

Analisis Respons Gerak Enam Derajat Kebebasan PLTN Terapung Tipe SPAR di perairan Halmahera: Studi Konseptual Berbasis ANSYS-AQWA

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

Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

*asyhariramadhan17@gmail.com

Abstract

Reliable electricity supply for the archipelagic regions of Eastern Indonesia motivates the assessment of floating nuclear power plants (FNPPs) as low-carbon baseload sources. This study revises and expands a conceptual motion-response assessment of a 250 MWe spar-type FNPP proposed for Halmahera waters. The model base consists of a 45 m diameter cylindrical structure, a total height of 73 m, a draft of 48.5 m, a modeled water depth of 150 m, and a nine-line spread-mooring system. Hydrodynamic behavior is evaluated in the frequency domain using a six-degree-of-freedom framework and the ANSYS-AQWA outputs available from the original study. Regular-wave responses are interpreted through response amplitude operators (RAOs), while irregular-wave behavior is assessed through response spectra and stochastic amplitudes. Directional patterns are physically consistent: maximum surge is 1.825 m at 0° wave heading, maximum sway is 1.825 m at 90°, heave is 0.226 m for all headings, maximum roll is 0.532° at 90°, and maximum pitch is 0.532° at 0°. All responses remain below the adopted screening criteria of 12 m for surge/sway, 1.3 m for heave, and 45° for roll/pitch. Nevertheless, satisfying these thresholds demonstrates only preliminary hydrodynamic feasibility and does not constitute a nuclear safety case. Site-specific metocean validation, mooring-line tension and one-line-damaged analyses, nonlinear time-domain simulations, tsunami assessment, and qualification of safety-related equipment are required before advancing the concept to a technical pre-feasibility stage.

Keywords: ANSYS-AQWA, floating nuclear power plant, Halmahera, mooring, motion response, RAO, SPAR

PENDAHULUAN

Indonesia menghadapi persoalan ketenagalistrikan yang berbeda antara pusat beban besar dan wilayah kepulauan terpencil. Karakter geografis Halmahera, sebaran permukiman, pertumbuhan industri, serta kebutuhan layanan publik menuntut pasokan yang tidak hanya cukup secara energi, tetapi juga stabil secara frekuensi dan tersedia sepanjang waktu. Publikasi statistik Halmahera Tengah menyediakan basis awal untuk memahami kondisi geografis, sosial, dan ekonomi wilayah studi [1], sedangkan data nasional menunjukkan bahwa konsumsi listrik per kapita terus meningkat dan membutuhkan kesiapan pasokan serta penguatan jaringan [2]. Dalam konteks ini, pembangkit modular yang dapat dibangun terpusat, dipindahkan ke lokasi, dan dihubungkan ke sistem pulau menjadi topik yang relevan untuk dianalisis secara bertahap.

Small Modular Reactor (SMR) menawarkan rentang daya dan konfigurasi yang lebih fleksibel dibandingkan PLTN konvensional berkapasitas sangat besar. Katalog teknologi IAEA menunjukkan berkembangnya berbagai desain SMR dengan aplikasi listrik, panas proses, hidrogen, dan desalinasi [3]. Kajian IAEA tentang PLTN terapung juga menegaskan bahwa pemanfaatan platform laut dapat memberi peluang fabrikasi di galangan, pengendalian mutu terpusat, dan penyediaan energi bagi wilayah terpencil, tetapi sekaligus menambah isu lintas rezim keselamatan nuklir, keselamatan maritim, keamanan, safeguards, transportasi, dan tanggung jawab kelembagaan [4]. Oleh karena itu, PLTN terapung tidak dapat diperlakukan hanya sebagai platform offshore biasa atau hanya sebagai instalasi nuklir darat yang dipindahkan ke laut.

Konsep Offshore Floating Nuclear Plant (OFNP) yang dikembangkan Buongiorno dkk. menggabungkan teknologi reaktor air ringan dengan platform laut dalam untuk mengurangi paparan terhadap bahaya gempa dan menyediakan ultimate heat sink yang besar [5]. Kajian hidrodinamika MIT terhadap konfigurasi OFNP menunjukkan bahwa karakter bentuk lambung, draft, distribusi massa, dan sistem penambatan menentukan heave, pitch, serta respons pada kondisi badai [6]. Penelitian yang lebih baru juga mengembangkan analisis struktur PLTN terapung menggunakan modul hidrodinamika ANSYS, termasuk respons domain frekuensi dan pemindahan beban ke model struktur [7]. Sementara itu, studi terhadap platform silinder dengan multi-point mooring menunjukkan bahwa arah gelombang dan konfigurasi tali tambat memengaruhi respons gerak dan karakteristik tegangan secara nyata [8]. Temuan tersebut menempatkan analisis gerak enam derajat kebebasan sebagai salah satu pemeriksaan awal sebelum penilaian keselamatan sistem reaktor, kelistrikan, dan operasi laut.



Naskah awal penelitian ini telah menyajikan desain konseptual tipe SPAR, kurva RAO, spektrum respons, dan amplitudo stokastik untuk empat arah datang gelombang. Namun, terdapat beberapa isu yang perlu diperbaiki agar hasil dapat dibaca secara ilmiah: kedalaman lokasi disebut sekitar 100 m pada satu bagian tetapi 150 m pada model mooring; jarak umum ke pulau kurang dari 30 km berbeda dengan panjang kabel ekspor 1,44 km; satuan RAO translasi dan rotasi pada grafik belum dibedakan secara tepat; kriteria gerak belum dijelaskan sumber dan statusnya; serta kesimpulan “aman” belum dipisahkan dari kelayakan hidrodinamika awal. Dalam revisi ini, kedalaman 150 m dipakai sebagai basis model karena konsisten dengan konfigurasi mooring, sedangkan 1,44 km diperlakukan sebagai asumsi panjang kabel pada konsep rinci dan bukan representasi seluruh kriteria penentuan lokasi.

Tujuan penelitian adalah: (1) menyusun ulang basis desain dan asumsi numerik secara transparan; (2) menjelaskan formulasi respons gerak enam derajat kebebasan, RAO, dan spektrum respons; (3) menginterpretasikan hasil ANSYS-AQWA untuk surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw; (4) menilai rasio respons terhadap kriteria penyaringan yang digunakan; serta (5) merumuskan kebutuhan analisis lanjutan untuk mooring, metocean, tsunami, kabel daya, dan kualifikasi peralatan nuklir. Ruang lingkup penelitian adalah studi konseptual berbasis data dan keluaran simulasi yang tersedia. Tidak dilakukan simulasi ulang, pengujian model fisik, atau verifikasi independen terhadap file model ANSYS asli.

LANDASAN TEORI

Konsep PLTN Terapung Tipe SPAR

Platform SPAR memiliki badan utama berbentuk silinder dengan draft besar dan luas bidang air relatif kecil. Konfigurasi tersebut memberikan kekakuan hidrostatik yang tinggi terhadap roll dan pitch serta memindahkan sebagian besar volume terendam ke bawah permukaan gelombang. Untuk PLTN terapung, stabilitas gerak pendingin, level cairan, peralatan putar, sambungan kabel, akses personel, dan prosedur darurat. Meskipun konsep laut dapat mengurangi beberapa bahaya tapak darat, evaluasi tapak tetap harus mengikuti pendekatan berjenjang yang mencakup kejadian eksternal alami dan akibat ulah manusia [9]. Bahaya meteorologi dan hidrologi perlu dikarakterisasi berdasarkan data lokasi dan ketidakpastian, bukan hanya satu pasangan tinggi dan periode gelombang [10]. Bahaya seismik, deformasi dasar laut, longsor bawah laut, dan sumber tsunami juga harus dipertimbangkan pada penilaian tapak [11].

PLTN terapung termasuk keluarga transportable nuclear power plants sehingga menimbulkan pertanyaan tentang yurisdiksi, perizinan, kepemilikan, transportasi bahan bakar, pengelolaan limbah, keamanan fisik, dan tanggap darurat lintas lembaga [12]. Di Indonesia proses konsultasi pra-perizinan 3S yang mencakup safety, security, dan safeguards telah mulai digunakan sebagai mekanisme awal untuk calon pelaku usaha PLTN [13]. Artinya, desain hidrodinamika harus dikembangkan bersamaan dengan arsitektur perizinan dan bukan menunggu sampai struktur platform selesai didefinisikan.

Persamaan Gerak Enam Derajat Kebebasan

Gerak platform terapung direpresentasikan oleh tiga translasi, yaitu surge (arah x), sway (arah y), dan heave (arah z), serta tiga rotasi, yaitu roll, pitch, dan yaw. Dalam analisis linear domain frekuensi, persamaan gerak dapat dituliskan sebagai:

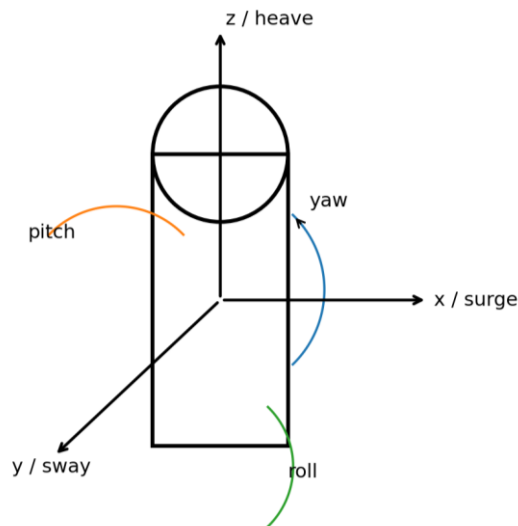
$$[-\omega^2(M + A(\omega)) + i\omega B(\omega) + C]\xi(\omega) = F_{exc(\omega)} \quad (1)$$

dengan M adalah matriks massa dan momen inersia struktur, $A(\omega)$ matriks added mass, $B(\omega)$ matriks radiation damping, C matriks kekakuan hidrostatik dan kontribusi linearized mooring, $\xi(\omega)$ vektor amplitudo kompleks gerak, serta $F_{exc(\omega)}$ vektor gaya eksitasi gelombang. Formulasi ini merupakan dasar umum hidrodinamika struktur terapung [19]-[22] dan digunakan dalam perangkat lunak berbasis potential-flow seperti ANSYS-AQWA [23].

Response amplitude operator adalah fungsi transfer antara amplitudo respons dan amplitudo gelombang. Untuk gerak translasi, RAO dinyatakan dalam m/m, sedangkan untuk gerak rotasi dinyatakan dalam rad/m atau deg/m. Dengan demikian, label “deg/m” pada kurva surge, sway, dan heave di naskah awal harus dibaca sebagai kesalahan pelabelan; ketiga respons tersebut adalah translasi. Secara matematis:

$$RAO_{j(\omega,\beta)} = \frac{|\xi_{j(\omega,\beta)}|}{\zeta_a} \quad (2)$$

dengan ζ_{an} amplitudo gelombang reguler, j menyatakan mode gerak, dan β adalah arah datang gelombang. Puncak RAO mengindikasikan rentang frekuensi dengan amplifikasi terbesar dan perlu dibandingkan terhadap frekuensi dominan spektrum gelombang serta frekuensi natural sistem.



Gambar 1. Sistem koordinat enam derajat kebebasan pada platform tipe SPAR.

Respons Gelombang Tidak Beraturan

Gelombang laut aktual direpresentasikan sebagai proses acak stasioner dalam durasi pendek. Spektrum JONSWAP lazim digunakan untuk laut berkembang dengan puncak energi yang lebih tajam daripada spektrum Pierson-Moskowitz [24]. Jika sistem diasumsikan linear, spektrum respons untuk mode j dapat diperoleh melalui:

$$S_{xj}(\omega, \beta) = |RAO_{j(\omega, \beta)}|^2 S_{\eta}(\omega) \quad (3)$$

dengan S_{η} adalah spektrum elevasi permukaan. Momen spektral orde ke- n ditentukan melalui $m_n = \int \omega^n S_x(\omega) d\omega$. Simpangan baku respons adalah $\sigma = \sqrt{m_0}$, sedangkan estimasi amplitudo ekstrem bergantung pada durasi, jumlah puncak efektif, bandwidth spektrum, dan probabilitas yang dipilih. Oleh karena itu, istilah “most probable amplitude” harus disertai definisi durasi simulasi dan formulasi probabilistik agar hasil dapat direproduksi.

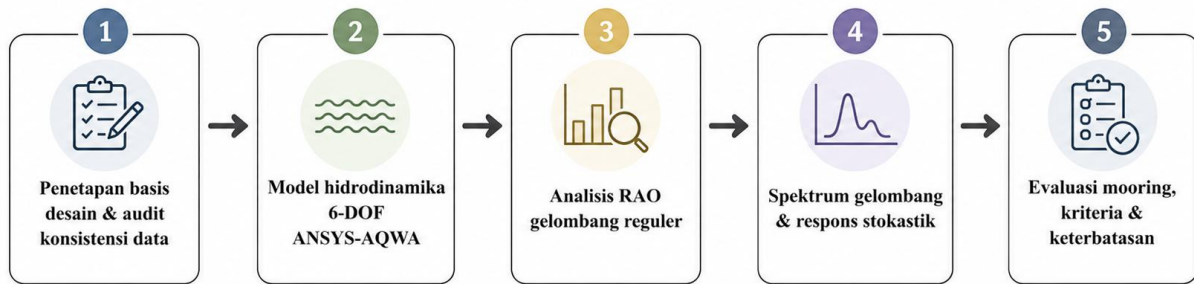
Untuk fasilitas nuklir, nilai gerak tidak cukup dievaluasi pada tingkat platform global. Respons harus ditransformasikan menjadi percepatan, kemiringan, perpindahan relatif, dan beban pada struktur internal serta peralatan penting untuk keselamatan. Prinsip desain instalasi nuklir mensyaratkan fungsi keselamatan tetap tersedia pada kejadian dasar desain dan kondisi yang dipertimbangkan [27], sedangkan ketentuan operasi menuntut batas operasi, pemantauan, pengujian, dan program pemeliharaan yang konsisten [28].

Sistem Penambatan dan Kriteria Penerimaan

Sistem spread mooring memberikan gaya pemulih horizontal dan membatasi offset platform. Dalam analisis awal, kekakuan restoring mooring dapat dilinearkan di sekitar posisi setimbang. Namun, pada respons ekstrem diperlukan model nonlinier yang memasukkan geometri catenary atau taut line, kontak dasar laut, drag pada tali, elastisitas, pretension, dan dinamika. Penentuan kondisi lingkungan harus mengikuti prinsip metocean design basis [14], sedangkan evaluasi stationkeeping perlu mencakup kondisi intact, damaged, accidental, dan fatigue sesuai standar stationkeeping [15], DNV [16], [17], serta API [18].

Kriteria 12 m untuk surge/sway, 1,3 m untuk heave, dan 45° untuk roll/pitch pada studi awal dipertahankan sebagai kriteria penyaringan agar perbandingan hasil tidak berubah. Nilai tersebut tidak diperlakukan sebagai batas final keselamatan. Batas akhir harus diturunkan dari clearances mooring dan kabel, stroke riser atau umbilical bila ada, kemampuan gangway, batas operasional helideck, kestabilan, kenyamanan, serta kualifikasi reaktor dan peralatan. Konsekuensi kegagalan FNPP lebih tinggi daripada platform komersial biasa, sehingga target reliabilitas dan margin desain perlu ditetapkan oleh regulator dan organisasi klasifikasi terkait.

METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 2. Alur revisi dan evaluasi konseptual respons gerak PLTN terapung.

Basis Data dan Ruang Lingkup

Penelitian menggunakan data sekunder dan keluaran simulasi dari naskah awal. Data utama mencakup geometri platform, karakteristik sistem penambatan, kurva RAO pada arah 0° , 30° , 60° , dan 90° , kurva spektrum respons, periode karakteristik, serta amplitudo stokastik enam mode gerak. Penelitian tidak mengubah nilai keluaran yang telah tersedia. Revisi dilakukan pada konsistensi satuan, struktur metode, interpretasi fisik, penilaian kriteria, dan kebutuhan validasi.

Tabel 1. Basis desain konseptual dan status data.

Parameter	Nilai basis	Catatan penggunaan
Tipe platform	SPAR silinder	Model konseptual sumber
Daya reaktor	557 MWt / 250 MWe	Kelas daya konseptual
Diameter badan	45 m	Dipakai sebagai basis geometri
Tinggi total	73 m	Termasuk bagian atas struktur
Draft	48,5 m	Basis kestabilan dan mesh terendam
Kedalaman perairan	150 m	Dipilih karena konsisten dengan model mooring
Freeboard minimum	15 m	Perlu verifikasi terhadap elevasi gelombang ekstrem
Panjang kabel ekspor	$\pm 1,44$ km	Asumsi rute konseptual; bukan hasil survei
Arah gelombang	0° , 30° , 60° , 90°	Analisis simetri kuadran
Kondisi gelombang	$H_s = 1,16$ m; $T_p = 7,16$ s	Input studi awal; status kala ulang perlu diverifikasi

Data lokasi mengacu pada Halmahera Tengah sebagai konteks regional [1]. Informasi kebutuhan energi nasional digunakan hanya untuk menjelaskan relevansi pasokan dan bukan sebagai input model hidrodinamika [2]. Teknologi reaktor 250 MWe diposisikan sebagai kelas desain konseptual yang perlu diverifikasi terhadap katalog dan dokumen desain pemilik teknologi [3]. Kajian IAEA terbaru menekankan bahwa keputusan deployment FNPP harus mengintegrasikan teknologi, infrastruktur, regulasi, dan kesiapan negara pengguna [4].

Model Hidrodinamika

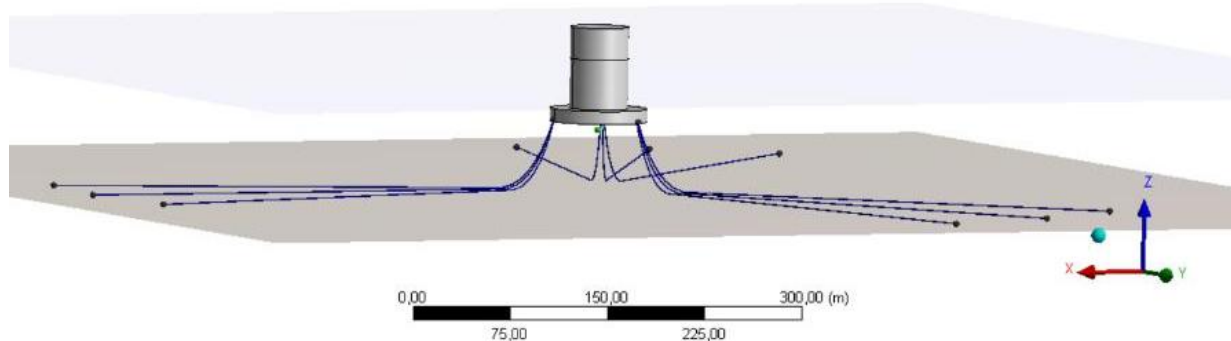
Model hidrodinamika diasumsikan menggunakan teori potensial linear, permukaan bebas linear, fluida tak kental dan tak termampatkan, serta amplitudo gerak kecil. Struktur diperlakukan sebagai rigid body untuk memperoleh added mass, radiation damping, gaya eksitasi, dan RAO. Kerangka ini sesuai untuk screening domain frekuensi, tetapi kurang memadai untuk fenomena nonlinier seperti slamming, green water, viscous drag dominan, vortex-induced motion, snap loading, dan respons ekstrem tsunami. Dokumentasi ANSYS-AQWA menjelaskan penggunaan panel diffraction/radiation dan perhitungan respons gerak frekuensi untuk struktur terapung [23].

Pemeriksaan kualitas model yang diperlukan tetapi belum dapat diverifikasi dari naskah awal meliputi: konvergensi mesh panel, posisi pusat gravitasi dan pusat apung, massa serta momen inersia, konsistensi satuan, luas bidang air, hydrostatic stiffness, damping tambahan, frekuensi natural, dan konvensi arah gelombang.

Karena file model tidak tersedia, revisi ini memperlakukan grafik sebagai keluaran final studi sumber dan tidak melakukan rekonstruksi angka kurva.

Model Sistem Penambatan

Sembilan tali dipasang secara radial dalam tiga kelompok 3×3. Konfigurasi ini dimaksudkan untuk menghasilkan restoring force pada berbagai arah datang gelombang. Meskipun kapasitas tarik maksimum dicantumkan, naskah awal tidak menyediakan pretension, tipe material, panjang segmen rantai dan wire/polyester, koordinat fairlead, radius anchor, jenis anchor, profil tanah, maupun tegangan maksimum hasil analisis. Karena itu, keamanan mooring tidak dapat disimpulkan dari data gerak saja.



Gambar 3. Konfigurasi konseptual platform dan sembilan tali spread mooring pada kedalaman pemodelan 150 m.

Evaluasi lanjutan perlu mengikuti empat kelompok kondisi: intact ultimate limit state, damaged condition setelah satu tali putus, fatigue limit state akibat siklus jangka panjang, dan accidental limit state. ISO 19901-7 memberikan metodologi stationkeeping untuk struktur terapung [15]. DNV-OS-E301 dan DNV-RP-C205 menyediakan kerangka kombinasi lingkungan, analisis tegangan, dan faktor keselamatan [16], [17], sedangkan API RP 2SK memberi praktik desain sistem stationkeeping dan pemeriksaan komponen [18].

Tabel 2. Properti tali tambat yang digunakan pada model sumber.

Parameter tali tambat	Nilai
Panjang setiap tali	420 m
Massa per satuan panjang	370 kg/m
Luas penampang ekuivalen	0,09 m ²
Kekakuan aksial EA	800.000 kN
Kapasitas tarik maksimum	11.981 kN
Koefisien added mass	1,0
Koefisien drag transversal	2,4
Diameter ekuivalen	0,13 m
Koefisien drag longitudinal	1,15

Kasus Analisis dan Parameter Evaluasi

Rasio pemanfaatan didefinisikan sebagai $U = \frac{R_{\max}}{R_{\lim}}$. Nilai $U < 1$ menunjukkan respons lebih kecil daripada kriteria yang diadopsi. Namun, U bukan faktor keselamatan struktur dan tidak menggantikan pemeriksaan tegangan lambung, stabilitas, kapasitas anchor, tegangan tali, fatigue, atau batas fungsi peralatan. Kualitas kesimpulan diklasifikasikan menjadi tiga tingkat. Tingkat pertama adalah hasil langsung dari studi sumber, seperti amplitudo dan arah maksimum. Tingkat kedua adalah interpretasi fisik berdasarkan teori hidrodinamika. Tingkat ketiga adalah rekomendasi desain berdasarkan standar dan literatur. Pemisahan ini mencegah rekomendasi tambahan dianggap sebagai keluaran simulasi baru.

Tabel 3. Matriks kasus analisis.

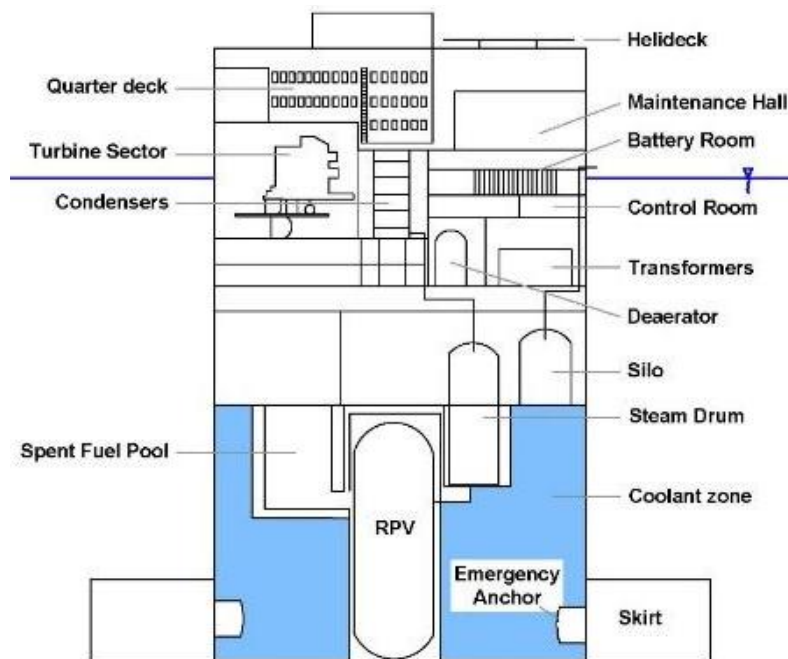
Tahap	Kasus	Keluaran utama
Hidrostatik	Kondisi setimbang pada draft 48,5 m	Displacement, pusat apung, GM, trim
Gelombang reguler	Frekuensi 0-±2,2 rad/s; arah 0°, 30°, 60°, 90°	RAO 6-DOF

Tahap	Kasus	Keluaran utama
Gelombang tidak beraturan	Spektrum berdasarkan H_s dan T_p sumber	Spektrum respons 6-DOF
Statistik ekstrem	Amplitudo most probable dari studi sumber	T_0 , ζ_{ext} per arah
Evaluasi kriteria	Perbandingan respons maksimum/kriteria	Rasio pemanfaatan U
Audit desain	Pemeriksaan konsistensi dan gap	Daftar analisis lanjutan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konfigurasi Sistem PLTN Terapung

Susunan platform menempatkan reaktor dan kolam pendingin pada bagian bawah untuk menurunkan pusat gravitasi, sementara turbin, kondensor, ruang kontrol, transformator, ruang pemeliharaan, dan helideck berada pada elevasi lebih tinggi. Distribusi massa vertikal tersebut menguntungkan stabilitas, tetapi memerlukan kajian integrasi antara struktur, containment, shielding, akses pemeliharaan, ventilasi, proteksi kebakaran, dan segregasi sistem keselamatan. Konsep OFNP menekankan manfaat konstruksi galangan dan penggunaan laut sebagai heat sink [5], tetapi desain rinci harus mencegah common-cause failure yang dapat memengaruhi platform dan reaktor secara bersamaan.



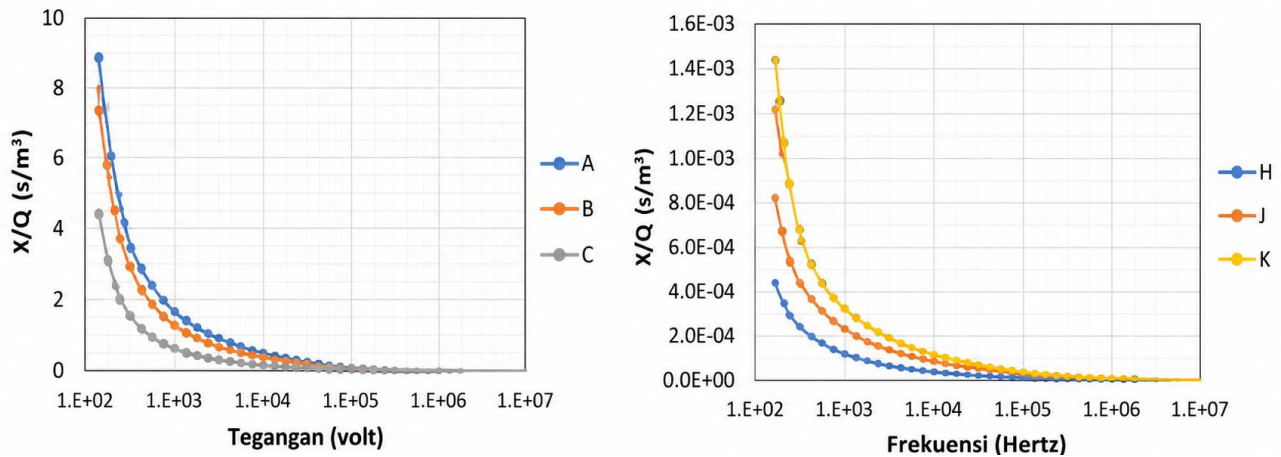
Gambar 4. Susunan konseptual komponen utama di dalam platform PLTN terapung tipe SPAR.

Sistem transmisi daya melalui kabel bawah laut perlu dirancang terhadap offset platform, bending radius, fatigue pada dynamic cable, perlindungan seabed, kegagalan anchor drag, dan kehilangan jaringan. Studi balance-of-plant OFNP membahas pentingnya integrasi pembangkitan, transformasi, dan transmisi daya dari platform ke darat [30]. Pada desain sumber, panjang kabel $\pm 1,44$ km menunjukkan platform relatif dekat dengan pantai, sehingga konflik navigasi, dampak pelabuhan, zona keselamatan, sedimentasi, dan pengaruh bathymetry menjadi lebih penting dibandingkan konsep laut dalam yang ditempatkan puluhan kilometer dari pantai.

Dalam aspek keselamatan maritim, pengangkutan bahan bakar baru dan bahan bakar bekas harus memenuhi persyaratan kemasan, proteksi, dan operasi kapal. INF Code IMO memberikan ketentuan keselamatan pengangkutan bahan bakar nuklir teriradiasi, plutonium, dan limbah aktivitas tinggi dalam bentuk kemasan di kapal [26]. Dokumen ABS mengenai jalur pengembangan PLTN terapung menekankan kebutuhan integrasi klasifikasi maritim dengan persyaratan nuklir dan pemetaan hazard yang berbeda dari kapal biasa [25].

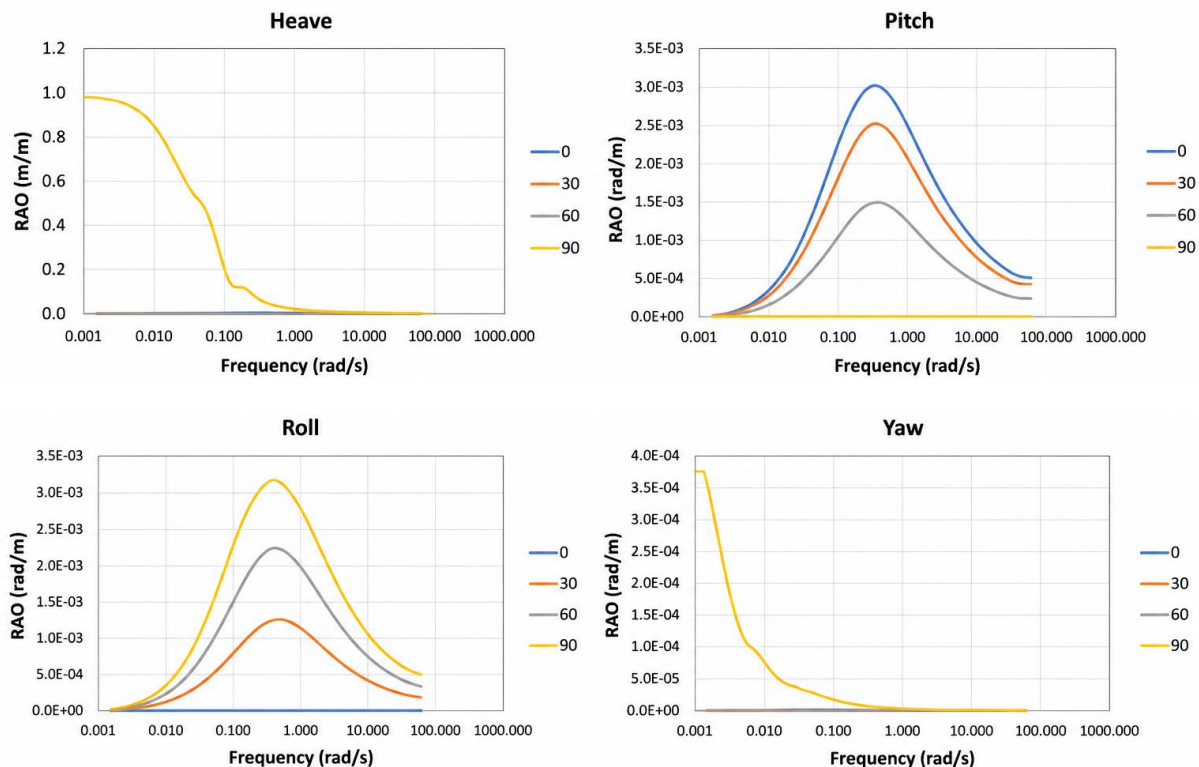
Respons terhadap Gelombang Reguler

Kurva surge menunjukkan respons terbesar pada arah 0° dan 30° , lalu menurun untuk 60° dan mendekati nol pada 90° . Pola tersebut sesuai dengan proyeksi gaya gelombang terhadap sumbu longitudinal model. Pada frekuensi rendah, platform dan sistem mooring bergerak mengikuti eksitasi gelombang dan gaya drift, sehingga RAO translasi relatif tinggi. Respons berkurang ketika frekuensi meningkat karena inersia, radiation damping, dan karakter hidrodinamika badan terendam. Hasil ini konsisten dengan konsep transfer function pada platform terapung [19]-[21].



Gambar 5. RAO surge dan sway dari model sumber. Satuan translasi diinterpretasikan sebagai m/m.

Sway memperlihatkan pola komplementer: respons minimum pada 0° dan maksimum pada 90° . Pada struktur silinder yang secara geometris hampir axisymmetric, perbedaan surge dan sway terutama berasal dari konvensi arah gelombang, konfigurasi mooring, distribusi massa, atau detail model yang tidak sepenuhnya simetris. Simetri nilai maksimum surge dan sway sebesar 1,825 m memperkuat dugaan bahwa respons arah utama didominasi proyeksi beban dan restoring mooring yang sebanding.



Gambar 6. RAO heave, pitch, roll, dan yaw dari model sumber.

Frekuensi rendah perlu diperiksa secara khusus karena offset horizontal menentukan kebutuhan ruang aman terhadap pantai, struktur lain, anchor, dan kabel. Analisis frekuensi domain biasanya tidak menangkap seluruh

komponen low-frequency drift dan nonlinieritas catenary secara akurat. Oleh karena itu, time-domain coupled analysis tetap diperlukan pada kombinasi gelombang, angin, dan arus desain.

Heave merupakan translasi m/m; roll, pitch, dan yaw merupakan rotasi per amplitudo gelombang. Heave relatif sama pada semua arah, sesuai dengan bentuk silinder yang hampir simetris terhadap sumbu vertikal. Respons heave tinggi pada frekuensi sangat rendah dan menurun hingga mendekati nol setelah sekitar 1,5-2 rad/s. Namun, kurva tidak memperlihatkan puncak resonansi heave yang tajam. Hal ini dapat disebabkan frekuensi natural berada di luar rentang analisis, damping numerik cukup tinggi, atau data kurva telah dinormalisasi dengan cara tertentu. Pemeriksaan hydrostatic stiffness, added mass, dan frekuensi natural diperlukan untuk mengonfirmasi interpretasi tersebut.

Pitch maksimum terjadi pada gelombang 0° dan berkurang menuju 90° , sedangkan roll maksimum terjadi pada 90° dan hampir nol pada 0° . Kedua kurva memiliki puncak sekitar 1,0-1,2 rad/s, menunjukkan amplifikasi rotasi pada periode sekitar 5,2-6,3 s. Karena periode puncak gelombang sumber 7,16 s setara dengan frekuensi sekitar 0,88 rad/s, terdapat kedekatan antara energi gelombang dominan dan rentang peningkatan rotasi. Hal ini menjelaskan mengapa spektrum respons roll dan pitch perlu dievaluasi lebih ketat meskipun amplitudo absolutnya kecil.

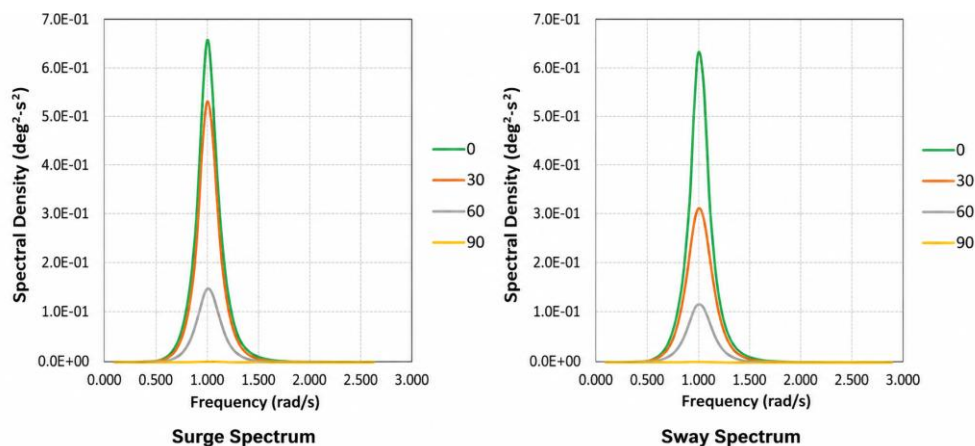
Yaw sangat kecil untuk seluruh arah. Nilai yang sangat rendah dapat menunjukkan simetri badan dan mooring, tetapi juga perlu diperiksa terhadap pembulatan output atau tidak aktifnya coupling tertentu. Pada operasi nyata, yaw dapat dipicu oleh kombinasi arah angin, arus, gelombang tidak sejajar, asymmetry mooring, kerusakan satu tali, dan interaksi kabel. Dengan demikian, yaw nol tidak boleh dianggap sebagai sifat absolut desain.

Tabel 4. Ringkasan interpretasi RAO enam mode gerak.

Mode	Arah respons dominan	Rentang frekuensi penting	Interpretasi desain
Surge	0° - 30°	Frekuensi rendah	Kontrol offset longitudinal dan kabel
Sway	60° - 90°	Frekuensi rendah	Kontrol offset transversal dan clearance
Heave	Hampir independen arah	$< 1,5$ rad/s	Periksa vertical motion dan accelerations
Roll	60° - 90°	$\pm 1,0$ - $1,2$ rad/s	Gelombang samping dan stabilitas transversal
Pitch	0° - 30°	$\pm 1,0$ - $1,2$ rad/s	Gelombang depan dan peralatan vertikal
Yaw	Sangat kecil	$< 0,5$ rad/s	Verifikasi coupling dan damaged mooring

Respons terhadap Gelombang Tidak Beraturan

Spektrum surge dan sway memiliki puncak sekitar 0,8-1,0 rad/s. Surge dominan pada 0° , sedangkan sway dominan pada 90° . Pola tersebut merupakan hasil perkalian kuadrat RAO dengan spektrum gelombang sebagaimana Persamaan (3).

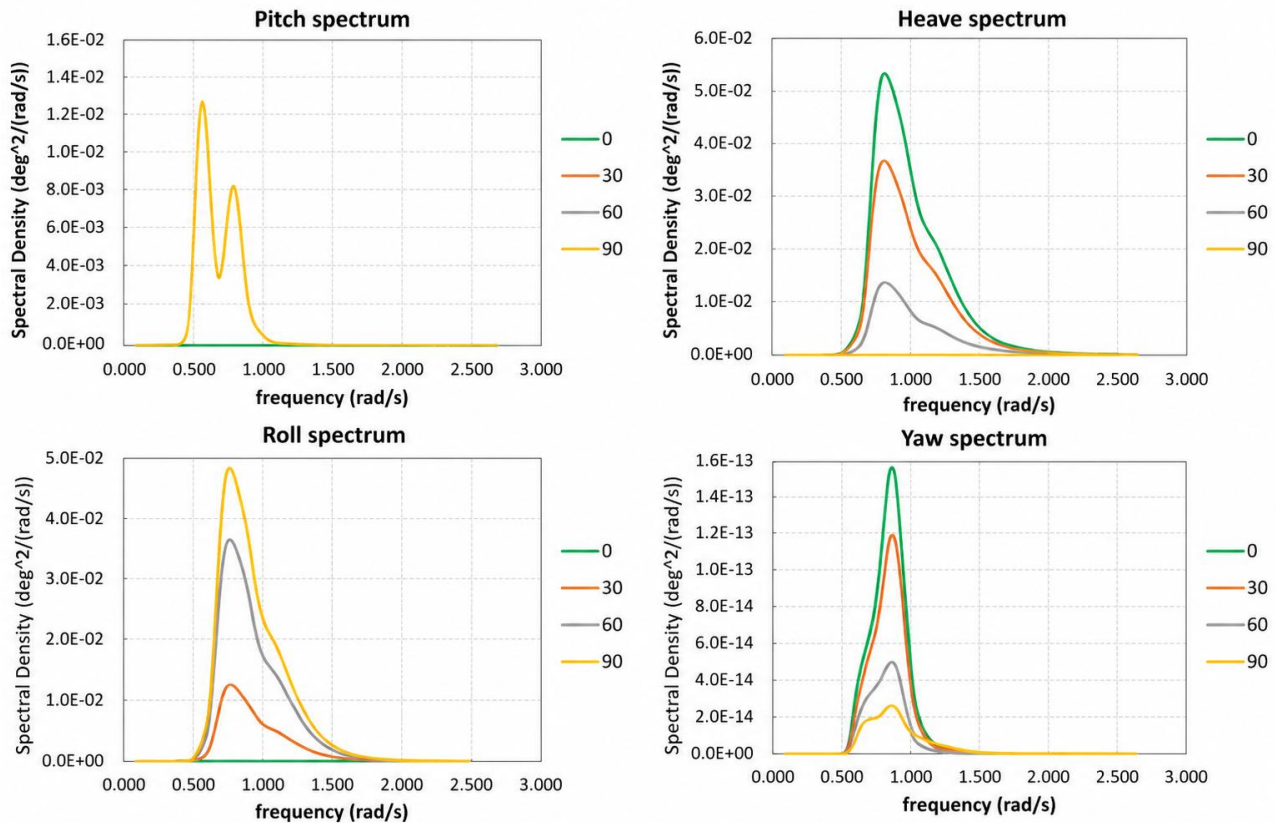


Gambar 7. Spektrum respons surge dan sway pada empat arah datang gelombang.

Karena puncak respons berdekatan dengan frekuensi spektrum gelombang, perubahan kecil T_p atau bentuk spektrum dapat mengubah amplitudo secara bermakna. Input $H_s = 1,16$ m dan $T_p = 7,16$ s harus karena itu

diverifikasi menggunakan hindcast, pengukuran buoy, data satelit, dan analisis ekstrem lokasi sesuai ISO 19901-1 [14] serta panduan hazard hidrologi IAEA [10].

Puncak spektrum yang sempit mengindikasikan bandwidth respons terbatas. Akan tetapi, tanpa resolusi frekuensi, nilai spectral moment, durasi sea state, dan faktor peak enhancement, estimasi extreme response tidak dapat direproduksi. Untuk tahap berikutnya, model perlu melaporkan m_0 , m_2 , zero-upcrossing period, significant amplitude, expected maximum untuk durasi 1 jam/3 jam, serta quantile yang dipilih.



Gambar 8. Spektrum respons pitch, heave, roll, dan yaw dari model sumber.

Spektrum pitch pada gambar sumber memiliki dua puncak sekitar 0,6 dan 0,9 rad/s. Dua puncak dapat muncul akibat interaksi bentuk spektrum gelombang dengan RAO atau coupling antar-mode. Karena kurva RAO pitch pada gelombang reguler memperlihatkan satu puncak utama, model perlu diaudit untuk memastikan urutan label grafik dan mode tidak tertukar. Pada gambar sumber, keterangan Grafik 9 dan Grafik 10 juga tidak sepenuhnya konsisten dengan bentuk kurva. Revisi ini mengikuti label yang ditampilkan pada gambar tetapi menandai kebutuhan verifikasi file output.

Spektrum heave tertinggi pada arah 0° dan berkurang pada arah lain, padahal RAO heave hampir identik untuk seluruh arah. Ketidaksesuaian tersebut dapat berasal dari spektrum arah, coupling, atau kesalahan pengurutan plot. Ini merupakan temuan audit penting: kesimpulan tentang independensi arah heave tidak boleh dibuat hanya dari satu kelompok grafik sebelum data numerik diperiksa.

Spektrum roll dominan pada 90° dan 60°, sesuai RAO. Spektrum yaw berada pada orde 10^{-13} hingga 10^{-14} , jauh lebih kecil daripada mode lain. Besaran tersebut mungkin menunjukkan sangat kecilnya transfer energi ke yaw, tetapi nilai yang mendekati presisi mesin juga dapat mengindikasikan simetri sempurna atau degree of freedom yang tidak mendapat eksitasi numerik. Uji sensitivitas terhadap arah gelombang non-simetris, misalnya 15°, 45°, 75°, dan kombinasi misaligned wind-wave-current, diperlukan.

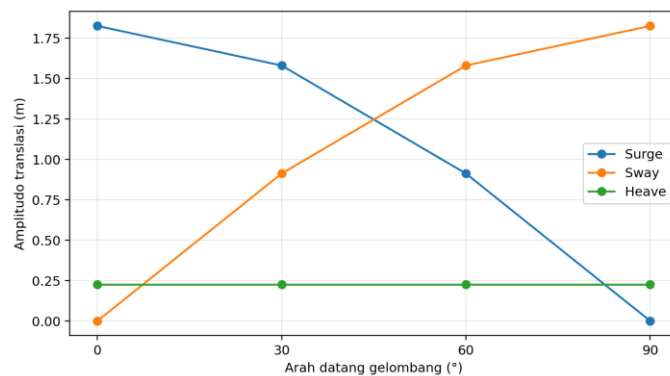
Amplitudo Stokastik dan Rasio Kriteria

Nilai maksimum translasi horizontal sebesar 1,825 m bersifat simetris antara surge arah 0° dan sway arah 90°. Heave konstan 0,226 m. Respons rotasi maksimum hanya 0,532°, baik untuk pitch arah 0° maupun roll arah 90°. Hubungan arah tersebut konsisten dengan eksitasi head-sea dan beam-sea pada sistem koordinat platform. Hasil serupa, yaitu sensitivitas konfigurasi silinder terhadap arah lingkungan dan mooring, dilaporkan pada studi multi-point mooring FNPP [8].

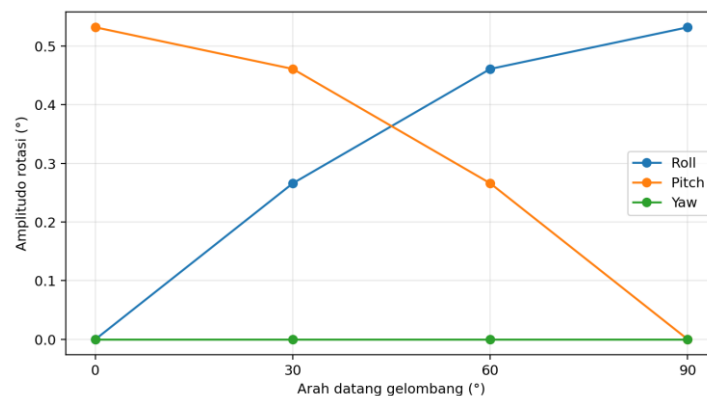
Periode T_0 untuk surge dan sway sekitar 7,2 s, heave 8,635 s, serta roll dan pitch 6,234 s. Kedekatan periode tersebut dengan T_p 7,16 s menunjukkan energi gelombang dapat berinteraksi langsung dengan mode gerak utama. Analisis final perlu menggeser parameter spektrum di sekitar rentang 5-10 s untuk mengevaluasi sensitivitas resonansi dan bukan hanya satu sea state.

Tabel 5. Ringkasan amplitudo is most probable dari studi sumber.

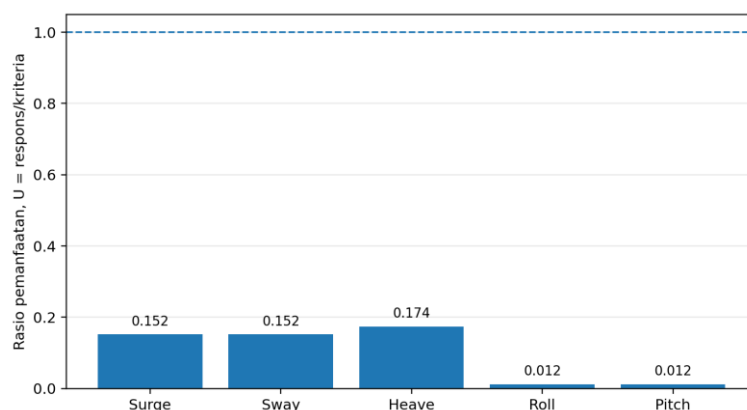
Mode	Arah (°)	T_0 (s)	Amplitudo ekstrem	Kriteria penyaringan	Status
Surge	0 / 30 / 60 / 90	7,243 / 7,243 / 7,243 / 6,958	1,825 / 1,580 / 0,912 / 0,000 m	12 m	Memenuhi
Sway	0 / 30 / 60 / 90	7,583 / 7,243 / 7,243 / 7,243	0,000 / 0,912 / 1,580 / 1,825 m	12 m	Memenuhi
Heave	0 / 30 / 60 / 90	8,635 (semua arah)	0,226 m (semua arah)	1,3 m	Memenuhi
Roll	0 / 30 / 60 / 90	7,540 / 6,234 / 6,234 / 6,234	0,000 / 0,266 / 0,461 / 0,532°	45°	Memenuhi
Pitch	0 / 30 / 60 / 90	6,234 / 6,234 / 6,234 / 6,723	0,532 / 0,461 / 0,266 / 0,000°	45°	Memenuhi
Yaw	0 / 30 / 60 / 90	7,844 / 7,753 / 8,065 / 7,629	0,000° (dibulatkan)	Belum ditetapkan	Belum dinilai



Gambar 9. Variasi amplitudo translasi maksimum terhadap arah gelombang.



Gambar 10. Variasi amplitudo rotasi maksimum terhadap arah gelombang.



Gambar 11. Rasio respons maksimum terhadap kriteria penyaringan yang diadopsi.

Tabel 6. Evaluasi rasio pemanfaatan gerak.

Mode	Respons maksimum	Kriteria	Rasio U	Margin terhadap kriteria
Surge	1,825 m	12 m	0,152	84,8%
Sway	1,825 m	12 m	0,152	84,8%
Heave	0,226 m	1,3 m	0,174	82,6%
Roll	0,532°	45°	0,012	98,8%
Pitch	0,532°	45°	0,012	98,8%

Heave memiliki rasio terbesar, $U = 0,174$, diikuti surge dan sway sebesar 0,152. Roll dan pitch hanya sekitar 0,012 terhadap batas 45°. Secara matematis seluruhnya berada di bawah satu. Namun, batas roll/pitch 45° terlalu besar untuk dijadikan batas operasi peralatan nuklir, personel, turbin, dan helideck. Nilai ini lebih menyerupai batas screening global daripada acceptance criterion. Kriteria operasional kemungkinan berada pada orde beberapa derajat atau lebih kecil, tergantung fungsi sistem dan respons percepatan.

Selain amplitudo, percepatan gerak perlu dihitung. Pada gerak harmonik, percepatan maksimum sebanding dengan $\omega^2 \xi$. Akibatnya, respons amplitudo kecil pada frekuensi lebih tinggi dapat menghasilkan percepatan yang relevan bagi peralatan. Prinsip kualifikasi peralatan penting untuk keselamatan harus menghubungkan demand gerak laut dengan kapasitas struktur internal, support, piping, dan komponen aktif [27], [28].

Implikasi terhadap Desain Mooring dan Kabel

Offset horizontal 1,825 m terlihat kecil dibandingkan panjang tali 420 m, tetapi penilaian mooring tidak dapat didasarkan pada rasio geometrik tersebut. Tegangan tali dipengaruhi pretension, konfigurasi catenary, berat terendam, uplift pada anchor, kekakuan aksial, drag, dynamic amplification, dan low-frequency drift. Nilai kapasitas 11.981 kN harus dibandingkan dengan maximum dynamic tension pada setiap line, termasuk line sharing setelah satu tali gagal. Tanpa data tegangan, utilization mooring belum diketahui.

Kedalaman 150 m dan panjang tali 420 m memberi rasio panjang terhadap kedalaman 2,8. Rasio ini dapat mendukung konfigurasi catenary atau semi-taut, tetapi jenis aktual tidak dijelaskan. Tanah lunak di lokasi menuntut analisis anchor holding capacity, cyclic degradation, creep, dan kemungkinan trenching. Investigasi geoteknik perlu menentukan stratigrafi, undrained shear strength, unit weight, consolidation, dan parameter cyclic sebelum tipe anchor dipilih.

Kabel daya bawah laut mengalami gerak relatif antara platform dan touchdown point. Desain harus memasukkan lazy wave atau konfigurasi lain, bend stiffener, buoyancy module, protection, fatigue akibat gelombang, dan interaction dengan mooring. Kegagalan kabel dapat menyebabkan loss of offsite power atau trip reaktor. Karena itu, redundancy grid, emergency power, black start, dan prosedur disconnect/reconnect perlu dimasukkan sejak conceptual design.

Implikasi Keselamatan Nuklir, Tapak, dan Operasi

Keselamatan nuklir tidak dapat dinyatakan hanya dari gerak platform. Penilaian tapak harus mengidentifikasi seluruh external hazards dan kombinasi yang kredibel. SSR-1 menuntut karakterisasi tapak dan evaluasi kesesuaian antara hazard dengan desain instalasi [9]. Panduan meteorologi-hidrologi mencakup banjir pantai, gelombang, storm surge, dan fenomena terkait [10], sedangkan bahaya seismik dan sumber tsunami memerlukan model geologi dan seismotektonik [11]. Input H_s 1,16 m tidak cukup untuk mewakili seluruh bahaya ini.

Tsunami berbeda secara fisik dari gelombang angin: panjang gelombangnya sangat besar, periodenya panjang, dan di perairan dekat pantai dapat menghasilkan arus serta perubahan elevasi yang signifikan. Model diffraction linear dengan spektrum gelombang biasa tidak otomatis mewakili tsunami. Analisis perlu menggabungkan model propagasi tsunami regional, transformasi nearshore, arus pada platform, beban mooring, perubahan kedalaman, debris impact, dan skenario anchor failure.

Kesiapan regulasi nasional juga merupakan bagian dari feasibility. Kegiatan pra-perizinan BAPETEN menunjukkan adanya mekanisme konsultasi awal [13], dan laporan kinerja BAPETEN mencatat pengembangan infrastruktur pengawasan PLTN [29]. Untuk FNPP, koordinasi perlu diperluas kepada regulator maritim, otoritas pelabuhan, TNI AL, Basarnas, Kementerian Perhubungan, Kementerian ESDM, pemerintah daerah, dan pengelola sistem tenaga. Batas tanggung jawab antara operator nuklir, pemilik platform, operator marine, dan penyedia jaringan harus ditetapkan sebelum desain rinci.

Transportasi bahan nuklir dan limbah memerlukan skenario pelabuhan, security escort, protected area, inspection, emergency response, dan public communication. IAEA menekankan bahwa deployment FNPP memerlukan pengaturan lifecycle dari fabrikasi, transportasi, operasi, refueling, maintenance, hingga



decommissioning [4]. INF Code mengatur pengangkutan muatan radioaktif tertentu melalui laut [26], sedangkan isu legal dan institusional lintas negara maupun lintas yurisdiksi dibahas dalam IAEA NG-T-3.5 [12].

Perbandingan dengan Studi Terdahulu

Dibandingkan konsep MIT, model penelitian ini memiliki jarak ke pantai lebih dekat dan dimensi yang dikaitkan dengan reaktor 250 MWe. Hal tersebut meningkatkan relevansi kabel ekspor pendek dan logistik, tetapi memperbesar interaksi dengan nearshore hazard, aktivitas manusia, serta kebutuhan emergency planning. Hasil gerak yang rendah mendukung kelayakan bentuk SPAR secara konseptual, sejalan dengan temuan hidrodinamika OFNP [6].

Tabel 7. Posisi penelitian terhadap studi terdahulu.

Studi	Objek/metode	Temuan relevan	Posisi penelitian ini
Buongiorno dkk. [5]	Konsep OFNP spar	Integrasi reaktor-platform dan safety concept	Basis konseptual platform
Strother [6]	Hidrodinamika dua model OFNP	Kinerja heave dan pitch memadai	Pembandingan respons SPAR
Cui dkk. [7]	ANSYS frequency/time-domain	Transfer beban laut ke containment	Landasan workflow ANSYS
Liu dkk. [8]	FNPP silinder multi-point mooring	Arah lingkungan dan mooring memengaruhi respons	Pembandingan arah gerak
Penelitian ini	Reinterpretasi output ANSYS-AQWA Halmahera	RAO, spectra, stochastic motion, audit gap	Screening lokasi dan rekomendasi lanjutan

Studi Cui dkk. memperlihatkan pentingnya menghubungkan output hidrodinamika dengan analisis tegangan containment dan support [7]. Penelitian ini belum melakukan tahap tersebut. Studi Liu dkk. menunjukkan perlunya membandingkan beberapa konfigurasi mooring dan kombinasi wind-wave-current [8]. Model sembilan tali pada penelitian ini masih harus diuji terhadap alternatif layout, variasi pretension, dan line failure.

Keterbatasan Penelitian

Keterbatasan tersebut berarti hasil penelitian harus dibaca sebagai conceptual screening. Pernyataan yang dapat dipertahankan adalah bahwa, untuk model dan kondisi gelombang yang digunakan, respons gerak berada di bawah kriteria penyaringan. Pernyataan bahwa desain telah aman terhadap seluruh kondisi lingkungan, layak dibangun, atau memenuhi persyaratan nuklir belum didukung oleh data yang tersedia.

Tabel 8. Keterbatasan utama dan tindakan korektif.

Keterbatasan	Dampak pada kesimpulan	Perbaikan yang diperlukan
File model ANSYS tidak tersedia	Mesh, massa, damping, dan boundary tidak dapat diaudit	Lampirkan model, solver setting, dan convergence study
Data metocean satu sea state	Tidak mewakili operasional, ekstrem, dan joint probability	Hindcast jangka panjang, pengukuran, extreme value analysis
Tidak ada wind/current coupled response	Offset dan tension dapat terestimasi rendah	Coupled time-domain misaligned environment
Tidak ada output tegangan mooring	Kapasitas line/anchor tidak dapat dinilai	Intact, damaged, fatigue, ALS checks
Kriteria gerak belum diturunkan dari fungsi	Status “aman” terlalu umum	Functional acceptance criteria dan equipment qualification
Tidak ada tsunami/seismic seabed model	Hazard khas Maluku Utara belum tercakup	Probabilistic/Deterministic hazard assessment
Tidak ada experimental validation	Ketidakpastian model tidak diketahui	Model test basin dan benchmark

Keterbatasan	Dampak pada kesimpulan	Perbaikan yang diperlukan
Grafik memiliki label/urutan tidak konsisten	Risiko salah interpretasi mode dan satuan	Ekspor data numerik dan standard plotting template

REKOMENDASI PENGEMBANGAN DESAIN

Tahap pertama adalah membangun site design basis yang dapat ditelusuri. Data batimetri resolusi tinggi, gelombang, angin, arus, pasang surut, storm surge, gempa, tsunami, geoteknik, korosi, marine growth, lalu lintas kapal, dan aktivitas pesisir harus dikumpulkan. Analisis metocean perlu menghasilkan operational, extreme, dan abnormal conditions beserta joint probability dan directional distribution sesuai ISO 19901-1 [14] dan DNV-RP-C205 [16].

Tahap kedua adalah memperbaiki model hidrodinamika. Mesh convergence, mass properties, damping, natural periods, dan hydrostatic stability perlu diverifikasi. Kasus gelombang harus mencakup arah setiap 15° atau $22,5^\circ$, variasi H_s - T_p , spreading, serta heading misalignment. Analisis domain waktu nonlinier harus memasukkan mooring, drag, current, wind, second-order wave drift, dan transient line failure. Benchmark dapat dilakukan terhadap teori dasar [19]-[22], manual AQWA [23], dan hasil eksperimen atau publikasi OFNP [6].

Tahap ketiga adalah menyusun desain mooring dan anchor yang dapat diklasifikasikan. Setiap tali perlu didefinisikan berdasarkan material, segmen, corrosion allowance, pretension, MBL, fatigue curve, connector, fairlead, dan anchor. Pemeriksaan intact, one-line-damaged, accidental, dan fatigue mengikuti ISO 19901-7 [15], DNV-OS-E301 [17], serta API RP 2SK [18]. Layout harus mempertimbangkan exclusion zone, cable corridor, kemungkinan dragging anchor kapal lain, dan akses inspeksi.

Tahap keempat adalah menghubungkan motion response ke nuclear island. Time histories enam derajat kebebasan diubah menjadi acceleration response spectra atau load histories pada foundation containment, support, piping, turbin, electrical cabinet, battery, spent fuel pool, dan emergency systems. Acceptance criteria kemudian diturunkan dari kemampuan menjaga fungsi keselamatan menurut SSR-2/1 [27] dan program operasi serta pengujian menurut SSR-2/2 [28].

Tahap kelima adalah menyusun licensing and deployment roadmap. Model business ownership, batas yurisdiksi, tanggung jawab keamanan, refueling strategy, transportasi bahan bakar dan limbah, emergency planning zone, decommissioning, liability, serta public engagement perlu ditetapkan. IAEA FNPP report [4], studi legal TNPP [12], mekanisme pra-perizinan BAPETEN [13], dan kerangka pengawasan nasional [29] dapat digunakan sebagai titik awal.

KESIMPULAN

Revisi penelitian menunjukkan bahwa model konseptual PLTN terapung tipe SPAR pada kedalaman pemodelan 150 m memiliki pola respons arah yang konsisten secara hidrodinamika. Surge maksimum sebesar 1,825 m terjadi pada gelombang 0° , sway maksimum 1,825 m pada 90° , heave 0,226 m pada seluruh arah, pitch maksimum $0,532^\circ$ pada 0° , dan roll maksimum $0,532^\circ$ pada 90° . Yaw dibulatkan mendekati nol pada keluaran sumber.

Semua mode yang memiliki kriteria berada di bawah batas penyaringan: rasio pemanfaatan maksimum adalah 0,174 untuk heave, 0,152 untuk surge/sway, dan 0,012 untuk roll/pitch. Hasil ini menunjukkan kelayakan respons gerak awal pada kondisi gelombang yang dimodelkan, tetapi tidak membuktikan keselamatan struktur, mooring, peralatan, atau reaktor secara keseluruhan.

Kontribusi utama revisi adalah koreksi satuan RAO, penyelarasan basis kedalaman, pemisahan antara asumsi dan hasil, evaluasi arah gerak, perhitungan rasio kriteria, serta identifikasi gap desain. Inkonsistensi antara grafik RAO dan spektrum heave, label mode pada sebagian grafik, dan tidak tersedianya data tegangan tali tambat harus diselesaikan sebelum hasil digunakan untuk keputusan desain.

Pengembangan berikutnya wajib mencakup validasi metocean lokasi Halmahera, analisis gelombang-angin-arus terkopel dalam domain waktu, kondisi satu tali putus, fatigue, anchor-soil interaction, tsunami, dynamic export cable, structural load transfer, dan kualifikasi peralatan penting untuk keselamatan. Dengan tahapan tersebut, konsep dapat ditingkatkan dari screening akademik menjadi studi pra-kelayakan teknik yang mendukung proses pra-perizinan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik Kabupaten Halmahera Tengah, Kabupaten Halmahera Tengah Dalam Angka 2024. Halmahera Tengah, Indonesia: BPS, 2024.
- [2] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, “Konsumsi listrik masyarakat meningkat, tahun 2023 capai 1.285 kWh/kapita,” Jakarta, Indonesia, Jan. 2024.
- [3] International Atomic Energy Agency, Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments 2024. Vienna, Austria: IAEA, 2024.
- [4] International Atomic Energy Agency, Deployment of Floating Nuclear Power Plants: Benefits and Challenges. Vienna, Austria: IAEA, 2025.
- [5] J. Buongiorno, J. Jurewicz, M. Golay, and N. Todreas, “The offshore floating nuclear plant concept,” *Nuclear Technology*, vol. 194, no. 1, pp. 1-14, 2016, doi: 10.13182/NT15-49.
- [6] M. B. Strother, “Hydrodynamic analysis of the offshore floating nuclear power plant,” M.S. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2015.
- [7] J. Cui, L. Li, M. Zhang, H. Liu, and X. Qu, “Dynamic response analysis of floating nuclear power plant containment under marine environment,” in *Proc. 23rd Pacific Basin Nuclear Conf.*, vol. 1, Singapore: Springer, 2023, pp. 543-557, doi: 10.1007/978-981-99-1023-6_53.
- [8] Y. Liu et al., “Dynamic response of a multi-point mooring cylindrical floating nuclear power platform carrying a small-scale reactor,” *Ocean Engineering*, vol. 267, art. no. 113121, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113121.
- [9] International Atomic Energy Agency, Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSR-1. Vienna, Austria: IAEA, 2019.
- [10] International Atomic Energy Agency, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSG-18. Vienna, Austria: IAEA, 2011.
- [11] International Atomic Energy Agency, Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSG-9. Vienna, Austria: IAEA, 2010.
- [12] International Atomic Energy Agency, Legal and Institutional Issues of Transportable Nuclear Power Plants: A Preliminary Study, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-3.5. Vienna, Austria: IAEA, 2013.
- [13] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, “Executive meeting perizinan PLTN dan perencanaan konsultasi 3S pra-perizinan,” Jakarta, Indonesia, Mar. 2023.
- [14] International Organization for Standardization, ISO 19901-1:2015, Petroleum and Natural Gas Industries-Specific Requirements for Offshore Structures-Part 1: Metocean Design and Operating Considerations. Geneva, Switzerland: ISO, 2015.
- [15] International Organization for Standardization, ISO 19901-7:2026, Specific Requirements for Offshore Structures-Part 7: Stationkeeping Systems for Floating Offshore Structures and Mobile Offshore Units. Geneva, Switzerland: ISO, 2026.
- [16] DNV, DNV-RP-C205: Environmental Conditions and Environmental Loads. Høvik, Norway: DNV, 2021.
- [17] DNV, DNV-OS-E301: Position Mooring. Høvik, Norway: DNV, 2021.
- [18] American Petroleum Institute, API RP 2SK: Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, 4th ed. Washington, DC, USA: API, 2015.
- [19] O. M. Faltinsen, *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1990.
- [20] J. N. Newman, *Marine Hydrodynamics*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1977.
- [21] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2021.
- [22] J. M. J. Journée and W. W. Massie, *Offshore Hydromechanics*. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2001.
- [23] Ansys, Inc., *Ansys AQWA Theory Manual*, Release 2024 R2. Canonsburg, PA, USA: Ansys, 2024.
- [24] K. Hasselmann et al., “Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP),” *Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, Germany, Ergänzungsheft Reihe A*(8), no. 12, 1973.
- [25] American Bureau of Shipping, *Pathways to Low Carbon: Floating Nuclear Power Plants*. Houston, TX, USA: ABS, 2024.
- [26] International Maritime Organization, *International Code for the Safe Carriage of Packaged Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High-Level Radioactive Wastes on Board Ships (INF Code)*. London, U.K.: IMO, 2022.



- [27] International Atomic Energy Agency, Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1). Vienna, Austria: IAEA, 2016.
- [28] International Atomic Energy Agency, Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/2 (Rev. 1). Vienna, Austria: IAEA, 2016.
- [29] Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Laporan Kinerja BAPETEN Tahun 2023. Jakarta, Indonesia: BAPETEN, 2024.
- [30] P. Minelli, J. Buongiorno, M. Golay, and N. Todreas, "Balance of plant and power transmission for the offshore floating nuclear plant," in Proc. 16th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16), Chicago, IL, USA, 2015.