

ANALISIS MODUL PRODUKSI SAAT KONDISI TRANSPORTASI PADA FLOATING PRODUCTION SYSTEM DI PERAIRAN LEPAS PANTAI INDONESIA

Bayu Adiprasyad Muftie, Sugeng P. Budio, Ming Narto Wijaya

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono 167 Malang, 65145, Jawa Timur – Indonesia
bayuadiprasyadmufte@gmail.com

ABSTRAK

Melihat kondisi pada saat ini dimana konsumsi minyak bumi dunia yang cukup besar, maka penyediaan minyak bumi harus terus dioptimalkan, terutama dalam hal efisiensi operasional yang dapat mengurangi biaya maupun waktu produksi. Dalam hal proses produksi, banyak kegiatan produksi yang bisa diefisiensikan, beberapa hal yang bisa diupayakan yaitu membuat dimensi kapal yang lebih ringkas dan mengurangi waktu pengangkatan (*lifting*). Dalam hal ini konfigurasi modul harus direncanakan ulang sehingga dibutuhkan analisis kembali terhadap struktur baja elemen utama modul. Analisis yang dibahas merupakan analisis struktur modul saat kondisi transportasi untuk mengetahui kinerja struktur modul apabila struktur dikonfigurasi ulang akibat penyatuan beberapa struktur modul pada saat kondisi kapal berjalan. Dalam analisis digunakan *software* SAP2000 V.18 yang menghasilkan *output* berupa momen, gaya geser, dan aksial yang terbesar dari 8 kondisi arah pembebanan yang selanjutnya data tersebut digunakan sebagai angka yang dianalisis dengan manual AISC. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur baja pada elemen utama modul kuat menahan beban-beban yang bekerja yaitu kombinasi beban berat sendiri struktur, beban benda produksi, beban angin, serta beban akibat pergerakan kapal.

Kata kunci: analisis struktur, modul produksi, *floating production system*, kondisi transportasi.

ABSTRACT

Viewing conditions at this time when world petroleum consumption is large enough, then the supply of oil should continue to be optimized, particularly in terms of operational efficiencies that can reduce costs and production time. In terms of the production process, many production activities that could be optimized, some things that could be pursued are to make more compact dimensions of the vessel and reduce the time of appointment (lifting). In this case the module configuration should be analyzed back to the main elements of the steel structure of the module. The analysis covered a structural analysis of the current module transport conditions to determine the performance of the module structure when the structure is reconfigured as a result of the unification of multiple structure modules when the condition of the ship running. In the analysis by utilizing SAP2000 V.18 software that produces some output in the form of moments, shear force, and axial. The values that used in analysis are the largest of eight conditions that further direction of loading. That data is used as the numbers manually analyzed by AISC. The analysis showed that the steel structure on the main elements of the module can withstand the loads that work. The combination loads that work in the structure are the loads of its own structure heavy burden, the burden of production objects, wind loads and loads due to the movement of the ship.

Keywords: structure analysis, production mode, *floating production system*, transport condition

PENDAHULUAN

Dalam hal proses produksi, banyak kegiatan produksi yang bisa diefisiensikan, salah satunya yaitu dengan mengurangi jumlah pengangkatan modul dengan menambah kapasitas pengangkatan pada crane sehingga dapat mengurangi waktu total pengangkatan modul ke atas kapal dan berdampak pada berkurangnya waktu keseluruhan yang dibutuhkan. Selain itu, pada sisi dimensi kapal juga bisa diefisiensikan menjadi lebih ringkas. Dalam hal ini konfigurasi modul harus direncanakan ulang seperti menyatukan beberapa modul menjadi satu. Berdasarkan pada beberapa hal tersebut, harus dianalisis desain alternatif yang ada agar dapat digunakan dan aman saat kegiatan produksi sedang berlangsung. Hal penting yang perlu dianalisis adalah kekuatan struktur modul dalam menahan beban benda produksi dan beban akibat pergerakan kapal maupun kondisi lingkungan.

TINJAUAN PUSTAKA

FPS

Menurut Subrata K. Chakrabarti (2005) FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) pada dasarnya merupakan kapal yang berfungsi untuk menyimpan dan membongkar minyak secara bersamaan. FPS sendiri adalah *Floating Production System* yang merupakan jenis platform produksi yang serupa dengan FPSO, yaitu kapal yang digunakan sebagai unit terapung untuk kegiatan pengeboran minyak dan gas..

Modul

Pada *topside* kapal terdapat beberapa bangunan yang digunakan sebagai pendukung produksi dan aktivitas kehidupan di atas kapal yang disebut Modul. Struktur modul merupakan suatu kesatuan struktur baja yang dirancang untuk menerima beban-beban benda produksi pada FPS, beban-beban tersebut bisa berupa beban primer maupun sekunder yang diteruskan ke deck kapal.

Modul pada FPS yang akan menjadi topik skripsi ini merupakan bangunan struktur baja yang berada pada *topside* kapal dibuat dengan konfigurasi gabungan *frame* dan *truss*.

Pembebanan

Pembebanan pada modul dipengaruhi oleh beberapa jenis beban menurut Zelalem (2012) terdapat beban 3 (tiga) jenis beban yang bekerja, yaitu beban mati, hidup, dan lingkungan. Beban mati adalah beban yang merupakan beban dari struktur itu

sendiri yang bersifat permanen, karakteristik dari beban permanen biasanya terpengaruh dari rata-rata kepadatan material dan volume material yang dipakai. Karena struktur terbuat seluruhnya dari baja maka beban mati tergantung dari volume baja yang digunakan, dengan kerapatan massa baja yaitu 7850 kg/m³.

Adapun beban yang diperhitungkan selanjutnya adalah beban hidup yang merupakan beban pada saat dimana kegiatan produksi dilakukan. Beban hidup biasanya terdiri dari :

- Berat manusia dan furnitur.
- Berat sendiri benda-benda yang diletakkan berpindah-pindah
- Besar tekanan benda (gas, cairan) yang terdapat di dalam penyimpanan.
- Semua benda bergerak seperti derek pengeboran

Selanjutnya beban yang perlu diperhatikan adalah beban akibat lingkungan merupakan beban yang diakibatkan oleh angin, salju, es, gempa bumi, gelombang, maupun pergerakan kapal. Beban akibat angin bekerja sebagai beban angin statis. Untuk penyederhanaan analisis modul maka kecepatan angin konstan dengan besaran yang berbeda tergantung dari kompresi terhadap profil maupun elevasi dari terpaan angin itu sendiri. Adapun beberapa langkah yang digunakan yaitu dengan input data angin rata-rata selama interval tahun tertentu.

Berdasarkan pada API RP2A bagian 5.3.2.3 formula perhitungan beban akibat kecepatan angin adalah :

$$F = (\rho/2) u^2 C_s A$$

Dengan :

F, Gaya akibat angin, dalam kN

$\rho = 1.226$ kg/m³, kerapatan massa udara

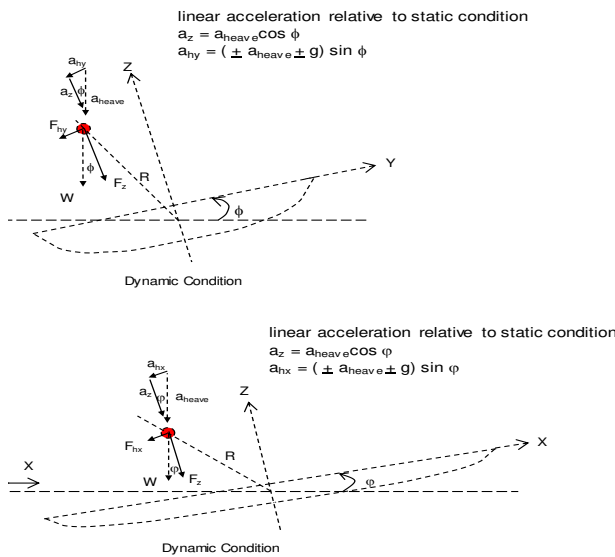
C_s , koefisien bentuk

A, Luas area yang dibebani

u, kecepatan angin

Dikarenakan analisis saat kondisi transportasi maka beban yang harus diperhatikan merupakan beban atau gaya akibat akselerasi transportasi atau gaya yang ditimbulkan pada saat kapal (FPS) bergerak, gaya ini masuk dalam jenis beban lingkungan. Gaya akibat akselerasi kapal patut diperhitungkan karena dapat menimbulkan gaya horizontal yang mempengaruhi struktur modul. Dalam keadaan transportasi, letak modul di kapal berpengaruh terhadap beban yang bekerja pada modul.

Gambar 1 Asumsi Gaya Akibat Akselerasi



Dimana digunakan persamaan berikut untuk menentukan gaya yang terjadi :

$$F_z = F_{vx} \cos \phi = F_{vy} \cos \phi$$

$$F_{hx} = F_{vx} \sin \phi$$

$$F_{hx} = F_z \tan \phi$$

$$F_{hy} = F_{vy} \sin \phi$$

$$F_{hy} = F_z \tan \phi$$

Faktor Beban

Faktor beban yang digunakan adalah faktor beban ULS-a yang mengacu pada API RP2FPS dengan beban mati sebesar 1.3, beban hidup 1.3, beban lingkungan 0.7. akan tetapi berdasarkan petunjuk pada proyek yang berdasarkan konsep konservatif maka angka faktor pada beban lingkungan yang dipakai sebesar 1.0.

Kekuatan Struktur

Kontrol pada kekuatan struktur harus sesuai dengan beban yang bekerja pada struktur. Nilai yang dijadikan perhitungan merupakan nilai karakteristik beban maupun nilai nominal beban.

Pada gelagar plat, momen maksimum yang terjadi dipertimbangkan dengan persamaan $\phi Mn > Mu$. Pada penentuan Mn menurut AISC bergantung pada bentuk penampang, apakah itu kompak, non-kompak, dan langsing yang berdasarkan pada rasio harga lebar-tebal pada tabel berikut.

Tabel 1 Rasio Nilai Lebar-Tebal (ksi)

Element	λ	λ_p	λ_r
Sayap	$\frac{b_f}{2t_f}$	$\frac{65}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{141}{\sqrt{F_y - 10}}$
Badan	$\frac{h}{t_w}$	$\frac{640}{\sqrt{F_y}}$	$\frac{970}{\sqrt{F_y}}$

Dimana jika :

- nilai $\lambda < \lambda_p$, penampang adalah kompak
- nilai $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$, penampang adalah non kompak
- $\lambda > \lambda_r$, penampang adalah langsing

Untuk tegangan geser persamaan yang digunakan sesuai AISC $V_u < \phi V_n = 0.6 \phi A_w F_y w$ dengan A_w adalah luas penampang badan dan $F_y w$ adalah tegangan leleh penampang badan.

Pada kontrol lendutan digunakan lendutan ijin sebagai berikut.

Tabel 2 Lendutan Ijin

Support Condition	Allowable Deflection	
	Live Load	Dead + Live Load
Ends supported	L/360	L/240
Cantilever	L/240	L/180

Pada profil silinder analisis untuk perencanaan profil silinder sama seperti analisis dalam perencanaan elemen baja yang lain, ada beberapa kekuatan batas yang perlu diperhitungkan berdasarkan API RP2A seperti tegangan aksial $F_t = 0.6 F_y$ Dengan F_y adalah kuat leleh profil (MPa).

Tegangan Tekan (*Axial Compression*), tekuk kolom digunakan persamaan

$$F_a = \frac{[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2Cc^2}] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r) - (Kl/r)^3}{8Cc} - \frac{(Kl/r)^3}{8Cc^3}}$$

Dengan $Cc = \left(\frac{2\pi^2 E}{F_y}\right) 0.5$

E = Modulus elastisitas baja

K = Faktor panjang efektif

l = Panjang tak terkekang

r = radius girasi

Untuk momen yang diijinkan dengan persamaan sebagai berikut :

$$F_b = 0.75 F_y \text{ untuk } \frac{D}{t} \leq \frac{10,340}{F_y} \text{ dalam satuan SI}$$

$$F_b = 0.75 F_y \text{ untuk } \frac{D}{t} \leq \frac{1500}{F_y} \text{ dalam satuan USC}$$

$$F_b = \left[0.84 - 1.74 \frac{F_y D}{Et}\right] F_y, \text{ untuk } \frac{10,340}{F_y} \leq \frac{D}{t} \leq$$

$$\frac{20,680}{F_y} \text{ dalam SI,}$$

$$F_b = \left[0.84 - 1.74 \frac{F_y D}{E t} \right] F_y, \quad \text{untuk } \frac{1500}{F_y} \leq \frac{D}{t} \leq \frac{3000}{F_y} \text{ dalam USC}$$

$$F_b = \left[0.72 - 0.58 \frac{F_y D}{E t} \right] F_y, \quad \text{untuk } \frac{20,680}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 300 \text{ dalam SI,}$$

$$F_b = \left[0.72 - 0.58 \frac{F_y D}{E t} \right] F_y, \quad \text{untuk } \frac{3000}{F_y} \leq \frac{D}{t} \leq 300 \text{ dalam USC.}$$

Untuk D/t lebih dari 300, digunakan persamaan dari API 2U.

Geser maksimum untuk profil silinder sebagai berikut :

$$f_v = V / 0,5 A$$

Dimana :

f_v = tegangan geser maksimum (MPa)

V = gaya geser transversal (MN)

A = area *cross section* (m²)

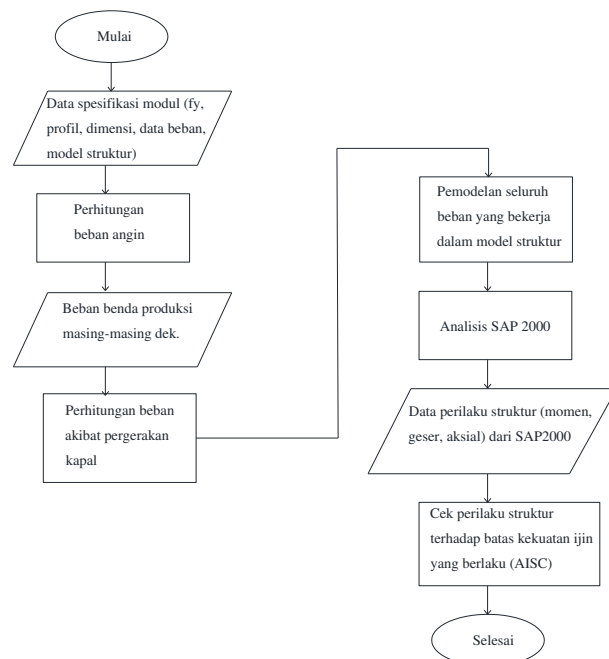
Sedangkan tegangan geser ijin maksimum adalah

$$F_v = 0.4 F_y.$$

METODE ANALISIS

Diagram Alir

Gambar 2 Diagram Alir Penelitian



Data Bangunan

Bangunan : Modul Produksi pada FPS
(*Floating Production System*)

Lokasi Bangunan : FPS (*Floating Production System*) di perairan lepas pantai Indonesia.

Jenis Struktur : Struktur baja gabungan *frame* dan *truss*.

Luas Bangunan : ± 2813 m²

Tinggi Bangunan : ± 20,5 m

Panjang modul (as ke as) : 45,4 m

Lebar modul (as ke as) : 28,2 m

Tinggi modul : 20,5 m

Tumpuan : Sendi

Sambungan : Las

Untuk profil yang dipakai adalah PG 1200.450.16.25, PG 1200.550.25.40, Ø720/36, Ø600/20, Ø.508/25, WF 400.200.8.13, Ø355.6/15.88, Ø406.4/19.05 dan Ø355.6/12.70.

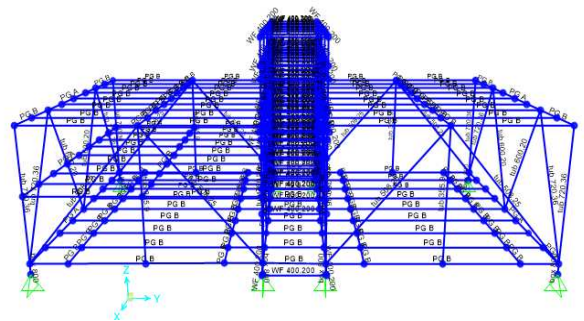
Alat dan Bahan

Adapun alat atau *software* yang digunakan adalah SAP2000 V.18 , Autocad 2016 serta Ms.Office.

Model Input

Dalam proses analisis yang menggunakan *software* SAP2000 diperlukan model garis sebagai input analisis seperti pada gambar 2.

Gambar 3 Model Garis Struktur



PEMBAHASAN

Pembebanan Beban Angin

Untuk mengetahui bagaimana beban angin dihitung pada analisis modul, digunakan bantuan program SAP 2000 dengan memasukkan data-data yang diperlukan. Untuk tinggi bangunan yang kurang dari 50 m digunakan beban angin 5 detik, diambil langkah konservatif maka dipakai data angin dengan durasi 3 detik. Adapun data yang menjadi acuan adalah sebagai berikut :

Wind Speed : 34.7 m/s , 100 year (*Storm*)

Referensi Elevasi : 20.00 m

Pada saat input SAP2000 data yang digunakan adalah data dimana kecepatan angin yang berada pada ketinggian 10 meter atau pada zSL 10 meter, dalam analisis digunakan langkah konservatif maka digunakan data kecepatan angin yang ada yaitu 20 meter yang rata rata kecepatan 34.7 m/s dalam periode 100 tahun. Data tersebut menghasilkan perkiraan kecepatan angin seperti pada tabel berikut.

Tabel 2 Hasil kecepatan Angin dan Tekanan

zSL(m)	V, 3sec (m/s)		Wind Pressure (kPa)	
	Operate	Storm	Operate	Storm
12.75	33.31	37.65	0.68	0.87
16.5	33.45	37.81	0.69	0.88
22.25	33.62	38	0.69	0.89
28	33.76	38.16	0.70	0.89
34	33.9	38.32	0.70	0.90
39.5	34.03	38.46	0.71	0.91
43.5	34.12	38.57	0.71	0.91

Pembebanan Beban Benda Produksi

Dalam perhitungan beban benda saat kondisi *transport* digunakan beban saat kondisi *dry* atau kering dikarenakan saat kondisi ini semua benda dan peralatan produksi belum beroperasi, Benda produksi sendiri didefinisikan sebagai beban hidup karena posisinya yang tidak selalu pada posisi yang sama atau dapan dipindahkan.

Tabel 3 Beban Modul Tiap lantai

Bangunan	Lantai Dasar (MT) EL +21.500	Mezanin (MT) EL +27.250	Lantai Atas (MT) EL +33.000
P5	267.99	Tidak Terdapat Dek Mezanin.	250.915
S5	258	236.56	230.261

Tabel 4 Beban Rak Pipa Per Elevasi

Elevasi	Beban (MT)	Elevasi	Beban (MT)
+21.50	21.775	+35.65	9.175
+25.55	7.835	+37.80	7.835
+27.65	13.975	+39.80	10.975
+30.35	7.835	Total	96.495
+31.80	9.175		
+33.00	7.915		

Pembebanan Akibat Pergerakan Kapal (Acceleration Loads)

Dalam perhitungan beban akibat pergerakan kapal, beban pada bangunan dihitung dan kemudian dikalikan dengan angka akselerasi kapal. Beban akibat pergerakan kapal ini sendiri diasumsikan sebagai beban aksial dan juga beban hidup yang bekerja pada tiap kolom bangunan. Kemudian, beban yang sudah dikalikan dibagi menjadi dua bagian yaitu pada ujung puncak tiap modul (P5 dan S5) dan pada atas *deck stool*. Pada perhitungan beban akibat akselerasi ini digunakan data yang telah tersedia yang merupakan data dengan satuan (g) yang nantinya dikalikan dengan beban modul sehingga mengakibatkan beban luar terhadap modul.

Tabel 5 Motion Criteria

Motion	Amplitude	Period
Roll	20 deg	10 sec
Pitch	12.5 deg	10 sec
Heave	0.2 g	

Tabel 6 Data Akselerasi

Arah	surge(g)	sway(g)	heave(g)
0	0.03	-	0.03
45	0.02	0.02	0.04
90	-	0.11	0.13
135	0.02	0.02	0.04
180	0.01	-	0.02
225	0.02	0.02	0.04
270	-	0.11	0.13
315	0.02	0.02	0.04

Tabel 7 Data Akselerasi Perhitungan *Motion Criteria*

Cond.	Linear acc. relative to static cond.		
	ahx (g)	ahy (g)	az (g)
+Roll +Heave		0.274	0.248
+Roll -Heave		0.410	-0.128
-Roll +Heave		-0.274	0.248
-Roll -Heave		-0.410	-0.128
+Pitch +Heave	-0.173		0.219
+Pitch -Heave	-0.260		-0.172
-Pitch +Heave	0.173		0.219
-Pitch -Heave	0.260		-0.172

Dari data tersebut didapatkan nilai beban terpusat yang bekerja pada modul yang dijabarkan berdasarkan kondisi dana arah gaya dan disebar ke 8 titik tumpuan, peletakkan beban berada pada ujung atas modul dan bawah modul dengan rasio beban pada titik ujung atas 40% sedangkan titik ujung bawah 60 %..

Tabel 8 Gaya Horizontal

Arah	Fy (kN)		Fx (kN)	
	Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	-	-	194.152	291.227
45	284.51	426.765	183.525	275.3
90	348.746	523.118	-	-
135	284.51	426.765	-183.525	-291.227
180	-	-	180.75	-271.124
225	-284.51	-426.765	-183.525	-275.3
270	-348.746	-523.118	-	-
315	-284.51	-426.765	183.525	275.3

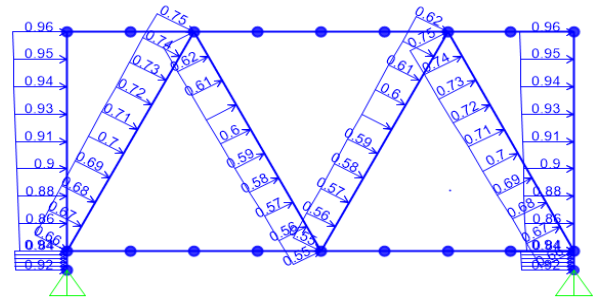
Tabel 9 Gaya Vertikal

Arah	Fz Roll (kN)		Fz Pitch (kN)	
	Atas	Bawah	Atas	Bawah
0	-	-	-920.146	-1380.22
45	-1181	-1771.466	-1252.04	-1878.06
90	-928.3	-1392.434	-	-
135	-1181	-1771.466	-1252.04	-1878.06
180	-	-	-913.445	-1370.17
225	-1181	-1771.466	-1252.04	-1878.06
270	-928.3	-1392.434	-	-
315	-1181	-1771.466	-1252.04	-1878.06

Model Beban

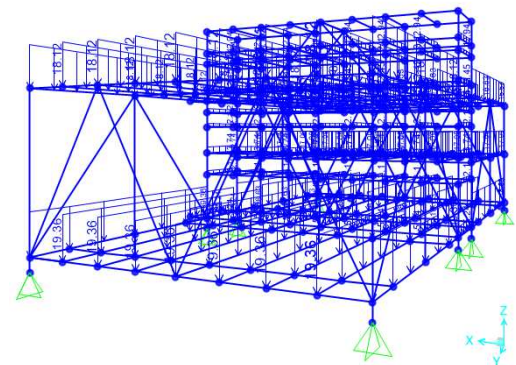
Dalam analisis bangunan ini, digunakan beberapa asumsi dalam pemodelan beban maupun struktur. Adapun beban angin pada analisis ini diasumsikan mengenai seluruh profil bangunan tanpa terkena tembok.

Gambar 4 Model Beban Angin Arah X (0°)



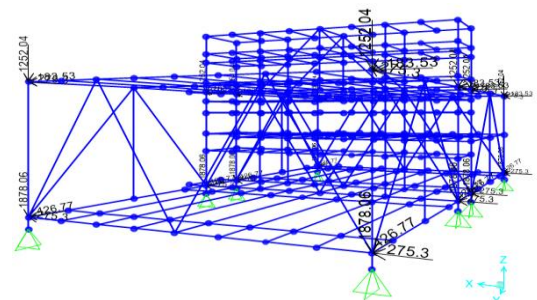
Dalam pemodelan beban benda produksi, digunakan asumsi beban yang ada disebar secara merata ke seluruh girder utama struktur. Dalam hal ini, *stringer* atau pengaku girder yang juga berlaku sebagai alas lantai baja diasumsikan sebagai beban merata yang menumpu pada girder utama lantai.

Gambar 5 Model Beban Benda Produksi



Dalam analisis, beban akibat pergerakan kapal didefinisikan sebagai beban terpusat yang bekerja di atas profil box yang menumpu struktur bangunan atau *deck stool*. Diasumsikan bahwa *deck stool* bergerak sesuai dengan pergerakan kapal sehingga menimbulkan gaya aksial di atasnya.

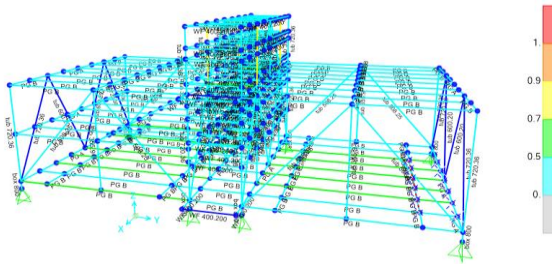
Gambar 6 Model Beban Akselerasi (315°)



Hasil Analisis

Dalam analisis ini, langkah awal untuk mengetahui kekuatan struktur serta titik lemah adalah dengan hasil analisis oleh program SAP2000 yang kemudian hasil perilaku struktur dianalisis kembali dengan AISC secara perhitungan manual. Pada hal ini, profil yang dianalisis yaitu profil yang mengalami momen terbesar daripada profil lainnya dan angka rasio *steel design/check of structure* pada SAP2000 mendekati angka 1. Berikut merupakan gambar 3-D hasil analisis dengan program SAP2000.

Gambar 7 Hasil Analisis Pada Kondisi Pembebanan Arah 90°



Elemen struktur berwarna merah merupakan kondisi gagal atau *fail*, oranye adalah kritis tapi masih layak, kuning adalah mendekati kritis, hijau adalah layak atau aman, sedangkan biru berarti sangat aman atau tergolong boros. Pada analisis yang sudah dilakukan didapatkan profil yang mengalami momen terbesar dan rasio mendekati 1 adalah profil PG B dan Tub 355.15. Dari hasil *steel design/check of structure* pada program SAP2000 tersebut dilihat kembali momen terbesar yang terjadi dari 8 kondisi arah pembebanan dan diambil angka momen, aksial, geser yang terbesar untuk digunakan dalam analisis manual menggunakan AISC.

Analisis Dengan AISC

Pada analisis struktur dengan SAP2000 didapatkan data struktur momen, geser dan aksial maksimum pada profil PG B atau Plat Girder 1200.450.16.25 terjadi pada kondisi arah pembebanan 90 derajat dimana didapatkan momen maks sebesar 1583.121 kNm, geser maksimum 536.637 kN, dan aksial maksimum sebesar 122.708 kN. Sedangkan pada profil Tub 355.15 didapat momen maksimum sebesar 346.626 kNm, geser maksimum 304.669 kN, dan aksial maksimum 202.397 kN.

Pada analisis PG B (345 MPa) dengan AISC digunakan angka Z dan A yang tertera pada SAP2000 sehingga perhitungan dilakukan sebagai berikut.

- Momen

$M_n = F_y \cdot Z$ (Penampang Kompak)

$\phi M_n = 0.9 (0.345)(18509157) = 5747.093 \text{ kNm} > 1583121 \text{ kN.mm}$, profil kuat menahan momen.

A_w (Luas Badan) = 18400 mm²

- Geser

$V_u < \phi V_n = 0.6 \phi A_w F_y w$,

$\phi V_n = 0.6(0.9)(18400)(0.345) = 3427.92 \text{ kN} >$

$V_u = 536.637 \text{ kN}$, penampang kuat menahan gaya geser maksimum.

- Lendutan

$W_{baja} = 7850 \text{ Kg/m}^3 = 78.5 \text{ Kn/m}^3$

$A_{profil} = 0.0409 \text{ m}^2$

ULS = 1.3

$W_{dead} = A \times W_{baja}$

= 0.0409 x (78.50)

= 3.21 kN/m x 1.3

= 4.174 kN/m = 4.174 N/mm

$W_{live} = 18.12 \text{ kN/m} = 18.12 \text{ N/mm}$

$E = 200000 \text{ MPa}$ ($2 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$), $I = 0.009795 \text{ m}^4$

$\Delta = \frac{5}{384} \cdot \frac{w l^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(4.174 + 18.12) \times 20^4}{200000000 \times 0.009795} = 0.0237 \text{ m}$

Lendutan ijin, $\Delta_{ijin} = \frac{L}{240} = \frac{20}{240} = 0.0833$

$m > \Delta = 0.0237 \text{ m}$, lendutan yang terjadi memenuhi syarat.

- Analisis Balok Kolom

$P_u = 122.708 \text{ kN}$

$M_{nt} = 1221.154 \text{ kN.m}$ (akibat beban mati [G])

dan hidup [Q])

$M_{lt} = 590.716 \text{ kN.m}$ (akibat beban lingkungan [E])

$r_x = 0.489$

$\frac{KL}{r} = \frac{KxL}{r_x} = \frac{1.2(20)}{0.489} = 49.08$

$KL/r = 49$, $F_{cr} = 35.66 \text{ Ksi}$ (245.867 MPa atau 245867 kN/m²) (Tabel E-1, AISC)

$\phi_c P_n = 0.85 \times A_g \times F_{cr}$

$\phi_c P_n = 0.85 \times 0.0409 \times 245867 = 8547.57 \text{ kN}$

$P_e = \frac{\pi^2 E A_g}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 200000000 \times 0.0409}{(49)^2} = 33624.9 \text{ kN}$

$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{P_u}{P_e}} = \frac{1}{1 - \frac{122.708}{33624.9}} = 1.00$

(Persamaan C1-5 AISC)

Untuk B1 diambil 1.0 karena merupakan portal tanpa pengaku (*unbraced frame*)

Total momen, $M_u = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} = 1.0(1221.154) + 1.0(590.716) = 1811.87 \text{ kN.m}$

Dengan $\phi M_n = 0.9 (0.345)(18509157) = 5747093.25 \text{ kN.mm}$ atau 5747.093 kN.m.

Untuk $\phi_b M_n$ diambil C_b sebesar 1.14 berdasarkan kondisi pembebanan girder (gambar 5.13 buku LRFD *Steel Design*, William T. Segui).

$\phi_b M_n = 1.14 \times 5747.093 = 6551.614 \text{ kN.m}$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} = \frac{122.708}{8547.57} = 0.014 < 0.2 \quad : \text{Pakai}$$

persamaan H1-1b AISC

$$\frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) = \frac{0.004}{2} + \left(\frac{1811.87}{6551.614} + 0 \right) = 0.278 < 1, \text{ Penampang memenuhi syarat}$$

analisis balok-kolom.

Untuk analisis profil silinder dikarenakan D/t profil ≤ 60 maka perlu dianalisis terhadap tekuk kolom.

- Cek Tekuk Kolom

$$\frac{Kl}{r} = \frac{0.85 \times 6800}{120.24} = 48.07$$

$$C_c = \left(\frac{2\pi^2 \cdot 200000}{345} \right)^{0.5} = 106.97 > \frac{Kl}{r} = 48.07$$

Dipakai persamaan,

$$F_a = \frac{[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}}$$

$$F_a = \frac{[1 - \frac{(48.07)^2}{2 \times 106.97^2}] 345}{\frac{5}{3} + \frac{3(48.07)}{8 \times 106.97} - \frac{(48.07)^3}{8 \times 106.97^3}}$$

Tegangan aksial ijin, $F_a = 170.0466$ MPa

Gaya aksial maksimum yang terjadi = 202.397 kN

$f_a = F/A$

$$= 202397 \text{ N} / 16948.118 \text{ mm}^2$$

$$= 11.9 \text{ MPa} < F_a = 170.046 \text{ MPa}$$

Profil tidak mengalami tekuk kolom.

- Cek Kapasitas Geser

$$f_v = V/0.5A$$

$$f_v = \frac{304669}{0.5(16948.118)} = 35.95 \text{ MPa}$$

$$F_v \text{ ijin} = 0.4 F_y = 0.4 \times 345 = 138 \text{ MPa}$$

$f_v < F_v$, Profil tidak mengalami keruntuhan geser

- Cek Kapasitas Momen

Dikarenakan D/t profil sebesar 22.4 dan lebih kecil dari $\frac{10340}{F_y}$ maka dipakai persamaan

Tegangan ijin momen (F_b) = 0.75 F_y , atau sebesar 258.75 MPa.

Dengan $M_u = 346626000$ Nmm maka tegangan yang terjadi adalah :

$$f_b = \frac{M_u}{Z} = \frac{346626000}{1834040.5} = 189 \text{ MPa} < F_b = 258.75 \text{ MPa}$$

Profil kuat menahan tegangan akibat momen.

- Analisis Balok-Kolom

$$P_u = 202.397 \text{ kN}$$

$$r_x = 0.12 \text{ m}$$

$$A = 0.0169 \text{ m}^2$$

$M_{nt} = 256.924$ kN.m (akibat beban mati [G] dan hidup [Q])

$M_{lt} = 138.249$ kN.m (akibat beban lingkungan [E])

[E])

$$\frac{Kl}{r} = \frac{KxL}{rx} = \frac{1.2(6.8)}{0.12} = 68$$

$KL/r = 68$, $F_{cr} = 30.31$ Ksi (208.98 MPa atau 208980 kN/m²) (Tabel E-1, AISC)

$$\phi_c P_n = 0.85 \times A_g \times F_{cr}$$

$$\phi_c P_n = 0.85 \times 0.0169 \times 208980 = 3002 \text{ kN}$$

$$P_e = \frac{\pi^2 E A_g}{\left(\frac{Kl}{r}\right)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 200000000 \times 0.0169}{(68)^2} = 7207.06 \text{ kN}$$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{P_u}{P_e}} = \frac{1}{1 - \frac{211.9}{7207.06}} = 1.03$$

(Persamaan C1-5 AISC)

Untuk B1 diambil 1.0 karena merupakan portal tanpa pengaku (*unbraced frame*)

Total momen, $M_u = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} =$

$$1.0(256.924) + 1.03(138.249) = 399.320 \text{ kN.m}$$

$$\phi M_n = 0.9 (345000)(0.0018) = 558.9 \text{ kN.m}$$

$$\phi_b M_{px} = 1.0 \times 558.9 = 558.9 \text{ kN.m}$$

Untuk distribusi linear dengan nilai $M = 0$ pada salah satu ujungnya maka asumsi perhitungan C_b sebagai berikut :

$$C_b = \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_a + 4 M_b + 3 M_c} = \frac{12.5(1.0)}{2.5(1.0) + 3(0.25) + 4(0.5) + 3(0.75)} = 1.67$$

$$\phi_b M_{nx} = 1.67 \times 558.9 = 933.37 \text{ kN.m}$$

Dikarenakan $\phi_b M_{px}$ pada distribusi linear dengan $M=0$ lebih besar dari $\phi_b M_{nx}$ maka diambil

$\phi_b M_{nx}$ dengan nilai 558.9 kN.m.

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} = \frac{202.397}{3002} = 0.067 < 0.2 \quad : \text{Pakai}$$

persamaan H1-1b AISC

$$\frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) = \frac{0.07}{2} + \left(\frac{399.320}{558.9} + 0 \right) = 0.749 < 1, \text{ Penampang memenuhi syarat kekuatan}$$

desain balok-kolom.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan analisis pada struktur gabungan modul produksi P5-PR5-S5 pada *floating production system* di perairan Indonesia pada saat kondisi transportasi didapatkan hasil sebagai berikut:

1. Berdasarkan analisis, perilaku struktur yang terjadi yaitu tiap elemen struktur kuat menahan beban yang bekerja.
2. Struktur dapat menahan momen ultimit akibat beban, hal tersebut telah dijelaskan pada analisis secara manual dengan pedoman baja AISC dimana beberapa kondisi seperti momen terbesar, gaya geser dan gaya aksial terbesar yang terjadi pada profil PG B dan Tub 355.15 dapat ditahan oleh kedua profil tersebut. Selain itu, dalam analisis balok-kolom kedua profil tersebut juga terbukti kuat menahan perilaku struktur dengan rasio 0.278 pada PG B dan 0.749 pada Tub 355.15 dimana kedua rasio tersebut tidak melebihi angka 1 yang merupakan kriteria ijin.
3. Tidak terjadi kegagalan pada tiap elemen struktur, atau dapat ditarik kesimpulan bahwa desain penyatuan ketiga bangunan yaitu modul P5 – *pipelack* 5 – modul S5 layak digunakan dalam kondisi transportasi atau kondisi saat kapal bergerak.

Saran

Untuk penyempurnaan analisis dibutuhkan beberapa hal yang dapat meningkatkan keakuratan analisis struktur modul pada FPS.

1. Data-data lapangan secara mendetail, sehingga sesuai dengan keadaan sesungguhnya.
2. Perlunya pengetahuan tentang metode kegagalan akibat *fatigue* yang merupakan ilmu lanjutan. Ilmu ini dapat menyempurnakan analisis sehingga hasil dapat digunakan untuk mendesain ulang konsep struktur.
3. Perlunya program khusus bangunan lepas pantai yang dapat mempermudah analisis dan menyempurnakan hasil dari analisis.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction, “*Manual of Steel Construction, LRFD vol.1*”, 2nd ed.
- American Institute of Steel Construction, “*Manual of Steel Construction, LRFD vol.2*”, 2nd ed.
- American Petroleum Institute, “*Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design*”, 2nd ed.
- American Petroleum Institute, “*Planning, Designing, and Constructing Floating Production Systems*”, 2nd ed.
- Chakrabarti, K. Subrata, “*Handbook of Offshore Engineering, vol 1*”, Elsevier, Inc., 2005.
- Chakrabarti, K. Subrata, “*Handbook of Offshore Engineering, vol 2*”, Elsevier, Inc., 2005.
- El-Reedy, A. Mohamed, “*Offshore Structures: Design, Constructing and Maintenance*”, Elsevier, Inc., 2012.
- Hika, Z. Teshome, “*Master Thesis: Design Analysis and Optimization of Offshore Module*”. University of Stavanger., 2012
- International Organization for Standardization, “*Petroleum and Natural Gas Industries-General Requirements for Offshore Structures*”, revision of 2nd Edition ISO 19900, Geneva., 2012.
- Može, Primož, “*Lecture 15A.1-10: Structural Systems-Offshore*”, <http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/ESDEP/master/wg15a/11000.htm> [diakses 21 April 2016]
- Salmon, C.G., Johnson, J.E., “*Steel Structures, Design and Behavior*” 2nd ed., Harper & Row Publishers, New York, 1980.
- Segui, T. William. “*LRFD Steel Design*”, PWS Publishing Company, Boston., 1994.
- Tvedt, Henrik., “*Master Thesis: Modular Approach to Offshore Vessel Design and Configuration*”, Norwegian University of Science and Technology (NTNU – Trondheim), 2012.