gas bumi di area Kepodang Field diperlukan infrastruktur anjungan lepas pantai. Proses pembangunan anjungan lepas pantai tidak dilakukan di laut, namun di fasilitas fabrikasi di area pesisir. Setelah proses pembangunan selesai, struktur akan dimobilisasi ke lokasi di laut menggunakan *barge* yang ditarik dengan menggunakan *tug boat*. Struktur anjungan yang diletakkan di atas *barge* akan mendapatkan beban-beban luar seperti beban gelombang dan beban angin. Beban tersebut menyebabkan pergerakan *barge* dan mengganggu kestabilan *barge*. Hal ini dapat berdampak pada kerusakan struktur, bahkan tenggelam. Maka struktur anjungan harus diperkuat dengan struktur pendukung yang biasa disebut *sea fastening*. Untuk mencegah kegagalan tersebut, dilakukan analisis pada struktur anjungan dan *barge*, serta desain *sea fastening*. Aspek yang dianalisis berupa stabilitas,, respon gerak *barge*, kekuatan struktur kargo, kekuatan struktur pendukung, dan peralatan *towing*. Kegiatan transportasi struktur ini termasuk pada kegiatan operasi kelautan yang harus memenuhi kriteria standar yaitu Noble Denton 0030, *Guideline for Marine Transportation* dan ISO 19901:6 – Marine Operation.

Sebagai struktur yang akan digunakan sepanjang masa layannya, struktur tersebut juga harus memenuhi standar kriteria internasional, salah satunya API RP2A - WSD. Berdasarkan kriteria standar ini, struktur anjungan lepas pantai harus kuat menahan beban – beban lingkungan, diantaranya gelombang, arus, dan angin. Selain itu, struktur juga harus bisa menahan beban struktur sendiri dan beban kebutuhan di atasnya. Prosedur tersebut dirangkum dalam tahap analisis *inplace*. Analisis

¹ Mahasiswa Tugas Akhir

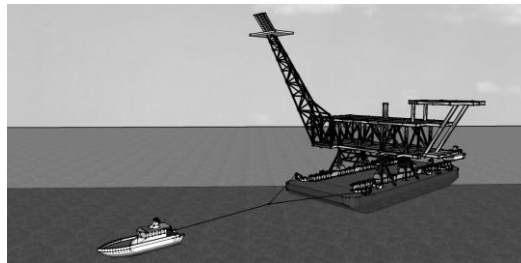
² Dosen Pembimbing Tugas Akhir

seismik juga dilakukan untuk mengetahui kekuatan struktur terhadap beban gempa, serta analisis *fatigue* yang bertujuan mengetahui umur layan struktur akibat beban gelombang yang bersifat siklik.

TEORI DAN METODOLOGI

Analisis Transportasi

Pada pengerjaan tugas akhir ini, analisis dilakukan pada kasus transportasi struktur bangunan atas atau *topside* yang ditunjukkan pada **Gambar 1** sebagai ilustrasi.

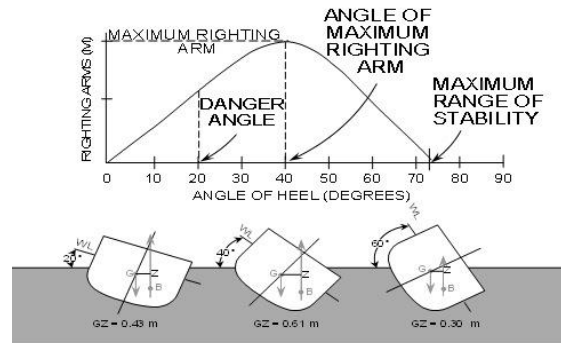


Gambar 1 Ilustrasi Transportasi *Topside*

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses transportasi bangunan ini diantaranya :

- Kondisi lingkungan yang dilewati oleh rute transportasi
- *Barge* yang digunakan untuk mengangkut *topside*
- Berat *topside*, termasuk diantaranya berat struktur itu sendiri dan peralatan pada *topside*
- *Center of Gravity* pada *topside*
- *Center of Rotation* pada *barge*

Faktor-faktor tersebut mempengaruhi gerakan *topside* dan *barge* selama di laut. Gerakan *topside* dan *barge* dipicu oleh kondisi lingkungan seperti adanya gelombang dan angin yang terkena pada struktur yang berimplikasi pada kestabilan. Stabilitas barge berkaitan dengan sudut kemiringan barge dengan *righting arm*, yang dinyatakan dengan *GZ*. *Righting arm* adalah garis tegak lurus yang merupakan jarak dari gaya berat dengan tekan air ke atas. *GZ* akan bernilai positif jika terjadi *righting moment* dan jarak titik metasentrik ke titik berat (*GM*) akan bernilai positif jika titik metasentrik di atas titik berat. Beberapa nilai dari *GZ* dapat digambarkan dalam sebuah kurva *GZ* terhadap kemiringan yang disajikan pada **Gambar 2**



Gambar 2 Kurva GZ

Kurva GZ menunjukkan hubungan antara *righting arm* (panjang lengan pembalik *barge* ke posisi semula, ditunjukkan dalam meter) dengan *angle of heel* (derajat kemiringan *barge* yang menjauhi kestabilan, ditunjukkan dalam derajat). Rentang stabilitas ditunjukkan pada nilai *maximum range of stability* yang diilustrasikan pada **Gambar 2**.

Terdapat dua jenis stabilitas yang ditinjau pada tugas akhir ini yaitu:

- Stabilitas *intact* yaitu stabilitas ketika *barge* dalam keadaan normal dan
- Stabilitas *damage* yaitu stabilitas ketika terdapat minimal satu kompartemen yang bocor

Berdasarkan kriteria GL Noble Denton 0030, sistem dinilai stabil jika memenuhi Persamaan (1)

$$\text{Rentang Stabilitas Intact} > 15 + \left(\frac{15}{GM} \right) + \theta \quad (1)$$

Dimana

GM : Jarak dari titik metasentrik ke titik berat (m)

θ : Sudut maksimum *roll* atau *pitch* yang terjadi berdasarkan data lingkungan ($^{\circ}$)

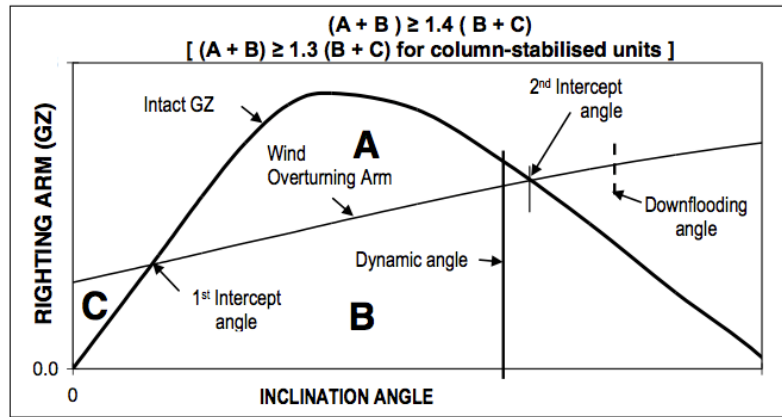
Sedangkan menurut kriteria ISO 19901:6 – Marine Operation, sistem dinilai stabil jika memenuhi persamaan (2)

$$\text{Rentang Stabilitas Intact} > 20 + 0.8 \beta \quad (2)$$

Dimana:

β : Penjumlahan dari sudut *heeling* akibat angin dan sudut *roll* dinamik ($^{\circ}$)

Selain itu terdapat kriteria kestabilan yang dipengaruhi oleh beban angin atau *wind overturning*. Pada kriteria *wind overturning*, terdapat dua buah kurva yang digunakan dalam perhitungan analisis yaitu kurva *righting moment* dan kurva *wind overturning* yang diilustrasikan pada Gambar 3

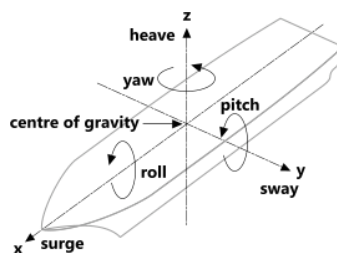


Gambar 3 Ilustrasi kriteria kurva wind overturning

Analisis transportasi juga dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan yang terjadi pada struktur *topside* maupun tegangan pada struktur pendukung ketika proses mobilisasi dari tempat fabrikasi menuju lokasi instalasi. Tegangan yang terjadi merupakan akibat dari pembebanan pada *barge* dan struktur. Beban yang berpengaruh ketika proses transportasi diantaranya adalah :

- Beban statik pada *topside* (*self-weight*)
- Beban peralatan pada *topside*
- Beban angin
- Beban inersia, akibat gerakan *barge* dan struktur pada 6 derajat kebebasan

Pada pengerjaan tugas akhir ini, nilai beban inersia didapatkan dari analisis respon gerak berdasarkan kondisi lingkungan dan kriteria standar pada Noble Denton 0030. Ilustrasi gerakan *barge* pada 6 derajat kebebasan disajikan pada Gambar 4



Gambar 4 Gerakan barge

Respon gerak pada *barge* atau amplitude struktur pada domain frekuensi, $X_p(\omega)$, didapatkan dengan menghitung nilai RAO (*Response Amplitude Operator*) pada struktur yang selanjutnya dikalikan dengan spektrum amplitude gelombang $\eta(\omega)$.

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)}$$

Sedangkan gerak *barge* dan struktur berdasarkan standar kriteria Noble Denton 0030 disajikan pada Tabel 1

Tabel 1 Kriteria standar respon gerak *barge*

<i>Dimensi Barge</i>	<i>Perioda</i>	<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Heave</i>
LoA > 140 m, B>30m	10s	20°	10°	0.2 g
LoA > 76 m, B>23m	10s	20°	12.5°	0.2 g
LoA ≤ 76 m, B≤ 23	10s	25°	15°	0.2 g

Jika nilai beban telah diketahui, maka tegangan pada struktur ketika transportasi dapat diketahui. Nilai *unity check* yang dibutuhkan pada proses transportasi tidak boleh melebihi 1.33.

Selain komponen struktur dan *barge*, komponen peralatan *towing* juga perlu dianalisis sebagai bagian dari analisis transportasi. Salah satu parameter kekuatan *towing* adalah *bollard pull*. *Bollard pull* adalah nilai kapasitas minimum *tugboat* untuk menarik kargo di belakangnya. Perhitungan nilai *bollard pull* ditunjukkan pada Persamaan (3). Nilai *minimum breaking load* pada alat yang digunakan konfigurasi *towing* juga ditentukan oleh besar nilai *bollard pull*.

$$BP = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot V^3}{120 \cdot 60} + (0.06 \cdot B \cdot D_1) \cdot K \quad (3)$$

Keterangan :

- BP: *Bollard Pull* (ton)
- Δ : *Displacement* moda pengangkut kargo atau *barge* (ton)
- V : Kecepatan *towing* (knot)
- B : Lebar moda pengangkut kargo atau *barge* (meter)
- D_1 : Tinggi moda pengangkut dan kargo yang diukur dari permukaan air (meter)
- K : Faktor desain lingkungan

K = 1 – 3 untuk perairan *exposed coastal*

$K = 0.75 - 2$ untuk perairan *sheltered coastal*

$K = 0.5 - 1.5$ untuk *protected water*

Sebelum analisis transportasi struktur dilakukan, pemeriksaan integritas struktur untuk dapat berfungsi juga dikerjakan dengan analisis *inplace*, seismik, dan *fatigue*.

Analisis *Inplace*

Analisis *inplace* merupakan analisis yang dilakukan untuk menilai kekuatan struktur saat statik. Analisis *inplace* yang dilakukan terdiri dari pemeriksaan kode elemen dan *joint punching shear* dengan syarat nilai rasio *UC (Unity Check)* tidak melebihi 1.00. Beban yang diberikan pada analisis ini berupa beban lingkungan (gelombang, angin, dan arus), beban struktur itu sendiri, beban peralatan, dan beban hidup. Untuk mendapatkan nilai yang optimum dalam kombinasi pembebanan, terdapat dua kondisi dalam analisis ini yakni kondisi operasi dan kondisi badai.

Analisis Seismik

Analisis seismik merupakan analisis struktur yang diperlukan untuk mengetahui ketahanan struktur terhadap beban dinamik gempa bumi. Terdapat dua kondisi kekuatan gempa yang ditinjau pada analisis ini yaitu *SLE (Strength Level Earthquake)* dan *DLE (Ductility Level Earthquake)*. Kondisi *SLE* mengharuskan struktur dalam kondisi elastis apabila terjadi gempa, sedangkan kondisi *DLE* memperbolehkan struktur dalam kondisi inelastis dan mengalami kerusakan tetapi tidak signifikan.

Terdapat 5 tahap yang dilakukan pada analisis seismik yaitu linearisasi tiang pancang, analisis dinamik, analisis respon beban gempa bumi, *post-processing* pemeriksaan kode elemen, dan *post-processing joint punching shear*. Nilai yang diperoleh dari analisis seismik ini adalah perioda ragam getar, faktor partisipasi massa, rasio *UC*, dan *UC joint punching shear*.

Jumlah faktor partisipasi massa pada ragam getar terakhir harus melebihi 90%. Nilai *UC* juga tidak boleh melebihi 1.00

Analisis *Fatigue*

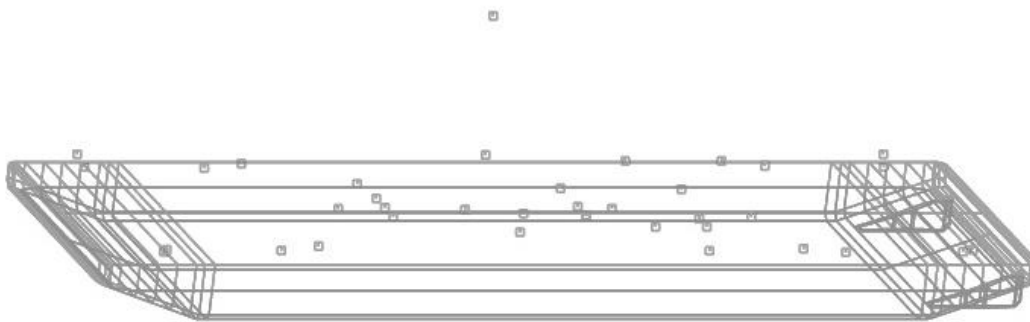
Analisis *fatigue* merupakan analisis struktur untuk mengetahui masa layannya akibat beban gelombang. Terdapat 3 jenis metode analisis *fatigue* yang umum digunakan. Ketiga metode tersebut adalah analisis

deterministic, analisis *spectral*, dan analisis *simplified*. Analisis fatigue yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini adalah analisis *deterministic*.

Dalam analisis fatigue *deterministic* diperlukan beberapa informasi sebagai input yaitu model struktur, kurva S-N, masa layan desain, batas SCF (*Stress Concentration Factor*), dan *wave scatter diagram*. Hasil dari analisis fatigue adalah nilai *damage* member dan masa layan tiap member. Syarat utama struktur yang berhasil melalui analisis fatigue adalah nilai masa layan member lebih besar dari masa layan desain, atau nilai *damage* tidak melebihi 1.0.

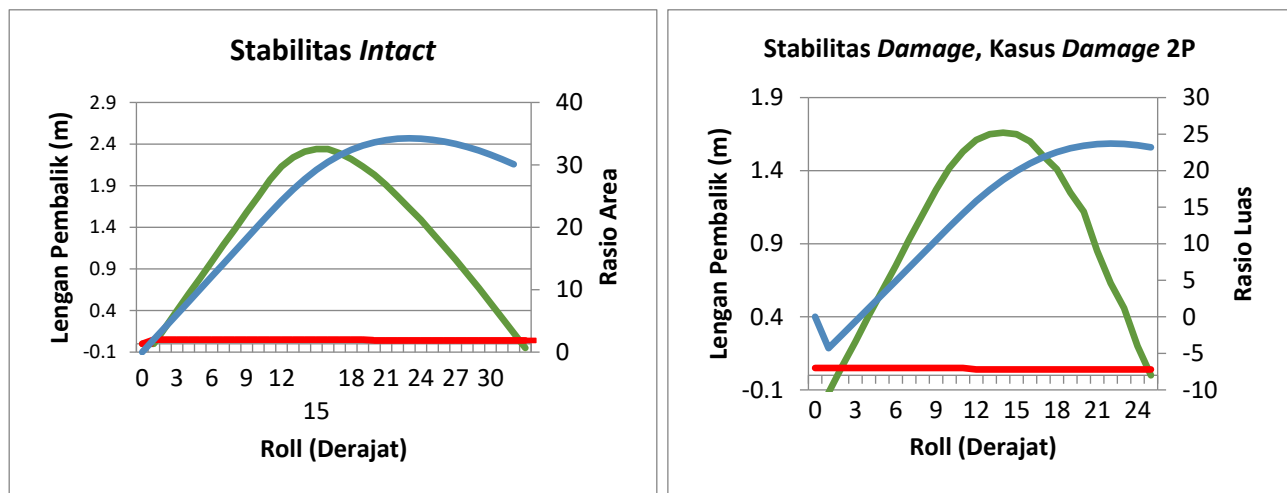
HASIL DAN ANALISIS

Berikut ini adalah ilustrasi hasil pemodelan pada *barge* dengan *Topside* dianggap sebagai beban.



Gambar 5 Pemodelan Barge

Keluaran dari model struktur ini adalah kurva GZ sebagai masukan analisis stabilitas dan RAO sebagai masukan dari analisis respon gerak yang menyebabkan beban inersia pada struktur. Berikut adalah kurva GZ pada stabilitas *intact* dan *damage*. Nilai *damage* paling besar terjadi pada kebocoran di kompartemen 2P.



Gambar 6 Kurva GZ

Pemenuhan kriteria stabilitas *intact* dan *damage* disajikan pada tabel di bawah ini :

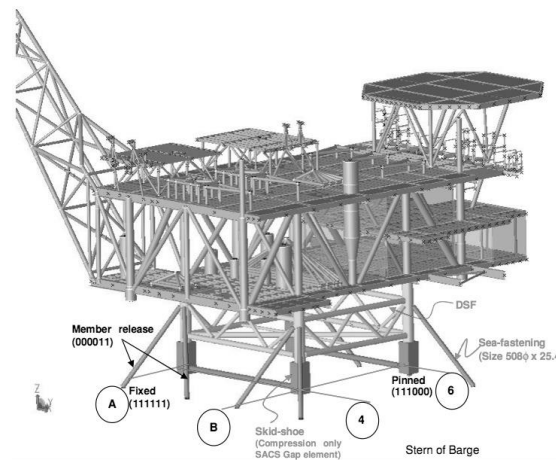
Tabel 2 Kriteria Stabilitas *Intact*

Kriteria Stabilitas Intact	Nilai	Nilai Standar	Memenuhi Kriteria
Tinggi Metasentrik Transversal (m)	11.37 m	> 1.00 m	
Rasio Area	30.9	> 1.40	
Kriteria kestabilan Noble Denton 0030,	31.52°	> 20.63°	
Kriteria kestabilan ISO 19901:6.	31.52°	>23.48°	

Tabel 3 Kriteria Stabilitas *Damage*

Kriteria Stabilitas Intact	Nilai	Nilai Standar	Memenuhi Kriteria
Tinggi Metasentrik Transversal (m)	8.65 m	> 1.00 m	
Rasio Area	23.2	> 1.40	
Kriteria kestabilan Noble Denton 0030,	24.78°	> 18.85°	
Kriteria kestabilan ISO 19901:6.	24.78°	>21.73°	

Pada Gambar 7 berikut ini adalah ilustrasi hasil pemodelan pada *Topside* ketika proses transportasi.



Gambar 7 Model *Topside* ketika Transportasi

Dari hasil analisis diperoleh nilai maksimum *Unity Check* (UC) pada grup member DS1 sebesar 0.47. Nilai UC menyatakan perbandingan antara tegangan yang terjadi dengan tegangan yang diizinkan. Syarat utama untuk analisis transportasi adalah nilai maks. UC adalah 1, dengan *allowable modified* UC sebesar 1.3 untuk semua elemen struktur. Analisis *joint punching shear* hanya dilakukan pada *joint* di lokasi struktur penyangga vertikal dan *seafastening* yang berbentuk tubular. Dari hasil analisis *joint punching shear* diperoleh UC maksimum pada common joint DS33 sebesar 0.401.

Untuk analisis peralatan towing, kapasitas minimal yang dibutuhkan *tugboat* untuk menarik kargo adalah 106.90 MT. Sehingga nilai *minimum breaking load* pada peralatan towing adalah

Komponen	Kriteria	Nilai MBL
Wire Rope (Bollard Pull > 90 ton)	2 x BP	213.8 MT
Shackles	MBL > BP	> 106.90 MT
Open link chain dan studded link chain	3 x BP	320.7 MT
Triangular Plate	3 x BP	320.7 MT
Fairlead & Shim bracket	MBL > MBL Chain, Shackle, dan Wire rope	>320.7 MT

Dari hasil analisis inplace untuk kondisi operasi diperoleh nilai maksimum Unity Check (UC) pada grup member P46 sebesar 0.73. Untuk kondisi ekstrim diperoleh nilai maksimum UC pada grup member W10 sebesar 0.73. UC maksimum *joint punching shear* yang diperoleh pada kondisi operasi pada common joint B1JA sebesar 0.632. Pada kondisi ekstrim diperoleh nilai UC maksimum pada common joint B1JA sebesar 0.559.

Dari hasil analisis seismik, untuk kondisi SLE, nilai rasio UC maksimum adalah 0.75. Sedangkan untuk kondisi DLE, nilai rasio UC maksimum adalah 0.73. Untuk kondisi SLE dan DLE, nilai rasio UC maksimum pada analisis *joint punching shear* adalah 0.283 pada common joint B5J8.

Dari hasil analisis *fatigue*, masa layan struktur selama dua puluh tahun terpenuhi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Nilai UC member maksimum pada kondisi operasional adalah sebesar 0.91 dan kondisi badai adalah sebesar 0.81 sedangkan UC joint maksimum kondisi operasional sebesar 0.98 dan kondisi badai sebesar 0.559 sehingga struktur memenuhi kategori aman pada analisis inplace. Untuk analisis seismic, nilai UC terbesar adalah 0.75 pada analisis seismik kondisi DLE dan 0.72 pada kondisi SLE dengan nilai UC *joint* 0.283 . Maka struktur masuk ke dalam kategori aman. Pada analisis fatigue, umur layan struktur selama 14828.5 tahun sehingga struktur memenuhi syarat aman. UC member yang didapat dari analisis transportasi adalah sebesar 0.47 sehingga struktur memenuhi syarat. Nilai rentang kestabilannya pun memenuhi standar kriteria Noble Denton 0030 dan ISO 19901:6 dengan nilai rentang 31.52° pada kondisi *intact* dan 24.78° pada kondisi *damage*. Nilai daya tarik *bollard pull* adalah 106.90 MT. Jika peralatan *towing* memenuhi standar kriteria *minimum breaking load*, maka proses transportasi dinilai aman.

DAFTAR PUSTAKA

- Tawekal, Ir, Ricky Lukman. 2011. *KL4121 Bangunan Lepas Pantai*. Bandung: Penerbit ITB
- American Petroleum Institute. (2000). *Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms API-RP2A WSD 21st Edition*. Washington D.C: API Publishing Services.
- Noble Denton Grup Limited. (2010). *Technical Policy Board Guidelines for Marine Transportation*. Hamburg: Noble Denton Grup Limited.
- The British Standard Intitution. (2012). *Petroleum and Natural Gas Industries – Specific Requirements for Offshore Structure Part 6 : Marine Operations (ISO 19901-6:2009)*. London : BSI Standard.