

ANALISIS RESPON DINAMIK SPAR AKIBAT VARIASI POLA MOORING

Spar Dynamic Behavior Analysis Due to Variations of Mooring Pattern

Rahadian L. Amidarmo¹, Ricky L. Tawekal²

^{1,2}Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung
Email: rahadian.amidarmo@yahoo.co.uk¹, ricky@ocean.itb.ac.id²

Kata kunci: Respon Dinamik, Spar, Pola Mooring

PENDAHULUAN

Konsumsi energi dunia terus meningkat sejak tahun 1950-an. Seperti ditunjukkan oleh gambar 1.1, bahan bakar fosil (minyak bumi, gas alam, dan batu bara) masih menjadi primadona dengan angka 80% dari konsumsi energi dunia. Kenaikan pesat harga minyak mentah selama akhir tahun 2000-an merupakan respon terhadap meningkatnya permintaan untuk minyak dan gas. Oleh karena itu, produksi minyak dan gas sangat penting bagi stabilitas pasokan energi dunia.

Dengan menipisnya cadangan di daratan dan perairan dangkal, eksplorasi dan produksi minyak di perairan dalam telah menjadi tantangan bagi industri lepas pantai. Eksplorasi dan produksi minyak dan gas lepas pantai terus bergerak menjauh ke perairan yang lebih dalam dengan kecepatan yang meningkat. Produksi minyak lepas pantai dari perairan dalam meningkat tajam sejak tahun 1995 [1].

Setelah operasi lepas pantai melampaui batas praktis *fixed platform*, para insinyur produksi meminjam konsep yang dibuat oleh para insinyur pengeboran yang telah lama merespon kebutuhan para insinyur eksplorasi dengan konsep *drillship* saat mereka mulai bergerak keluar dari perairan dangkal. Dengan demikian, kini sistem produksi terapung menyediakan pilihan yang layak untuk kegiatan produksi di perairan dalam [2].

Pergerakan struktur terapung, tak terkecuali struktur *Spar*, dipengaruhi oleh berbagai hal mulai dari pengaruh eksternal sistem seperti gelombang, arus dan angin, hingga pengaruh internal sistem seperti geometri *hull*, konfigurasi *riser*, dan konfigurasi *mooring*. Pada karya tulis ini akan dilakukan analisis mengenai pengaruh

pola *mooring* yang digunakan terhadap perilaku dinamik struktur *spar*.

TEORI DAN METODOLOGI

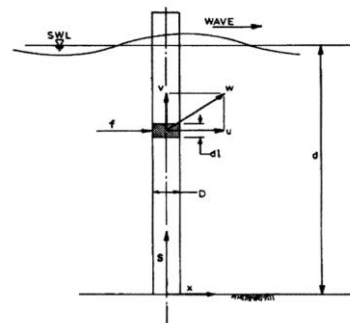
Persamaan Morison mengasumsikan gaya yang bekerja pada struktur terdiri dari gaya seret (*drag*) sebagai gaya signifikan dan gaya inersia yang bekerja bersama dengan mengabaikan fenomena difraksi yang terjadi [2]. Persamaan ini berlaku untuk struktur-struktur yang berukuran relatif kecil dibandingkan panjang gelombang, dengan perbandingan $D/L = 0.2$.

Komponen-komponen yang bekerja terdiri atas koefisien inersia (massa) dan koefisien seret (*drag*) yang didapatkan dari eksperimen.

$$f = \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \ddot{u} + \frac{1}{2} \rho C_D |u| u \quad (2.1)$$

dimana:

- D = diameter tiang
- f = gaya horizontal per satuan panjang
- u = kecepatan partikel arah horizontal
- $\ddot{u}$ = percepatan partikel arah horizontal
- v = kecepatan partikel arah vertikal
- C_M = koefisien inersia
- C_D = koefisien seret



Gambar 1 Gaya Morison pada tiang vertikal (Chakrabarti, 2005)

Apabila sebuah struktur bebas bergerak, struktur tersebut akan berosilasi akibat beban-beban lingkungan. Sebuah bentuk persamaan Morison yang dimodifikasi dapat menggambarkan gaya per satuan panjang yang dialami oleh struktur karena pergerakannya.

$$f = m\ddot{x} + C_A \rho \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{x} + \frac{1}{2} C_D \rho D |\dot{x}| \dot{x} \quad (2.2)$$

dimana:

- D = diameter tiang
- f = gaya horizontal per satuan panjang
- m = massa silinder per satuan panjang
- C_A = koefisien *added mass*
- C_D = koefisien seret
- x = perpindahan harmonik silinder dengan jumlah titik merepresentasikan turunan ke-n dari x

Bagian pertama dari sisi kanan persamaan merepresentasikan inersia silinder, sedangkan dua bagian terakhir merepresentasikan inersia hidrodinamik dan gaya-gaya seret akibat pergerakan silinder di air.

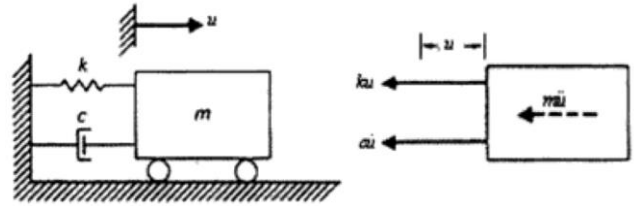
Arus merupakan salah satu bagian dari gaya lingkungan yang bekerja pada struktur. Gaya yang diakibatkan oleh struktur adalah gaya seret searah dengan arah arus [3]. Umumnya arus laut memiliki harga bervariasi untuk kedalaman tertentu, sehingga distribusi gaya yang terjadi pada struktur tidak seragam. Besarnya arus gaya ini dipengaruhi oleh bentuk struktur. Secara umum, persamaan untuk menghitung besar gaya akibat arus ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$f = \frac{1}{2} r C_D A U^2 \quad (2.3)$$

dimana:

- r = massa jenis air laut
- C_D = koefisien drag
- A = luas proyeksi tegak lurus arah arus
- U = kecepatan partikel air

Persamaan gerak struktur terapung dapat dimodelkan sebagai suatu sistem dengan satu derajat kebebasan yang memiliki pegas dan peredam serta dibebani gaya luar [4].



Gambar 2 Diagram *freebody* sistem satu derajat kebebasan (Paz dan Leigh, 2004)

Penjelasan dari model matematis di atas adalah sebagai berikut:

- Massa m menyatakan massa dan sifat inersia struktur
- Pegas k menyatakan gaya balik elastis dan energi potensial
- Redaman c menyatakan kehilangan energi dari struktur
- Gaya $F(t)$ menyatakan gaya luar yang bekerja dan merupakan fungsi dari waktu

Untuk mencari pergerakan dalam arah *surge* atau *sway*, dapat digunakan hukum II Newton. Berdasarkan hukum II Newton, kesetimbangan sistem di atas dapat ditulis sebagai berikut:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F \quad (2.4)$$

Persamaan di atas memiliki solusi homogen dan solusi khusus. Apabila gaya luar diabaikan maka sistem akan berada dalam keadaan bergetar bebas:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.5)$$

Solusi persamaan di atas dapat dipenuhi oleh persamaan berikut:

$$u = Ce^{pt} \quad (2.6)$$

Substitusikan persamaan (2.6) ke dalam persamaan (2.5)

$$mCp^2 e^{pt} + cCpe^{pt} + kCe^{pt} = 0 \quad (2.7)$$

Hilangkan faktor yang sama pada persamaan di atas, maka didapatkan persamaan baru yang disebut sebagai persamaan karakteristik sistem

$$mp^2 + cp + k = 0 \quad (2.8)$$

Akar dari persamaan kuadrat ini adalah

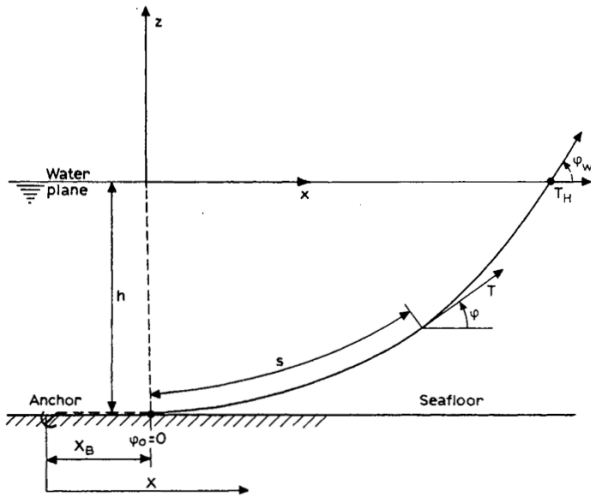
$$p_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\frac{c^2}{4m^2} - \frac{k}{m}} \quad (2.9)$$

Solusi homogenya dapat dituliskan sebagai

$$u(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} \quad (2.10)$$

Konstanta C_1 dan C_2 ditentukan dari kondisi awal sedangkan hasil akhir akan bergantung dari tanda yang ada di bawah akar. Ada tiga kemungkinan hasil yang berbeda di bawah akar yaitu bernilai positif, negatif, atau nol.

Suatu tali yang berada dalam kondisi statis akan memiliki bentuk yang dinamakan *catenary shape* [5].



Gambar 3 *Catenary shape* pada tali (Faltinsen, 1990)

Koordinat penyusun dari bentuk ini dapat dihitung dengan menggunakan sebuah persamaan catenary.

$$x = \frac{Th_a}{w} \sinh^{-1} \left(\frac{Tv_a + ws}{Th_a} \right) \sinh^{-1} \left(\frac{Tv_a}{Th_a} \right) \quad (2.11)$$

$$z = \frac{Th_a}{w} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{Tv_a + ws}{Th_a} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{Tv_a}{Th_a} \right)^2} \right) \quad (2.12)$$

dimana

x = koordinat x

z = koordinat z

Th_a = *tension* horizontal komponen di titik a

Tv_a = *tension* vertikal komponen di titik a

s = *arclength* diukur dari ujung A

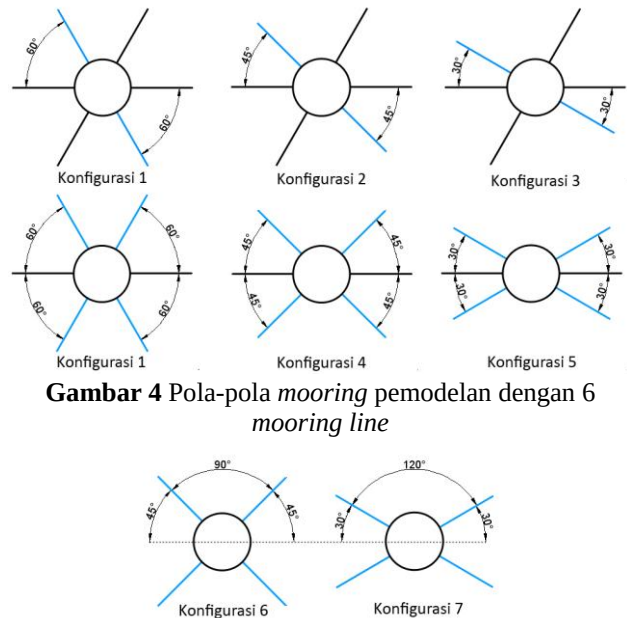
w = berat di air per satuan panjang

Line diasumsikan tidak elastis sehingga *line* tidak akan memanjang dalam arah aksial. Apabila terdapat pengaruh elastisitas serta kekakuan, maka persamaan (2.11) dan persamaan (2.12) akan dimodifikasi menjadi

$$x = \frac{Th_a}{w} \sinh^{-1} \left(\frac{Tv_a + ws}{Th_a} \right) \sinh^{-1} \left(\frac{Tv_a}{Th_a} \right) + \frac{Th_a s}{K} \quad (2.13)$$

$$z = \frac{Th_a}{w} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{Tv_a + ws}{Th_a} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{Tv_a}{Th_a} \right)^2} \right) + \frac{Tv_a s}{K} + \frac{ws^2}{2K} \quad (2.14)$$

Dalam studi ini, digunakan bantuan sebuah program simulasi dinamik kelautan untuk memodelkan tujuh konfigurasi pola *mooring* dengan gaya lingkungan dari arah Utara, Barat Laut, dan Barat. Di bawah ini ditampilkan pola-pola *mooring* yang digunakan dalam pemodelan dengan arah Utara datang tepat dari atas gambar struktur.

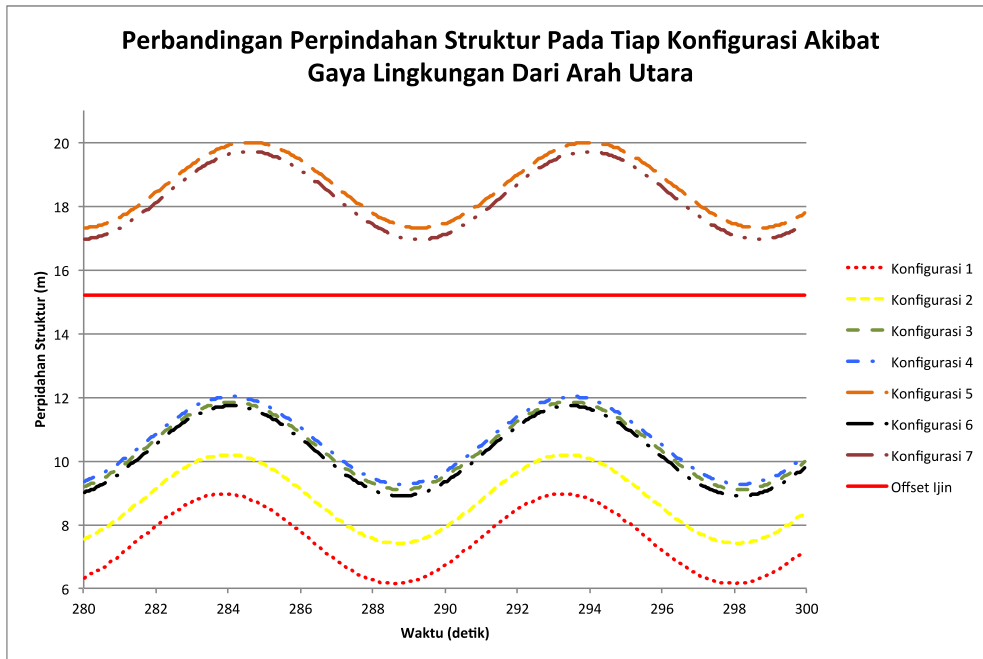


Gambar 4 Pola-pola *mooring* pemodelan dengan 6 *mooring line*

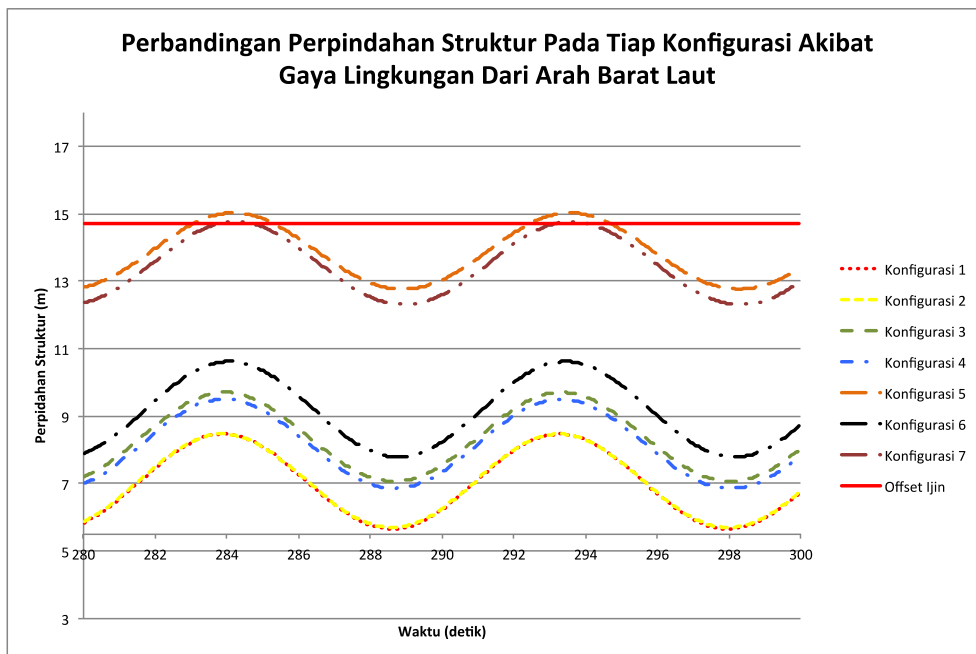
Gambar 5 Pola-pola *mooring* pemodelan dengan 4 *mooring line*

Performa masing-masing konfigurasi *mooring* ditinjau berdasarkan perpindahan struktur dari posisi awal kemudian dibandingkan dengan standar *offset* maksimum yang diatur dalam standar yaitu 2.5% kedalaman perairan [6]. Selain itu, ditinjau pula gaya tarik efektif maksimum yang terjadi pada masing-masing *mooring* kemudian dibandingkan dengan gaya tarik efektif ijin yang diatur dalam rekomendasi praktis yaitu dengan faktor keamanan sebesar 1.67 dari *minimum breaking strength* masing-masing material *mooring line* yang terdapat dalam data [7].

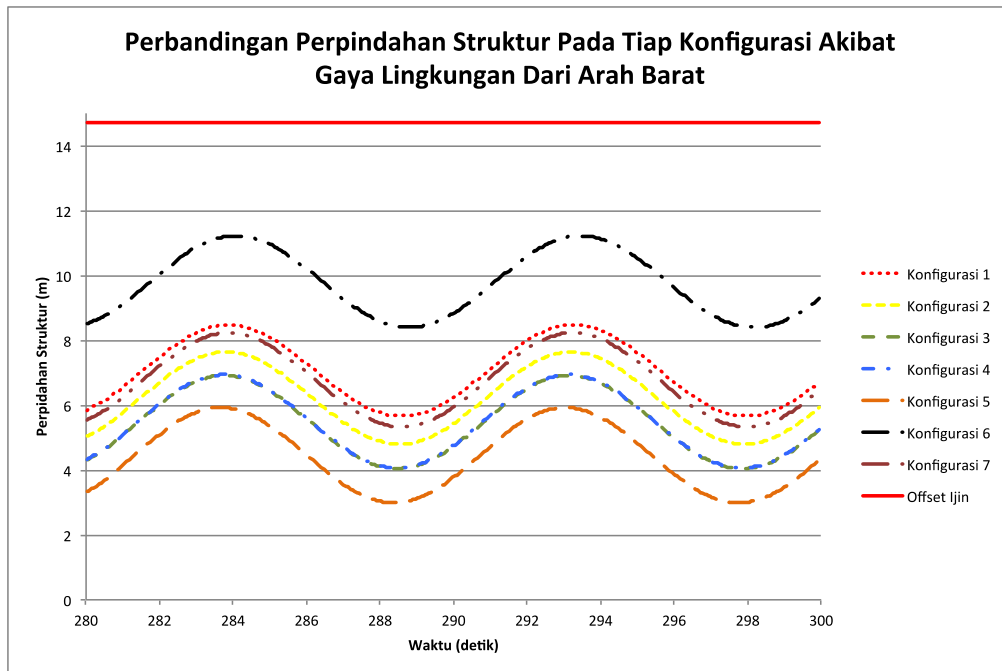
HASIL DAN ANALISIS



Gambar 6 Perbandingan perpindahan struktur pada tiap konfigurasi akibat gaya lingkungan dari arah Utara. Dapat diamati dari **Gambar 6** bahwa konfigurasi 5 dan 7 tidak memenuhi kriteria *offset* yang diijinkan. Secara umum perpindahan struktur akibat gaya lingkungan dari arah Utara semakin membesar seiring dengan membesarnya sudut horizontal relatif terhadap arah datang gaya lingkungan dari arah Utara.



Gambar 7 Perbandingan perpindahan struktur pada tiap konfigurasi akibat gaya lingkungan dari arah Barat Laut. Dapat diamati dari **Gambar 7** bahwa konfigurasi 5 dan 7 tidak memenuhi kriteria *offset* yang diijinkan. Secara umum perpindahan struktur akibat gaya lingkungan dari arah Utara semakin membesar seiring dengan membesarnya sudut horizontal relatif terhadap arah datang gaya lingkungan dari arah Utara.



Gambar 8 Perbandingan perpindahan struktur pada tiap konfigurasi akibat gaya lingkungan dari arah Barat. Dapat diamati dari **Gambar 8** bahwa seluruh konfigurasi memenuhi kriteria *offset* yang diijinkan. Secara umum perpindahan struktur akibat gaya lingkungan dari arah Barat semakin mengecil seiring dengan mengecilnya sudut horizontal relatif terhadap arah datang gaya lingkungan dari arah Barat.

Konfigurasi	Arah Datang Beban Lingkungan	Offset Maksimum (m)	Offset Minimum (m)	Gaya Tarik Maksimum Pada Fairlead (kN)					
				Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
1	Utara	8.52	5.23	4910.79	3381.25	2929.03	2929.03	3381.25	4910.79
	Barat Laut	8.53	5.24	3668.05	2985.19	2896.41	3194.76	4504.31	5196.80
	Barat	8.53	5.24	3070.25	2885.32	3070.25	4062.02	5298.94	4062.02
2	Utara	9.76	6.36	5275.92	3412.15	2914.44	2820.51	3347.96	4693.66
	Barat Laut	8.53	5.26	3891.84	3085.44	2896.28	3059.26	4277.12	5269.10
	Barat	7.68	4.47	3083.07	2966.47	3075.70	4045.37	5040.44	4305.07
3	Utara	11.43	7.87	5688.28	3344.66	2900.86	2721.66	3412.11	4446.51
	Barat Laut	9.78	6.41	4253.58	3122.73	2887.70	2894.99	4204.89	5245.12
	Barat	6.95	3.80	3152.75	3040.52	3073.01	3925.45	4841.75	4547.18
4	Utara	11.59	8.00	5126.45	3378.31	2784.19	2784.19	3378.31	5126.44
	Barat Laut	9.58	6.26	3816.87	3131.41	2831.05	3060.08	4183.47	5520.57
	Barat	6.97	3.81	3102.63	3037.74	3102.63	4256.79	4849.12	4256.79
5	Utara	19.57	15.16	5684.46	3368.11	2594.10	2594.10	3381.14	5684.46
	Barat Laut	15.15	11.32	4315.65	3251.05	2727.23	2882.65	3991.00	6007.89
	Barat	5.96	2.85	3167.77	3152.32	3167.77	4362.36	4594.79	4362.36
6	Utara	11.30	7.75	5267.67	-	2835.02	2835.02	-	5267.67
	Barat Laut	10.71	7.28	3459.65	-	2737.24	3459.65	-	6293.00
	Barat	11.30	7.75	2835.02	-	2835.02	5267.67	-	5267.67
7	Utara	19.28	14.96	5857.97	-	2630.74	2630.74	-	5857.97
	Barat Laut	14.88	11.13	4098.74	-	2686.58	3090.66	-	6537.33
	Barat	8.26	5.01	2987.64	-	2987.64	5052.56	-	5052.56

Tabel 1 Rangkuman perpindahan maksimum dan gaya tarik efektif maksimum yang terjadi pada setiap konfigurasi

Konfigurasi	Arah Datang	Offset Maksimum (m)	Komponen Offset Pada Tiap Sumbu		Gaya Tarik Pada Fairlead (kN) Saat Struktur Mengalami Offset Maksimum					
			Sumbu-X	Sumbu-Y	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
1	Utara	8.52	0.00	-8.52	4642.17	2585.90	1848.40	1848.40	2585.90	4642.17
	Barat Laut	8.53	6.02	-6.04	3047.97	1937.72	1797.14	2276.68	4166.64	4963.09
	Barat	8.53	8.53	0.00	2074.87	1780.19	2074.87	3608.85	5075.77	3608.85
2	Utara	9.76	-0.23	-9.76	5037.04	2617.85	1916.99	1820.80	2548.89	4371.87
	Barat Laut	8.53	5.06	-6.87	3306.43	1981.34	1783.48	2174.76	3896.49	5041.04
	Barat	7.68	7.68	0.37	2082.05	1801.63	1976.23	3584.09	4787.54	3928.74
3	Utara	11.43	0.23	-11.43	5469.85	2548.55	2003.98	1801.56	2607.24	4027.81
	Barat Laut	9.78	4.72	-8.56	3711.07	2005.83	1804.44	2068.96	3793.83	4995.15
	Barat	6.95	6.95	0.08	2112.10	1806.32	1881.06	3428.38	4557.73	4217.59
4	Utara	11.59	0.00	-11.59	4841.59	2578.89	1876.89	1876.89	2578.89	4841.59
	Barat Laut	9.58	4.64	-8.38	3045.38	2003.63	1766.89	2272.28	3783.27	5313.83
	Barat	6.97	6.97	0.00	1975.39	1805.89	1975.39	3863.06	4564.96	3863.06
5	Utara	19.57	0.00	-19.57	5397.78	2585.77	1875.64	1875.64	2585.77	5397.78
	Barat Laut	15.15	3.68	-14.70	3311.24	2062.27	1764.10	2172.27	3533.41	5806.54
	Barat	5.96	5.96	0.00	1911.32	1833.12	1911.32	4007.96	4282.46	4007.96
6	Utara	11.30	0.00	-11.30	5009.67	-	1902.45	1902.45	-	5009.67
	Barat Laut	10.71	7.57	-7.57	2671.25	-	1764.55	2671.25	-	6124.73
	Barat	11.30	11.30	0.00	1902.45	-	1902.45	5009.67	-	5009.67
7	Utara	19.28	0.00	-19.28	5600.07	-	1892.90	1892.90	-	5600.07
	Barat Laut	14.88	4.93	-14.03	3112.47	-	1762.54	2374.37	-	6369.19
	Barat	8.26	8.26	0.00	1924.08	-	1924.08	4709.88	-	4709.88

Tabel 2 Rangkuman perpindahan maksimum yang terjadi pada setiap konfigurasi serta gaya tarik efektif yang terjadi pada saat *offset* maksimum

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan serta teori yang telah dipaparkan pada bab-bab sebelumnya, dapat diambil beberapa simpulan sebagai berikut:

1. Konfigurasi 1 merupakan konfigurasi dengan performa terbaik saat menerima gaya lingkungan dari arah Utara dengan perpindahan paling kecil dibandingkan konfigurasi-konfigurasi lainnya. Hal ini disebabkan oleh konfigurasi 1 yang memiliki *mooring line* dengan sudut relatif terhadap arah datang gaya lingkungan dari arah Utara terkecil diantara konfigurasi lainnya, yaitu *line 1* dan 6.
2. Konfigurasi 1 dan 2 merupakan konfigurasi dengan performa terbaik saat menerima gaya lingkungan dari arah Barat Laut dengan perpindahan paling kecil dibandingkan konfigurasi-konfigurasi lainnya.
3. Konfigurasi 5 merupakan konfigurasi dengan performa terbaik saat menerima gaya lingkungan dari arah Barat dengan perpindahan paling kecil dibandingkan konfigurasi-konfigurasi lainnya. Hal ini disebabkan oleh konfigurasi 5 yang memiliki *mooring line* dengan sudut relatif terhadap arah datang gaya lingkungan dari arah Barat terkecil diantara konfigurasi lainnya yaitu *line 4* dan 6, serta satu *mooring line* yang sejajar menghadap arah datang gaya lingkungan dari arah Barat yaitu *line 5*.
4. Gaya tarik terbesar dari seluruh konfigurasi dialami oleh *line 6* pada konfigurasi 7 dengan gaya lingkungan dari arah Barat Laut.
5. Tidak seperti yang diperkirakan, konfigurasi 5 mengalami perpindahan akibat gaya lingkungan dari arah Utara yang lebih besar daripada konfigurasi 7. Penulis memperkirakan fenomena ini terjadi karena konfigurasi 5 menerima gaya seret pada *mooring line* yang lebih besar karena memiliki dua *mooring line* lebih banyak dari konfigurasi 7, tetapi gaya pemulih yang dimiliki oleh konfigurasi 5 lebih besar dari konfigurasi 7, sehingga perbedaan yang terjadi tidak terlalu besar. Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai fenomena ini.
6. Secara umum, konfigurasi 1 merupakan konfigurasi terbaik di antara konfigurasi lainnya dengan perpindahan akibat gaya lingkungan dari berbagai arah relatif

konsisten dan memenuhi *offset* maksimum yang diijinkan.

7. Gelombang acak menyebabkan pergerakan struktur memiliki rentang antara perpindahan maksimum dan perpindahan minimum yang lebih besar daripada gelombang reguler.
8. Gaya lingkungan yang paling berpengaruh terhadap perilaku dinamik struktur spar pada studi ini adalah gaya arus, karena spar Neptune merupakan spar jenis klasik dengan luas permukaan lambung yang besar dengan sebagian besar bagiannya berada di bawah permukaan air.
9. Secara umum, performa *mooring line* dalam mempertahankan posisi struktur berkurang dengan menjauhnya *mooring line* dari arah datang gaya lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Leffler, W. L., Pattarozzi, R. dan Sterling, G. (2011). *Deepwater Petroleum Exploration and Production: a Nontechnical Guide*. Tulsa: Pennwell.
- [2] Chakrabarti, Subrata K. (2005). *Handbook of Offshore Engineering Volume 1*. Oxford: Elsevier.
- [3] Chakrabarti, Subrata K. (1987). *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Dorchester: Henry Ling Ltd.
- [4] Paz, Mario dan Leigh, William. (2004). *Structural Dynamics: Theory and Computation 5th edition*. Norwell: Kluwer Academic Publishers.
- [5] Faltinsen, O.M. (1990). *Sea Loads On Ships and Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [6] Det Norske Veritas. (2013). *DNV-OS-E301 Position Mooring*.
- [7] American Petroleum Institute. (2005). *API RP 2SK Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structure*.