

Desain Konseptual PLTN Terapung di Indonesia Timur: Respon Gerak terhadap Beban Lingkungan

Muh. Asyhari Ramadhan*, Muh. Hadid Kaharuddin, A. Muh. Ikram, Fuad Mahfud Assidiq

Departemen Teknik Kelautan, Universitas Hasanuddin

*asyhariramadhan17@gmail.com

Abstrak

Indonesia Timur memiliki karakteristik kepulauan dengan distribusi energi yang belum merata, sehingga diperlukan sumber energi alternatif yang andal, berkelanjutan, dan mampu menjangkau daerah terpencil. Salah satu solusi yang potensial adalah Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) terapung yang dapat ditempatkan di perairan sekitar wilayah kepulauan. Energi nuklir, dengan emisi karbon sangat rendah dan kapasitas listrik besar, menjadi opsi potensial. konseptual PLTN terapung serta respons gerak instalasi terhadap beban lingkungan seperti gelombang laut, angin, dan potensi tsunami yang khas di wilayah Indonesia Timur. Studi ini menganalisis parameter oseanografi seperti kedalaman laut, jarak pulau ke PLTN, kecepatan arus, dan jarak ke garis pantai, dengan lokasi potensial di Pulau Halmahera yang memiliki kondisi perairan stabil dengan kedalaman sekitar 100 meter dan jarak ke pulau kurang dari 30 km. Lokasi ini juga dekat dengan pusat pemukiman, lokasi ini mempertimbangkan aspek keamanan, logistik, dan potensi dukungan terhadap pengembangan ekonomi biru. Metode studi literatur dan simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS pada model *offshore floating nuclear power plants* (OFNP) tipe SPAR menunjukkan bahwa sistem mooring yang efektif dan desain optimal diperlukan untuk menjaga stabilitas dan operasional jangka panjang PLTN terapung serta distribusi energi listrik ke Pulau Halmahera. Sesuai dengan tujuan SDGs nomor 7 tentang energi bersih dan terjangkau serta SDGs nomor 9 tentang industri, inovasi, dan infrastruktur, desain ini diharapkan menjadi rekomendasi strategis dalam pengembangan PLTN terapung di wilayah Indonesia Timur.

Kata Kunci: *Ekonomi biru, Indonesia Timur, Offshore Floating Nuclear Power Plants (OFNP), Respon gerak instalasi, Stabilitas platform, Simulasi ANSYS*

Abstract

Eastern Indonesia is characterized by an archipelagic geography with uneven energy distribution, thus requiring alternative energy sources that are reliable, sustainable, and capable of reaching remote areas. One potential solution is the deployment of Floating Nuclear Power Plants (FNPP) in offshore waters around the archipelago. Nuclear energy, with its very low carbon emissions and high electricity generation capacity, is considered a promising option. This study focuses on the conceptual design of a floating nuclear power plant and the motion response of the installation under environmental loads such as ocean waves, wind, and tsunami potential, which are typical in Eastern Indonesia. Oceanographic parameters such as water depth, distance from the island to the FNPP, current velocity, and proximity to the shoreline were analyzed, with Halmahera Island identified as a potential site due to its stable marine conditions, approximately 100 meters in depth, and a distance of less than 30 km from the coast. The site also benefits from proximity to settlements while considering safety, logistics, and potential support for blue economy development. A literature study and simulation using ANSYS software on an Offshore Floating Nuclear Power Plant (OFNP) SPAR-type model demonstrate that an effective mooring system and optimal design are required to maintain long-term stability and operational performance of the FNPP, as well as to ensure reliable electricity distribution to Halmahera Island. In line with SDG 7 (Affordable and Clean Energy) and SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), this design is expected to serve as a strategic recommendation for the development of floating nuclear power plants in Eastern Indonesia.

Keywords: *Blue economy, Eastern Indonesia, Offshore Floating Nuclear Power Plants (OFNP), Motion response, Platform stability, ANSYS simulation.*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia dengan lebih dari 17.000 pulau [1], dengan menghadapi tantangan signifikan dalam elektrifikasi wilayah timur yang terpencil, yang di mana keterbatasan akses dan kualitas pasokan listrik sering sekali terjadi. Seiring dengan pertumbuhan populasi dan peningkatan kebutuhan energi, urgensi pengembangan sumber energi yang andal, bersih, dan berkelanjutan menjadi krusial [7], [14]. Dalam konteks ini, Floating Nuclear Power Plant (FNPP) berbasis Small Modular Reactor (SMR) muncul sebagai solusi inovatif, menawarkan mobilitas tinggi, modularitas, dan emisi karbon rendah, sangat sesuai untuk memenuhi kebutuhan energi baseload di daerah kepulauan terpencil



[4], [12], [13]. Studi ini mengeksplorasi kelayakan konseptual FNPP dengan studi kasus Desa Dote, Halmahera Tengah, yang memiliki karakteristik perairan mendukung. Urgensi penelitian ini terletak pada potensi FNPP untuk mengatasi krisis energi di kawasan timur Indonesia dan mempercepat pencapaian target elektrifikasi nasional, khususnya di wilayah 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal) [6], [18]. Manfaat studi ini adalah menyediakan landasan ilmiah bagi pengembangan kebijakan energi dan investasi infrastruktur ketenagalistrikan yang berkelanjutan, mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs 7 dan 9), serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil [10], [20]. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik geografis dan oseanografi lokasi, mengevaluasi desain SMR ThorCon dalam menjamin keamanan dan efisiensi instalasi, serta menilai potensi surplus listrik dan tantangan ekonomi-sosial implementasi FNPP, guna memberikan kontribusi pemahaman implementasi teknologi ini di wilayah kepulauan.

METODOLOGI

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif dan kualitatif secara sistematis untuk mengembangkan konsep Floating Nuclear Power Plant (FNPP) yang disesuaikan dengan kebutuhan kelistrikan di pulau-pulau terpencil kawasan Indonesia timur. Tahapan awal melibatkan pengumpulan data sekunder komprehensif dari jurnal ilmiah bereputasi, laporan teknis lembaga internasional seperti International Atomic Energy Agency (IAEA), Russian Maritime Register of Shipping (RS) dan International Maritime Organization (IMO), serta dokumen industri (misalnya ThorCon, Rosatom) dan regulasi nasional maupun internasional terkait energi nuklir dan keselamatan maritim [5], [13], [15], [16]. Selanjutnya, dilakukan perancangan awal FNPP, meliputi pemilihan Small Modular Reactor (SMR) yang sesuai, penentuan kapasitas daya, dan optimalisasi struktur modular [4], [20]. Kajian sistem penambatan (mooring) dan stabilitas FNPP dianalisis berdasarkan karakteristik oseanografi perairan lokal. Analisis SMR mendalam dilakukan untuk memastikan kompatibilitas teknologi dengan kebutuhan energi dan aspek keselamatan [19]. Penelitian juga mencakup simulasi proses instalasi, serta perencanaan logistik pengangkutan FNPP menggunakan kapal (dry/wet towed) [11], [17].

Sistem penambatan 3×3 dirancang untuk mengantisipasi gerak berlebih akibat gelombang ekstrem, mempertimbangkan kondisi tanah lunak di perairan Desa Dote dan kedalaman lokasi FNPP sekitar 150 meter yang gambar teknisnya terdapat pada Lampiran 1 Gambar 13, dengan spesifikasi tali tambat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Tali Tambat

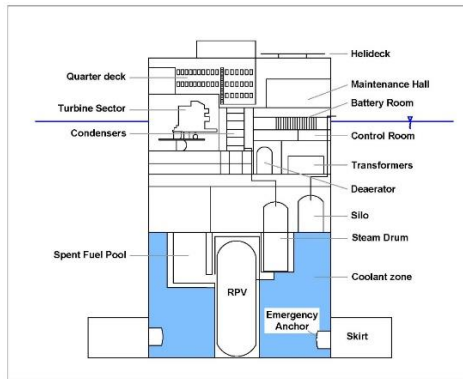
<i>Length (m)</i>	420
<i>Mass/Unit Length (Kg/m)</i>	370
<i>Equivalent CSA (m²)</i>	0,09
<i>Stiffness, EA (kN)</i>	800.000
<i>Maximum Tension (kN)</i>	11.981
<i>Added Mass Coefficient</i>	1
<i>Transverse Drag Coefficient</i>	2,4
<i>Equivalent Diameter (m)</i>	0,13
<i>Longitudinal Drag Coefficient</i>	1,15

HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain FNPP

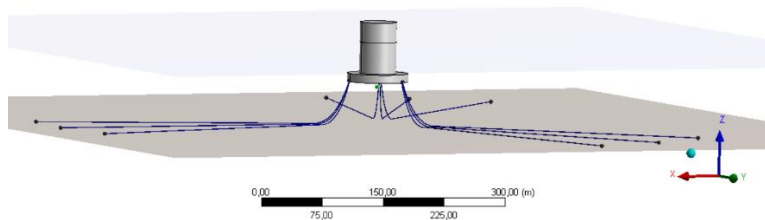
Pengembangan Floating Nuclear Power Plant (FNPP) di Indonesia sejalan dengan ketersediaan cadangan bahan bakar nuklir domestik, yaitu sekitar 90 ribu ton uranium dan 140 ribu ton thorium. Dukungan ini memperkuat pertimbangan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) untuk mengimplementasikan PLTN Terapung di kawasan timur [6], [7]. Sebelum operasional, setiap desain dan teknologi FNPP di Indonesia harus melalui proses pra-perizinan ketat yang diatur oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir [3] untuk memastikan kepatuhan terhadap standar keselamatan, keamanan, dan safeguards nuklir.

Reaktor ini dirancang dengan kapasitas daya panas 557 MW(t) dan daya listrik 250 MW(e). Struktur FNPP didesain dengan mempertimbangkan stabilitas dan ketahanan terhadap lingkungan laut [4], [15]. Umumnya berbentuk silinder dengan diameter 45 meter dan tinggi total 73 meter, dengan draft sekitar 48,5 meter untuk menjaga stabilitas. Dimensi ini disesuaikan untuk menghadapi kondisi gelombang ekstrem kala ulang 100 tahunan (Hs 1,16 m, Tp 7,16 detik), memastikan freeboard minimum 15 meter untuk mencegah overtopping dan menjamin keselamatan. Desain modular berbasis barge atau spar memfasilitasi pengangkutan dan penempatan di lokasi terpencil atau Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) [5], [17]. Komponen internal FNPP mencakup inti reaktor di tangki balas, steam drum, sektor turbin, kondensor, ruang kontrol, ruang perbaikan, silo bahan bakar baru, spent fuel pool, dan transformator.



Gambar 1. Komponen utama desain *floating nuclear power plant (FNPP)*

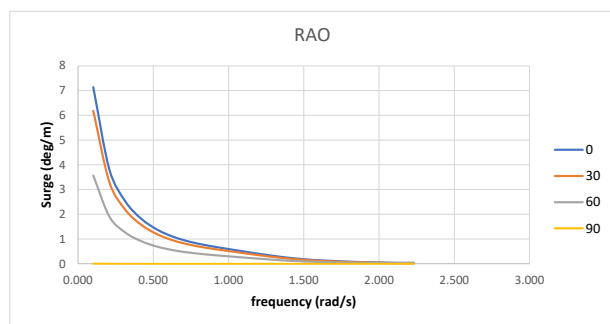
Distribusi listrik dari FNPP ke daratan dilakukan melalui kabel bawah laut sepanjang ±1,44 km menuju gardu listrik di darat. Di gardu, arus listrik melalui step-load transformer untuk penyesuaian tegangan, diikuti oleh sistem proteksi dan kendali (surge counter, capacitor bank, protection relay).



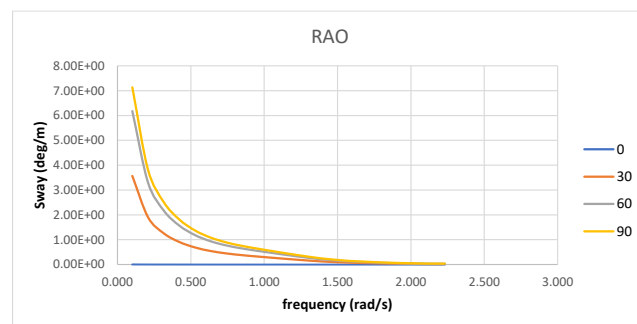
Gambar 2. Desain struktur dan tali tambat FNPP

Struktur desain *floating nuclear power plant* dengan system mooring ini menggunakan 9 tali yang digunakan untuk menjaga kestabilan di perairan desa dote. Konfigurasi ini dapat menahan gaya gelombang ekstrem dari berbagai arah dan juga mencegah gerakan yang berlebih. Pada kedalaman 150 meter digunakan material tali tambat yang mampu menahan terhadap beban tarik serta gerakan siklik [8], [15].

Respon FNPP terhadap Gelombang Reguler (RAO)



Grafik 1. Respon FNPP terhadap Gelombang Reguler (RAO), *Surge*

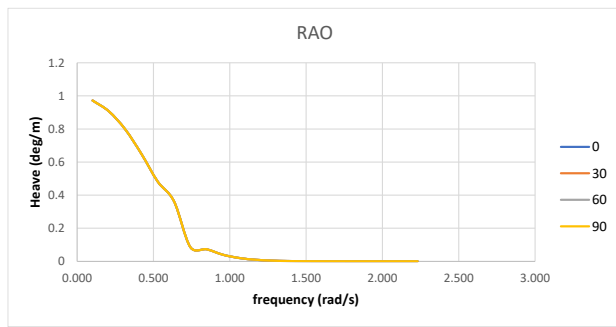


Grafik 2. Respon FNPP terhadap Gelombang Reguler (RAO), *Sway*

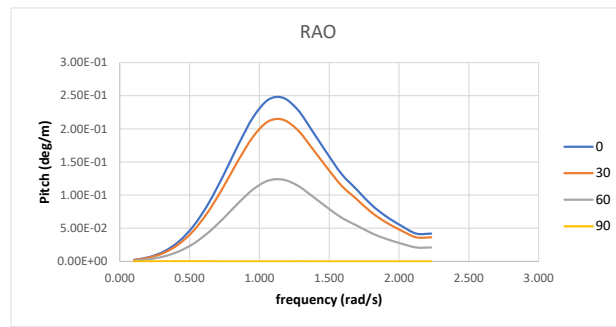
Grafik RAO *Surge*, menunjukkan bahwa gerakan surge terbesar terjadi pada gelombang arah 0° dan 30° pada frekuensi rendah. Pada sudut 60° respons surge lebih rendah, terjadi penurunan drastis seiring kenaikan frekuensi, sedangkan pada 90° hampir tidak ada respons surge. Hal ini menandakan surge dominan dipengaruhi gelombang longitudinal dan sangat kecil terhadap gelombang samping.

Grafik RAO *sway*, menunjukkan bahwa respons sway terbesar terjadi pada sudut datang gelombang 90° dan 60° pada frekuensi rendah, kemudian terjadi penurunan drastis seiring kenaikan frekuensi hingga mendekati nol di atas 2 p/s. Pada sudut 30° respons sway lebih kecil, sedangkan pada 0° hampir tidak ada respons sama sekali.





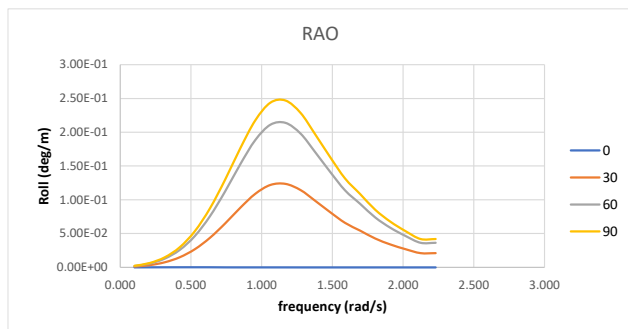
Grafik 3. Respon FNPP terhadap Gelombang Reguler (RAO), *Heave* Reguler (RAO), *Pitch*



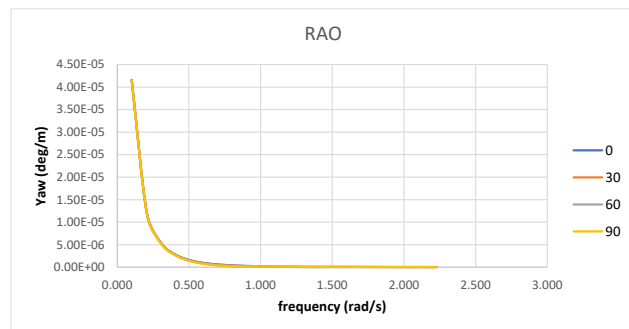
Grafik 4. Respon FNPP terhadap Gelombang Reguler (RAO), *Pitch*

Grafik RAO heave, menunjukkan bahwa respons heave relatif sama untuk semua arah datang gelombang (0°, 30°, 60°, 90°). Nilai RAO heave cukup tinggi pada frekuensi rendah (sekitar 1 deg/m), kemudian terjadi penurunan seiring kenaikan frekuensi dan mendekati nol setelah sekitar 1,5–2 rad/s.

Grafik RAO pitch, menunjukkan respons terbesar terjadi pada arah gelombang 0° dan 30°, dengan puncak nilai RAO sekitar frekuensi 1–1,2 rad/s. Pada arah 60° respons lebih kecil, sedangkan pada 90° hampir tidak ada gerakan pitch. Setelah melewati frekuensi puncak, nilai RAO menurun kembali seiring bertambahnya frekuensi.



Grafik 5. Respon FNPP terhadap Gelombang Reguler (RAO), *Roll* Reguler (RAO), *Yaw*

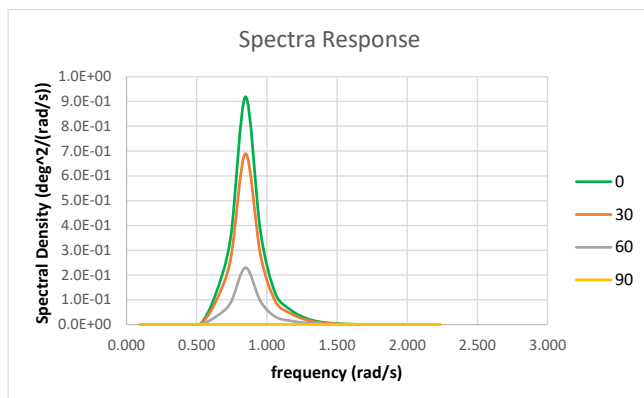


Grafik 6. Respon FNPP terhadap Gelombang Reguler (RAO), *Yaw*

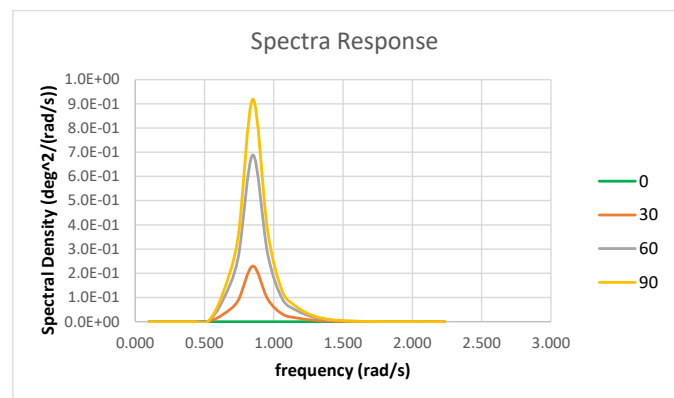
Grafik RAO roll, menunjukkan bahwa respons terbesar terjadi pada arah gelombang 90° (tegak lurus) dan 60°, dengan puncak nilai RAO sekitar frekuensi 1–1,2 rad/s. Pada sudut 30° respons lebih kecil, sedangkan pada 0° hampir tidak ada gerakan roll. Setelah melewati frekuensi puncak, nilai RAO menurun kembali seiring bertambahnya frekuensi.

Grafik RAO yaw, menunjukkan bahwa respons yaw sangat kecil untuk semua arah gelombang. Nilai RAO hanya sedikit meningkat pada frekuensi sangat rendah, kemudian langsung menurun tajam dan mendekati nol pada frekuensi di atas 0,5 rad/s. Kurva dari semua arah (0°, 30°, 60°, dan 90°) hampir berimpit, menandakan bahwa arah gelombang tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap yaw.

Respon FNPP terhadap Gelombang Irreguler (Spectra Response)



Grafik 7. Respon FNPP (*Spectra Response*), *Surge*

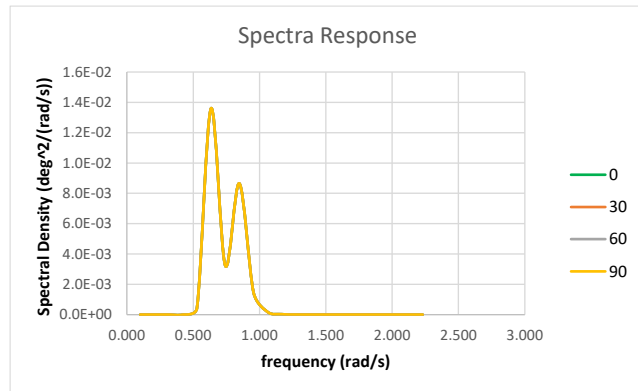


Grafik 8. Respon FNPP (*Spectra Response*), *Pitch*

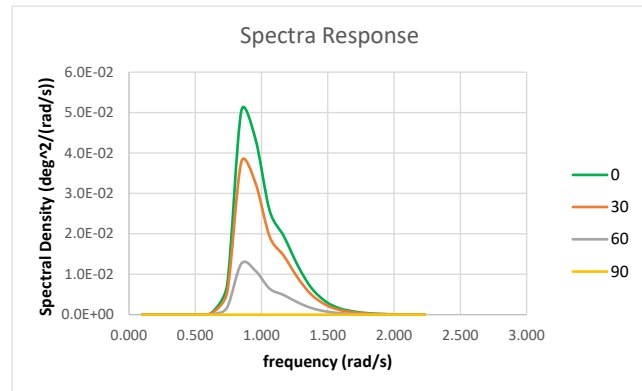
Sway

Grafik *Spectra Response Surge*, menunjukkan bahwa puncak *respons spectra* terjadi pada frekuensi sekitar 1 rad/s dengan nilai tertinggi untuk arah gelombang 0°, disusul oleh 30°, sedangkan pada 60° *respons* lebih rendah, dan pada 90° hampir tidak ada *respons*. Setelah melewati frekuensi puncak, nilai spektral menurun tajam hingga mendekati nol.

Grafik *Spectra Response Sway* ini, puncak *respons spectra* terjadi pada frekuensi sekitar 1 rad/s dengan nilai tertinggi pada arah gelombang 90°, diikuti oleh 60°, sedangkan pada 30° *respons* lebih kecil, dan pada 0° hampir tidak ada *respons*. Setelah melewati frekuensi puncak, semua kurva menurun tajam hingga mendekati nol.



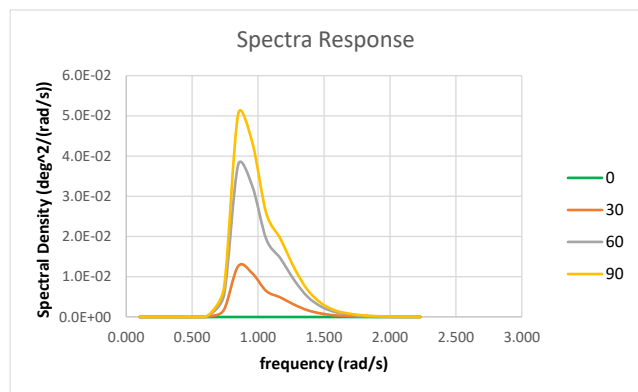
Grafik 9. Respon FNPP (*Spectra Response*), Pitch



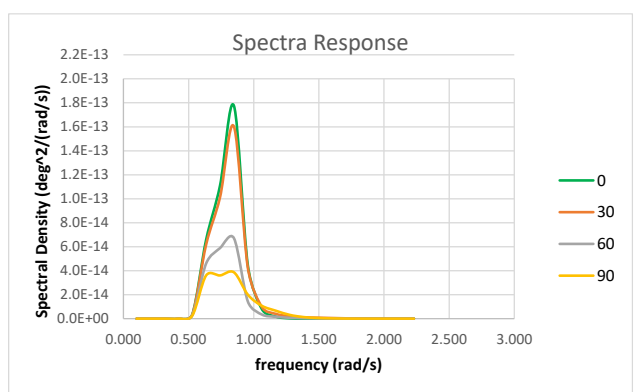
Grafik 10. Respon FNPP (*Spectra Response*), Heave

Grafik *Spectra Response pitch* ini, menunjukkan adanya dua puncak utama pada frekuensi sekitar 0,6 rad/s dan 0,9 rad/s, dengan nilai yang relatif sama untuk semua arah gelombang (0°, 30°, 60°, dan 90°). Setelah melewati puncak tersebut, *respons spectra* menurun tajam hingga mendekati nol pada frekuensi di atas 1,2 rad/s.

Grafik *Spectra Response heave* ini, menunjukkan bahwa *respons spectra* tertinggi terjadi pada frekuensi sekitar 1 rad/s dengan nilai paling besar pada arah gelombang 0°, diikuti 30°, kemudian 60°, sedangkan pada 90° hampir tidak ada *respons*. Setelah mencapai puncak, *respons* menurun tajam hingga mendekati nol pada frekuensi di atas 1,5 rad/s.



Grafik 11. Respon FNPP (*Spectra Response*), Roll



Roll Grafik 12. Respon FNPP (*Spectra Response*), Yaw

Grafik *Roll* ini menunjukkan bahwa *respons* terbesar terjadi saat gelombang datang dari arah samping (90° dan 60°), sedangkan dari arah depan (0°–30°) responnya jauh lebih kecil. Hal ini menandakan struktur lebih sensitif terhadap gelombang samping dibandingkan gelombang depan.

Grafik *Yaw* ini menunjukkan *respons spectra* yang jauh lebih kecil dibanding grafik sebelumnya, dengan puncak hanya sekitar orde 10^{-13} – 10^{-14} . Nilai sekecil ini biasanya menandakan respon struktur sangat rendah terhadap energi gelombang pada semua arah (0°, 30°, 60°, 90°). Jadi, dari sisi stabilitas dinamis, kondisi ini relatif aman karena amplitudo getarannya tidak signifikan.

Nilai Stokastik FNPP



Tabel 2. Most probable surge/6dof amplitude

Mode	Arah Pembebanan (°)	T0 (s)	ζ_{ext} (m°)	Kriteria	Status
Surge	0	7.243	1.825	12 m	Memenuhi
	30	7.243	1.580		Memenuhi
	60	7.243	0.912		Memenuhi
	90	6.958	0.000		Memenuhi
Sway	0	7.583	0.000		Memenuhi
	30	7.243	0.912		Memenuhi
	60	7.243	1.580		Memenuhi
	90	7.243	1.825		Memenuhi
Heave	0	8.635	0.226	1.3m	Memenuhi
	30	8.635	0.226		Memenuhi
	60	8.635	0.226		Memenuhi
	90	8.635	0.226		Memenuhi
Roll	0	7.540	0.000	45°	Memenuhi
	30	6.234	0.266		Memenuhi
	60	6.234	0.461		Memenuhi
	90	6.234	0.532		Memenuhi
Pitch	0	6.234	0.532		Memenuhi
	30	6.234	0.461		Memenuhi
	60	6.234	0.266		Memenuhi
	90	6.723	0.000		Memenuhi
Yaw	0	7.844	0.000	-	-
	30	7.753	0.000		-
	60	8.065	0.000		-
	90	7.629	0.000		-

Studi kelayakan Floating Nuclear Power Plant (FNPP) melibatkan evaluasi komprehensif terhadap aspek teknis dan ekonomis [18], [20]. Berdasarkan simulasi respons gerak dinamis, FNPP menunjukkan stabilitas yang sangat baik terhadap beban ekstrem. Mode gerak Surge dan Sway mencapai nilai maksimum 1.825 m, jauh di bawah batas kriteria 12 m. Heave mencapai 0.226 m (kriteria 1.3 m), sementara Roll dan Pitch menunjukkan nilai masing-masing 0.532°, jauh di bawah kriteria 45°. Meskipun mode Yaw tidak memiliki batas kriteria eksplisit, nilai maksimumnya 0.000°, mengindikasikan pergerakan rotasi yang minimal [4], [19].

KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa semua mode gerakan utama (surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw) yang terjadi masih berada dalam batas kriteria desain yang ditetapkan. Nilai perpindahan, amplitudo, maupun sudut miring seluruhnya memenuhi standar kelayakan, sehingga struktur PLTN terapung ini dapat dinyatakan stabil, aman dan juga dapat beroperasi pada kondisi di perairan desa Dote, pulau Halmahera [4], [15], [19].

REFERENSI

- [1] A. Abdurrahman, *Kabupaten Halmahera Tengah Dalam Angka 2024*, 1st ed. Indonesia: Badan Pusat Statistik, 2024.
- [2] M. Alabid, C.-C. Cormos, and C. Dinca, “Critical assessment of membrane technology integration in a coal-fired power plant,” *Membranes*, vol. 12, no. 9, 2022.
- [3] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, *Rekomendasi Kebijakan Pra Perizinan PLTN di Indonesia*. Indonesia: BSR E, 2023.



- [4] J. Buongiorno, J. Jurewicz, M. Golay, and N. Todreas, "The offshore floating nuclear plant concept," *Nuclear Technology*, vol. 194, no. 1, pp. 1–14, 2017.
- [5] International Maritime Organization, *Future Guidelines for Floating Nuclear Power Plants*, 2019.
- [6] I. Julian, "RI eyes floating nuclear power plants for Eastern regions, targets first on-grid reactor by 2029," 2025.
- [7] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, *Konsumsi Listrik Masyarakat Meningkat, Tahun 2023 Capai 1.285 Kwh/Kapita*, 2024.
- [8] V. Kindfuller, N. Todreas, and J. Buongiorno, "Overview of security plan for offshore floating nuclear plant," in *Proceedings of the 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE24)*. ASME, 2016.
- [9] Thorcon, *Thorcon Ajukan Permohonan Pembangunan PLTN Pertama di Indonesia*, 2025.
- [10] World Nuclear Association, *Global Nuclear Industry Performance*, 2024.
- [11] World Nuclear Association, *Pengangkutan Bahan Radioaktif*, 2025.
- [12] H. Zhang, "Research on the versatility of Arctic marine nuclear power plant," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 784, no. 1, p. 012031, 2021.
- [13] International Atomic Energy Agency, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Vienna, Austria: IAEA, 2022.
- [14] International Energy Agency, *Electricity Market Report 2023*. Paris, France: IEA, 2023.
- [15] International Atomic Energy Agency, *Floating Nuclear Power Plants: A Technical Overview*. Vienna, Austria: IAEA, 2021.
- [16] Rosatom, *Akademik Lomonosov Floating Nuclear Power Plant Performance Report*. Moscow, Russia: Rosatom State Atomic Energy Corporation, 2024.
- [17] United Nations Conference on Trade and Development, *Review of Maritime Transport 2023*. New York, NY, USA: United Nations, 2023.
- [18] B. Prasetyo and R. Hidayat, "Analisis potensi pengembangan pembangkit listrik tenaga nuklir terapung di wilayah kepulauan Indonesia," *Jurnal Energi dan Teknologi*, vol. 15, no. 2, pp. 45–56, 2022.
- [19] M. Siregar, D. Putra, and A. Wijaya, "Kajian keamanan reaktor modular kecil untuk wilayah pesisir Indonesia," *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*, vol. 25, no. 1, pp. 12–24, 2023.
- [20] OECD Nuclear Energy Agency, *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*. Paris, France: OECD-NEA, 2024.