



## Kajian Pra Kelayakan PLTN SMART Lepas Pantai Jenis Struktur Berbasis Gravitasi Untuk Indonesia

Sahala M. Lumbanraja, Dharu Dewi

<sup>1</sup>Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, BATAN, Jl. Kuningan Barat, Jakarta Selatan

### INFORMASI ARTIKEL

#### Riwayat Artikel:

Diterima:

1 Maret 2017

Diterima dalam bentuk revisi:

7 Juni 2017

Disetujui:

20 Juni 2017

#### Kata kunci:

PLTN lepas pantai, gravity based-structure, reaktor daya kecil, regulasi

### ABSTRAK

**KAJIAN PRA KELAYAKAN PLTN SMART LEPAS PANTAI JENIS STRUKTUR BERBASIS GRAVITASI UNTUK INDONESIA.** PLTN SMART lepas pantai jenis struktur berbasis gravitasi (*gravity based structure*, GBS) merupakan reaktor air tekan, berdaya kecil (100 MWe), dan tapaknya berada di lepas pantai. Teknologi ini dikembangkan berdasarkan teknologi PLTN SMART yang telah ada dan teknologi pengeboran lepas pantai dengan jenis struktur berbasis gravitasi. Hal ini sebagai respons pasca kecelakaan Fukushima, Jepang (2011), untuk meningkatkan sistem keselamatan, mengatasi keterbatasan lahan, dan meminimalisir penolakan masyarakat pada kasus PLTN di tapak daratan. Tujuan dari makalah ini adalah untuk mengkaji prakelayakan implementasi PLTN GBS di Indonesia baik dari segi kelayakan teknologi maupun regulasi. Metode yang digunakan adalah kajian pustaka dan selanjutnya dilakukan analisis deskriptif. Hasil kajian menunjukkan bahwa PLTN SMART lepas pantai patut dipertimbangkan karena menawarkan peningkatan aspek keselamatan, ketersediaan tapak lepas pantai, dan penerimaan masyarakat yang lebih baik. Sejauh ini PLTN SMART lepas pantai belum dapat diimplementasikan di Indonesia karena dibatasi oleh Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 tentang Perijinan Instalasi Nuklir Dan Pemanfaatan Bahan Nuklir, yang menyatakan tapak adalah lokasi di daratan dan PLTN yang dapat dibangun di Indonesia harus sudah teruji.

### ABSTRACT

**PRE FEASIBILITY ASSESMENT OF SMART OFFSHORE NPP (ONPP) OF GRAVITY BASED-STRUCTURE TYPE FOR INDONESIA.** The SMART ONPP GBS-type is a small power (100 MWe) pressurized water reactor, and located at offshore site. This technology was developed based on existing SMART nuclear technology & offshore drilling technology with a gravity-based type of structure. This is a response to the post-Fukushima accident, Japan (2011), to improve the safety system, overcome the land limitations, and minimize the public resistance to NPP cases in the inland. The purpose of this paper is to assess the pre-feasibility of the implementation of GBS NPP in Indonesia both in terms of technological feasibility and regulation. The method used is literature review and continued with descriptive analysis. The result shows that SMART ONPP are worth considering because they offer improved aspects of safety, offshore tread availability, and better public acceptance. So far, this NPP can not be implemented in Indonesia because it is hampered by Government Regulation No. 2 year 2014 regarding Licensing of Nuclear Installation Safety and Security which stipulates that site is an inland location and NPP built in Indonesia should be proven.

Keywords: ONPP, GBS, small reactor, regulation

© 2017 Jurnal Pengembangan Energi Nuklir. All rights reserved

## 1. PENDAHULUAN

Tsunami dan banjir yang merusak dan merendam berbagai infrastruktur, menyebabkan terjadinya kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi di Jepang pada tahun 2011[1]. Kejadian ini meningkatkan kampanye penolakan masyarakat terhadap pendayagunaan PLTN, khususnya oleh lembaga swadaya masyarakat (LSM) anti nuklir dengan slogan BANANA (*Build Absolutely Nothing Anywhwhere Near*

*Anybody*), dan masyarakat lokal yang wilayahnya direncanakan menjadi calon tapak PLTN dengan slogan NIMBY (*Not In My Backyard*)[2-5].

Meskipun kecelakaan PLTN dapat berdampak buruk pada lingkungan sekitarnya, tetapi manfaat PLTN sebagai sumber energi bersih tidak dapat dihapuskan dari portofolio kebutuhan energi dunia. Untuk meningkatkan penerimaan masyarakat terhadap kontribusi PLTN sebagai sumber energi bersih, dampak

\*Penulis korespondensi.  
E-mail:sahalal@batan.go.id

negatif pembangunan dan pengoperasian PLTN harus diminimalisir.

Kebutuhan lahan darat untuk keperluan infrastruktur, seperti kasus pembangunan PLTU di Batang[6,7] dan rencana PLTN di Jepara[8,9], Jawa Tengah, sering memunculkan konflik dengan masyarakat karena mereka menganggap keberadaan infrastruktur ini akan menyebabkan kerusakan lingkungan.

Salah satu solusi yang dikaji untuk meminimalkan dampak pembangunan dan pengoperasian PLTN ini adalah memindahkan lokasi tapak PLTN dari darat ke lepas pantai. Selain itu, Indonesia memiliki lokasi tapak lepas pantai yang potensial khususnya di garis pantai Sumatera bagian Timur, garis pantai Jawa bagian utara, dan garis pantai Kalimantan.

Pendayagunaan energi nuklir di lingkungan laut telah banyak digunakan, khususnya digunakan sebagai energi penggerak kapal induk, kapal selam, kapal dagang (NS Savannah, Otto Hahn, Mutsu) dan kapal pemecah es Rusia[5,10].

Untuk meningkatkan sistem keselamatan paska kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi dan mengatasi keterbatasan lahan di daratan, Korea Selatan mengembangkan teknologi PLTN lepas pantai (*Offshore Nuclear Power Plant, ONPP*) yang didasarkan teknologi struktur berbasis gravitasi (*Gravity Based Structure, GBS*) yang telah banyak digunakan pada teknologi pengeboran minyak dan gas (migas) lepas pantai. Salah satu yang dikembangkan adalah teknologi PLTN SMART-100 MWe (*System-integrated Modular Advanced Reactor*)[5,11-16]. PLTN ini mempunyai sistem keselamatan pasif, yaitu memanfaatkan sistem pendinginan pasif dari perbedaan tekanan air laut dan tekanan dalam ruangan PLTN, dimana air laut merupakan sumber pendingin yang tidak terbatas.

GBS merupakan struktur bangunan yang diletakkan di dasar laut. Kestabilan bangunan didasarkan pada berat, hambatan gesek (lateral), dan sistem keseimbangan (*ballast*)[17].

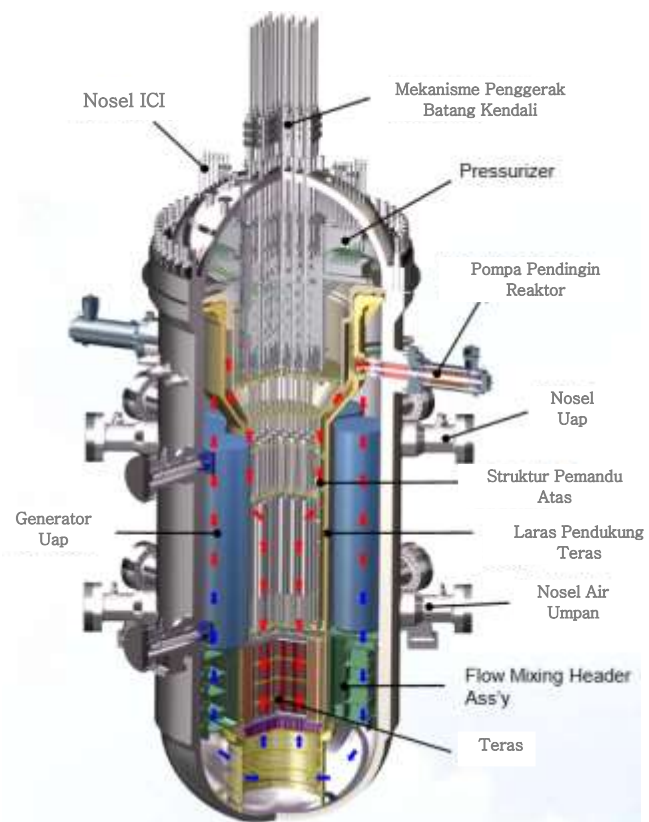
Tujuan studi adalah mengkaji prakelayakan implementasi PLTN SMART GBS di Indonesia baik dari segi kelayakan teknologi dan regulasi.

## 2. TEORI

### 2.1 Konsep Teknologi PLTN SMART Lepas Pantai

PLTN SMART mempunyai ciri sebagai berikut:

- Berdaya kecil dengan daya 330 MWt (setara 100 MWe).
- Berbentuk integral dimana semua komponen utama reaktor (teras reaktor, pompa primer, pembangkit uap) berada dalam bejana reaktor [18]. Hal ini bertujuan untuk mengurangi interkoneksi sistem pemipaan sehingga kemungkinan kecelakaan dapat diminimalisir.
- Modular, yaitu reaktor dirakit di tapak sehingga waktu pembangunan pembangkit lebih cepat dari model konvensional. Tampang lintang PLTN SMART ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tampang Lintang PLTN SMART [18, 19,20]

Teras reaktor PLTN SMART berisi 57 batang bahan bakar dengan uranium diperkaya ( $UO_2$ ) lebih kecil dari 5% [18,19,23]. Karakteristik umum reaktor ini ditunjukkan pada Tabel 1.

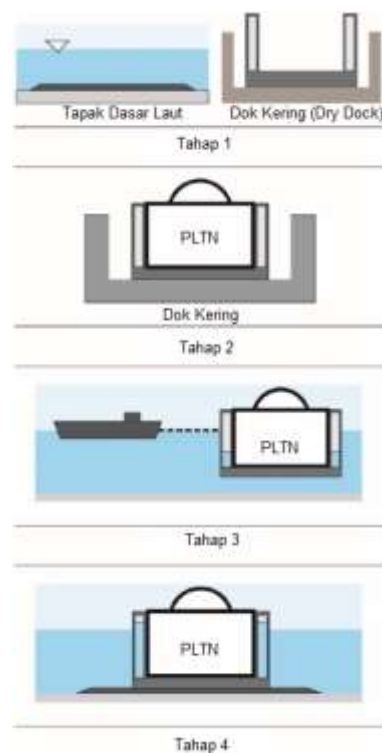
Tabel 1. Karakteristik Umum PLTN SMART [18]		
Karakteristik Operasi		
Daya	Termal	330 MWt
	Listrik	100 MWe
Umur Operasi		60 tahun
Sistem Operasi	Tekanan operasi	15 MPa
	Suhu <i>inlet</i>	270 °C
	Suhu <i>outlet</i>	310 °C
	Tinggi	2 m
Teras Reaktor	Diameter	1,8 m
	Kerapatan daya tipe	62,6 kW/l 17 x 17
	Bahan bakar material siklus	$UO_2/4,95\%$ 3 tahun

Sistem keselamatan reaktor ini menerapkan sistem keselamatan melekat dan sistem keselamatan pasif. Gaya penggerak sistem pasif memanfaatkan fenomena alamiah yang diperoleh dari perbedaan tekanan dan gravitasi. Ada dua jenis sistem keselamatan kedaruratan ketika terjadi operasi abnormal yaitu *emergency passive containment cooling system* (EPCCS) dan *emergency passive reactor vessel cooling system* (EPRVCS) [11].

Paska kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi Jepang pada tahun 2011, beberapa negara mulai mengembangkan PLTN lepas pantai, seperti PLTN SMART lepas pantai tipe GBS [5]. Teknologi PLTN tipe GBS dikembangkan berdasarkan konsep teknologi struktur dan konstruksi pengeboran minyak dan gas di lepas pantai (*off-shore oil drilling*) dan teknologi PLTN konvensional yang telah terbukti operasionalnya [5,12,13,21,22]. Teknologi struktur dan proses konstruksi ini telah berjalan dengan sempurna pada terminal LNG Adriatic.

Kedua jenis teknologi ini diadopsi untuk meningkatkan sistem keselamatan dan mengatasi keterbatasan tapak PLTN di darat.

PLTN SMART lepas pantai tipe GBS dikonstruksi di galangan kapal yang berada di darat, kemudian ditarik dengan *tugboat* ke lokasi tapak lepas pantai yang telah ditentukan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pengisian bahan bakar dan komisioning dilakukan di lokasi tapak lepas pantai.



Gambar 2. Konsep PLTN SMART GBS [1].

Menurut Haug et al., 2003; Waagaard, 2004 dalam Kihwan Lee [11], parameter desain PLTN tipe GBS harus memenuhi berbagai aspek persyaratan berikut:

- volume bangunan PLTN dan fasilitasnya
- sistem utama PLTN
- kemampuan operasi dan perisai radiasi dalam berbagai variasi skenario kecelakaan
- arah arus (current drift)*
- konstruksi spesifik PLTN
- kondisi dasar laut dan kedalaman laut
- kendala konstruksi (kendala selama *tow-out*, instalasi, dan *yard/dry-dock*)
- kendala di setiap lokasi lepas pantai
- distribusi keseimbangan beban
- tsunami
- gempa dan seismik

## 2.2 Tapak Lepas Pantai

Indonesia merupakan negara kepulauan yang mempunyai panjang garis pantai 81.000 km, sehingga sangat besar kemungkinan untuk dimanfaatkan sebagai lokasi tapak PLTN lepas pantai. Secara umum, tapak lepas pantai menawarkan beberapa keuntungan yaitu konstruksi dilakukan di galangan kapal (*shipyard*) yang berada di darat, tapak lebih sederhana, pengaruhnya terhadap lingkungan

jauh lebih kecil, dan dekomisioning dapat dilakukan di tempat khusus[5]. Manfaat tapak di lepas pantai adalah reaktor dapat menggunakan laut sebagai pendingin tak terbatas (*infinite heat sink*)[5,24].

Rekayasa geoteknik merupakan kendala utama pemanfaatan lingkungan lepas pantai sebagai lokasi tapak PLTN lepas pantai. Beberapa rekayasa geoteknik yang perlu diperhatikan, sebagai berikut[25]:

- Pengembangan permukaan tanah (*seabed*) dan investigasi tapak
- Kondisi tanah tidak umum (*mis.* ada material karbonat, gas)
- bangunan lebih tinggi dari permukaan laut (tergantung kedalaman tapak)
- strukturbangunan lepas pantai akan menghadapi beban lateral (seperti momen gaya relatif terhadap berat bangunan) dan beban putar (*cyclic loading*).
- standar kode dan teknik berbeda dengan yang digunakan di darat.
- modifikasi desain selama konstruksi amat mahal (sulit diprediksi)
- usiastruktur berkisar 25 – 50 tahun.

Bangunan lepas pantai umumnya terbuat dari beton bertulang karena mempunyai unjukkerja sangat baik[26], dengan sifat-sifat sebagai berikut:

- daya tahanan (*durability*) sangat tinggi
- minim pemeliharaan
- pergerakan lebih baik ketika struktur diambangkan
- cocok untuk lingkungan yang keras, seperti daerah gempa
- mampu menahan beban berat
- tahan api
- tahan korosi
- tidak membutuhkan jangkar karena dimensi luas dan berat sangat besar sehingga cocok untuk landasan lembek dan tidak kuat.

### 3. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif yang dilakukan dengan cara mempelajari berbagai pustaka tentang perkembangan teknologi lepas pantai,

teknologi PLTN SMART kondisi geografis laut, dan sistem regulasinya.

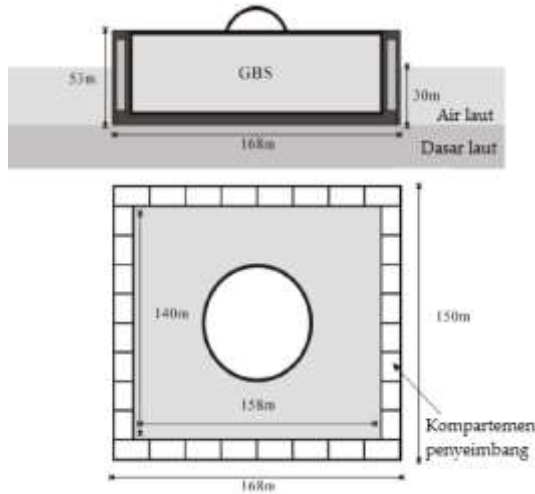
### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Status teknologi PLTN SMART lepas pantai tipe GBS masih dalam fase disain konsep. Informasi berat dari jenis-jenis bangunan SMART ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Berat Komponen Utama Reaktor[13]

Jenis Bangunan	Berat (Ribu Ton)
Bangunan Reaktor	60
Bangunan Pendukung ( <i>auxiliary</i> )	110
Bangunan lain	75
Bangunan Turbin generator	140
Fasilitas di dalam <i>Base mat</i>	12
Fasilitas lainnya	20
<b>Total berat PLTN SMART</b>	<b>429</b>

Bangunan PLTN SMART lepas pantai mempunyai dimensi panjang 168 m, lebar 168 m dan tinggi 53 m pada kedalaman laut antara 30 – 35 m[11,12]. Kedalaman laut untuk tapak sangat tergantung pada massa jenis bangunan reaktor dan massa jenis air di lokasi tapak. Tinggi bangunan dari permukaan laut kira-kira 18 m. Kelebihan tinggi bangunan ini difungsikan untuk menahan gelombang laut, dan tsunami. Bangunan ini juga digunakan untuk kantor, kamar staff, dan ruang pendukung lainnya. Umumnya kondisi dasar laut dan kedalaman laut merupakan parameter utama pada konstruksi dan instalasi. Ketinggian bangunan sangat dipengaruhi karakteristik fisik pantai, seperti ketinggian gelombang, perbedaan pasang surut, dan lain-lain. Perubahan tinggi dan lebar bangunan akan mempengaruhi stabilitas bangunan tersebut. Makin tinggi bangunan akan berimplikasi pada penurunan stabilitas. Untuk menstabilkan operasi, elevasi pusat massa harus berada diatas elevasi pusat gravitasi. Dengan menempatkan komponen-komponen berat di bagian bawah struktur, stabilitas hidrostatis dapat diperoleh[13,16].



Gambar 3. Penampang lintang PLTN SMART Lepas Pantai [13]

Permasalahan utama dari perancangan teknologi GBS adalah cara membangun, mengangkut dan memasang instalasi struktur tersebut di dasar laut [27]. Faktor lingkungan juga memegang peranan penting dalam rancang bangunnya, dengan mempertimbangkan faktor geoteknik, faktor gempa dan seismik, faktor kondisi laut (arus, ketinggian gelombang, kecepatan angin), tsunami, ketinggian pasang surut, dan lain-lain.

Tapak PLTN ini berada di lepas pantai yang dangkal dan struktur pondasi yang digunakan adalah struktur berbasis gravitasi seperti yang umum digunakan pada pengeboran minyak/gas lepas pantai. PLTN ini merupakan reaktor modular yang dibangun di galangan kapal. PLTN yang telah siap dioperasikan kemudian ditarik dengan tongkang dan ditambatkan pada pondasi yang telah disiapkan. PLTN ini dapat ditarik ke lokasi tapak dengan *tugboat* jika massa jenis PLTN harus lebih kecil dari massa jenis air laut ( $\rho_{\text{air laut}}$ ). Ketika berada di tapak, massa jenis total instalasi PLTN ( $\rho_{\text{PLTN}}$ ) harus lebih besar dari massa jenis air laut ( $\rho_{\text{air laut}}$ ). Massa jenis total instalasi PLTN ( $\rho_{\text{PLTN}}$ ) adalah sebagai berikut:

$$\rho_{\text{PLTN}} = \frac{m_{\text{PLTN}}}{V_{\text{PLTN}}} \quad (1)$$

dimana,  $m$  = massa (kg)  
 $V$  = volume ( $\text{m}^3$ )

Berat total bersama seluruh komponen pendukung (total berat PLTN SMART+ GBS+ fasilitas lainnya) sebesar 1.101.450 ton [13] dan data dari Gambar 3 menunjukkan bahwa volume total sebesar  $1.335.600 \text{ m}^3$  ( $168 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 53 \text{ m}$ ), sehingga massa jenis ( $\rho_{\text{SMART}}$ ) kira-kira sebesar  $824,69 \text{ kg/m}^3$ . Volume bangunan reaktor adalah  $1.172.360 \text{ m}^3$  ( $158 \text{ m} \times 140 \text{ m} \times 53 \text{ m}$ ). Andaikan tebal dinding kompartemen rata-rata 1 m, maka volume bangunan kompartemen penyeimbang kira-kira sebesar  $56.040 \text{ m}^3$  ( $1.228.400 \text{ m}^3 - 1.172.400 \text{ m}^3$ ).

Bangunan PLTN dapat menapak di tapak dasar laut jika massa jenis PLTN lebih besar dari massa jenis air laut atau massa total bangunan lebih besar dari massa air laut yang dipindahkan. Massa jenis PLTN SMART ketika ditarik ke lokasi tapak adalah  $824,69 \text{ kg/m}^3$  dan massa jenis air laut  $1025 \text{ kg/m}^3$ . Oleh karena itu dibutuhkan tambahan massa jenis PLTN lebih besar dari  $200,31 \text{ kg/m}^3$  ( $1025 \text{ kg/m}^3 - 824,69 \text{ kg/m}^3$ ) atau  $W_{\text{PLTN}} > \rho_{\text{air}} \times V_{\text{bangunan}}$  setara dengan 1368.900 ton ( $1025 \text{ kg/m}^3 \times 1.335.600 \text{ m}^3$ ). Hal ini dapat dicapai dengan menambahkan air laut minimal seberat 267.540 ton atau setara dengan  $261,01 \text{ m}^3$  air laut. Volume air laut yang dibutuhkan juga tergantung pada kondisi lingkungan tapak, seperti pasang surut laut, kecepatan arus, dan lain-lain.

Dinding bangunan PLTN harus mampu menahan gaya tekan hidrostatik air laut. Tekanan pada dinding bangunan PLTN setara dengan tekanan hidrostatik pada kedalaman tertentu, dimana  $p = \rho \cdot g \cdot h$ . Jika kedalaman tapak 30 m, massa jenis air laut  $1025 \text{ kg/m}^3$  dan percepatan gravitasi  $9,8 \text{ m/s}^2$  maka tekanan hidrostatik yang dialami dasar reaktor sebesar  $301.350 \text{ N/m}^2$ .

Bangunan PLTN ini mempunyai kompartemen-kompartemen (ruang kosong) yang berfungsi untuk memperbesar dan memperkecil massa jenis PLTN saat dibutuhkan. Kompartemen-kompartemen ini dapat diisi dan dikosongkan sesuai kebutuhan dan juga berfungsi sebagai system *ballasting* dan *deballasting* (penyeimbang) ketika berada di lokasi tapak (*seafloor*). Bangunan sebagian besar berada di dalam laut dan sebagian lagi berada di atas permukaan laut. Tinggi bangunan yang berada di atas permukaan laut harus memperhitungkan ketinggian pasang

surut, dan tinggi gelombang (baik dalam keadaan normal maupun ketika terjadi tsunami).

Arus merupakan sumber beban horizontal untuk struktur lepas pantai. Karena efek Bernoulli, arus juga dapat menyebabkan gaya ke atas dan ke bawah pada permukaan struktur dan dapat menginduksi vibrasi struktur bangunan. Arus bertanggung jawab pada pusran di sekitar struktur, yang mana menyebabkan gesekan (*scouring*) dan erosi tanah. Jenis-jenis arus adalah sirkulasi lautan, geostropik, tidal, dorongan angin, dan kerapatan arus (*density current*).

Kecepatan arus laut dapat menyebabkan PLTN bergeser dari lokasinya, sehingga faktor gaya gesek harus diperhitungkan ketika merancang dasar bangunan PLTN sesuai dengan kondisi tapak dasar laut. Agar PLTN tetap di lokasinya, maka gaya gesek statis PLTN ( $f_s$ ) harus lebih besar dari gaya gesek kinetiknya ( $f_k$ ), dimana rumusan gaya gesek ( $f$ ) sebagai berikut,

$$f = \mu \times N \quad (2)$$

Dimana,  $\mu$  = koefisien gesek  
 $N$  = gaya normal

Besar gaya normal yang dibutuhkan PLTN agar tetap dalam keadaan statis/tidak bergeser atau terkubur sangat dipengaruhi oleh struktur tapak dasar laut, dan berbagai faktor beban lingkungan baik arah horizontal maupun arah vertikal seperti angin, gelombang, arus, dan temperatur laut [28,29]. Faktor gempa bumi dan *geohazards* juga menjadi pertimbangan utama. Semua fenomena ini dapat mempengaruhi integritas (kemampuan struktur) selama pengoperasian. Bila gerak orbital gelombang mencapai dasar laut (*seabed*), maka gerak gelombang ini akan mempengaruhi transpor sedimen. Pada perairan dangkal, gelombang dapat menimbulkan peningkatan tekanan pori pada tanah (*soil*), yang dapat menyebabkan longsor. Hal ini akan menyebabkan hilangnya daya dukungan dasar laut pada struktur bangunan PLTN. Oleh karena itu, akurasi data kondisi lepas pantai (seperti gelombang, pengaruh beban, laju arus) adalah sangat penting pada penentuan nilai parameternya[30,31,32].

Reaktor ini mempunyai sistem keselamatan pasif dan inheren. Dalam keadaan darurat, sistem keselamatan pasif bekerja berdasarkan perbedaan tekanan antara tekanan hidrostatik di luar PLTN dan di dalam ruangan PLTN ( $p_{luar} > p_{reaktor}$ ). Hal ini dapat diperoleh dengan meletakkan PLTN pada kedalaman tertentu, sesuai rumus tekanan hidrostatik ( $p = \rho.g.h$ ). Pada PLTN ini, laut merupakan sistem pendingin tak terbatas[5,24] dan bekerja secara pasif[11,12]. Dari hasil perhitungan dan analisis yang dilakukan oleh Kihwan[11-12], tapak PLTN GBS berada pada kedalaman 30-35 m.

Berdasarkan ketinggian tsunami yang terjadi di Jepang pada tahun 2011 dan tekanan air laut untuk sistem pendinginan pasif jika terjadi kecelakaan. Dengan menggunakan persamaan *shallow water* dan teori kekekalan energi, ketinggian gelombang tsunami dapat diperkirakan pada kedalaman laut tertentu, seperti diilustrasikan pada rumus dan Tabel 3 berikut[5,11]:

$$\frac{H_A}{H_B} = \left[ \frac{h_B}{h_A} \right]^{1/3} \quad (3)$$

dimana: H = tinggi gelombang (m)  
 h = kedalaman laut (m)  
 A dan B = lokasi

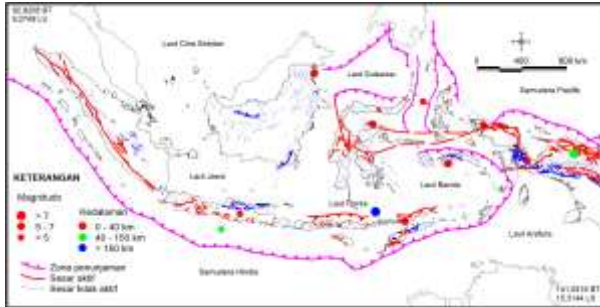
Tabel 3. Ilustrasi kejadian gempa Jepang pada tahun 2011 dan rencana tapak PLTN SMART

	Pusat Gempa	PLTN SMART
Kedalaman Laut	204 m	30 m
Tinggi Tsunami	6,7 m	10,8 m

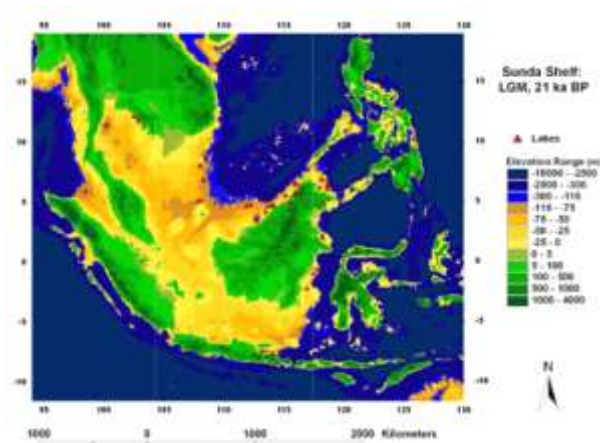
Ketinggian bangunan dari permukaan laut harus lebih tinggi dari tinggi tsunami yang mungkin terjadi. Pada Tabel 3 ditunjukkan bahwa tinggi tsunami yang akan terjadi pada kedalaman laut 30 m yaitu setinggi 10,8 m. Oleh karena itu, ketinggian bangunan dirancang lebih dari 20 m dari permukaan laut. Hal ini juga memperhitungkan tsunami terjadi saat laut dalam keadaan pasang surut. Sebagaimana terlihat pada Gambar 3, PLTN SMART GBS yang dikaji memiliki ketinggian 23 m di atas permukaan laut.

Air laut merupakan peredam dampak gelombang dan penyerap energi gelombang gempa yang terjadi. Jika terjadi tsunami, maka

sistem keselamatan pasif yang diimplementasi pada teknologi PLTN ini akan mendinginkan teras reaktor secara alamiah dengan memanfaatkan perbedaan tekanan air laut dengan tekanan di dalam PLTN. Sistem pendinginan teras ketika terjadi tsunami tidak tergantung pada catu daya listrik.



Gambar 4. Peta Tektonik dan Sebaran Pusat Gempa Bumi Merusak Di Indonesia Tahun 2015[33].



Gambar 5. Karakteristik Kedalaman Laut dan Ketinggian Daratan Indonesia[34]

Dari data Gambar 4 dan Gambar 5, laut Indonesia yang sangat luas merupakan calon tapak potensial yang sangat signifikan untuk dimanfaatkan di masa datang, khususnya laut di antara Sumatera bagian Timur-Jawa bagian Utara, Kalimantan, dan Sulawesi bagian barat & selatan, tetapi untuk tapak terpilih perlu dilakukan studi kelayakan yang lebih detail. Sedangkan laut di bagian barat Sumatera, selatan Jawa, laut Sulawesi bagian Timur & Utara, laut di Kepulauan Nusa Tenggara dan Irian secara umum kurang sesuai karena berada di daerah sesar aktif dan kedalaman rata-rata di atas 100 m. Namun demikian masih memungkinkan dilakukan eksplorasi di lokasi tertentu untuk mencari calon tapak potensial.

*Safety Standards Series No. NS-R-3* tentang *Site Evaluations for Nuclear Instalations* yang diterbitkan oleh International Atomic Energy Agency (IAEA) menyatakan bahwa tapak PLTN dapat berada di darat maupun di laut[35]. Demikian juga dengan *Atomic Energy Atomic Licencing Boards Malaysia (AELB)* pada *Regulatory Requirements for Site Evaluation of Nuclear Power Plant* tidak menyatakan tapak PLTN harus berada di darat[36]. Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir yang termaktub pada pasal 1 menyatakan bahwa tapak adalah lokasi di daratan yang dipergunakan untuk pembangunan, pengoperasian, dan dekomisioning, 1 (satu) atau lebih instalasi nuklir beserta sistem terkait lainnya [37], sehingga implementasi PLTN GBS terkendala oleh regulasi ini. Sedangkan pada pasal 6 menyatakan bahwa PLTN yang dapat dikonstruksi di Indonesia harus sudah teruji (yang sudah mendapat lisensi konstruksi dari negara produsen), sehingga PLTN GBS belum bisa diimplementasikan karena belum teruji.

PLTN mengimplementasikan sistem pertahanan berlapis (*defence in depth*), sistem proteksi fisik dan sistem seifgard. Untuk instalasi nuklir, sistem terbagi atas tiga (3) zona, yaitu zona vital, zona terlarang, dan zona peringatan baik di laut maupun di udara sehingga meminimalisir ancaman terhadap keberadaannya. Selain sistem zonasi yang diterapkan PLTN saat ini, PLTN GBS juga harus mengadopsi sistem zonasi yang berlaku di dunia pelayaran dan penerbangan, yaitu pemanfaatan sistem sonar, dan lampu suar. Eskalasi terorisme yang ada saat ini juga perlu diperhitungkan sehingga sistem deteksi dini dan peringatan dini juga perlu diterapkan sehingga resiko yang mungkin terjadi dapat diminimalisir dan dicegah.

Tapak di lepas pantai harus berada di daerah yang landai untuk meningkatkan unjuk kerja dan mengurangi biaya preparasi tapak. Tapak yang dekat ke tepi pantai akan mengurangi biaya pembangunan jaringan transmisi dan transportasi personal. Sistem isolasi digunakan untuk mengurangi percepatan dampak gempa dengan menyesuaikan berat total PLTN GBS. Isu proteksi fisik merupakan isu sensitif dari

ancaman eksternal, seperti terorisme, sabotase, dan lain-lain). Serangan bawah laut merupakan ancaman yang sulit dideteksi sehingga perlu dipertimbangkan lebih detail. Untuk mengurangi dampak ancaman dari luar, dinding beton dibangun dua lapis. Hal ini akan berdampak pada peningkatan biaya konstruksi. Faktor gelombang laut dan angin puting beliung akan berdampak pada mobilisasi pekerja dari darat ke reaktor dan sebaliknya.

## 5. KESIMPULAN

PLTN SMART lepas pantai ini dirancang untuk meningkatkan sistem keselamatan nuklir karena air laut merupakan pendingin yang tidak terbatas yang bekerja secara pasif, sehingga dampak kecelakaan nuklir dapat diminimalisir. Status teknologi ini masih dalam fase disain konseptual.

PLTN SMART GBS juga membuka peluang bagi tapak di lepas pantai karena Indonesia memiliki lokasi tapak lepas pantai potensial, khususnya di antara di garis pantai Sumatera bagian Timur, garis pantai Jawa bagian utara, dan garis pantai Kalimantan. Tapak lepas pantai diharapkan dapat meminimalisir penolakan PLTN pada kasus tapak daratan.

Implementasi PLTN SMART lepas pantai di Indonesia sejauh ini terbentur oleh Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 tentang perizinan instalasi nuklir dan pemanfaatan bahan nuklir pada pasal 1 yang menyatakan bahwa tapak adalah lokasi di daratan, dan bahwa PLTN yang dibangun di Indonesia haruslah yang sudah teruji.

PLTN SMART lepas pantai patut dipertimbangkan karena menawarkan peningkatan aspek keselamatan, ketersediaan tapak lepas pantai, dan penerimaan masyarakat yang lebih baik.

## SARAN/REKOMENDASI

PKSEN perlu mempertimbangkan dan mengusulkan untuk memasukkan kajian PLTN lepas pantai sebagai alternatif ke dalam rencana strategis BATAN.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Dr. Suparman sebagai Kepala Bidang Kajian Infrastruktur PKSEN yang memberi saran perbaikan makalah ini.

## DAFTAR ACUAN

- [1]. S. M. Lumbanraja, dkk, "Manajemen Keselamatan PLTN Paska Kecelakaan Fukushima Daiichi Unit 1~4". *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, ISSN, Volume 11, Nomor 2. pp 122-130, Desember 2011.
- [2]. M. Wester-Herber, "Underlying Concerns In Land-Use Conflicts-The Role Of Place Identify In Risk Perception", *Enviromental Science & Policy*, volume 7, issue 2, pages 109-109, ELSEVIER, 2004
- [3]. S. W. Kidd, "Nuclear Power-Economics and Public Acceptance", *Energy Strategy Reviews*, Volume 1, Issue 4, Pages 277-281, ELSEVIER, 2013
- [4]. R Aditya, (13 September 2014), *Warga Temui Pemodal Desak Batalkan PLTU Batang*, <http://www.tempo.co/read/news/2014/09/13/058606631/Warga-Temui-Pemodal-Desak-Batalkan-PLTU-Batang>
- [5]. S. M. Lumbanraja, dkk, "Implementasi PLTN Lepas Pantai di Indonesia", dalam *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2015*, Denpasar 15-16 Oktober 2015
- [6]. BBC Indonesia, (9 September 2014) *Di Jepang, warga Batang kampanye tolak PLTU Batang*, [http://www.bbc.co.uk/indonesia/berita\\_indonesia/2014/09/140909\\_polemik\\_pltu\\_batang\\_jateng](http://www.bbc.co.uk/indonesia/berita_indonesia/2014/09/140909_polemik_pltu_batang_jateng)
- [7]. T. Aidilla, (21 Maret 2015), *Warga Desak Jokowi Batalkan Proyek PLTU Terbesar di Asia Tenggara*, <http://nasional.republika.co.id/berita/nasional/umum/15/03/21/nljx2k-warga-desak-jokowi-batalkan-proyek-pltu-terbesar-di-asia-tenggara>
- [8]. T. Rachman, (11 Juni 2011), *Masyarakat Jepara Unjukrasa Tolak PLTN Semenanjung Muria*, <http://www.republika.co.id/berita/regional/nusantar/11/06/11/lmmitl-masyarakat-jepara-unjukrasa-tolak-pltn-semenanjung-muria>
- [9]. B. Amarudin, (10 September 2013), *Calon Kades Jepara Teken Kontrak Politik Tolak PLTN*, <http://www.tempo.co/read/news/2013/09/10/058512029/Calon-Kades-Jepara-Teken-Kontrak-Politik-Tolak-PLTN>
- [10]. S.E. Hirdaris, et al, "Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion", *Ocean Engineering*, 79 (2014) 101-150, ELSEVIER, 2014.
- [11]. Kihwan Lee, 2012, *An Offshore Nuclear Power Plant Mounted on Gravity based-structure and its seismic performance*, KAIST, [http://library.kaist.ac.kr/thesis02/2012/2012\\_M020104378\\_S1Ver2.pdf](http://library.kaist.ac.kr/thesis02/2012/2012_M020104378_S1Ver2.pdf), diunduh 12 Jan 2015
- [12]. K. Lee, et al, "A New Design Concept For Offshore Nuclear Power Plants With Enhanced safety"



- Features”, *Nuclear Engineering and Design* Vol 254, pp. 129–141, ELSEVIER, 2013.
- [13]. K. Min-Gil, et al, “Conceptual Studies of Construction and Safety Enhancement of Ocean SMART Mounted on GBS”, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 278, pp. 558–572, ELSEVIER, 2014
- [14]. K. Min-Gil, et al, “Evaluation of Passive Containment Cooling System Design of SMART Built in GBS for Ocean Environment Under the Fukushima Accident Condition”, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Gyeongju, Korea, October 24–25, 2013,.
- [15]. S. Jong-Tae, (2013 June 18–20), *Small and Modular Reactor Development, Safety and Licensing in Korea*, IAEA, Vienna, Available: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-06-18-06-20-TWG-NPTD/35-korea-smr.pdf>. diunduh 12 Jan 2015
- [16]. L. Kang-Heon, et al, “Recent Advances In Ocean Nuclear Power Plants”, *Energies*, Vol 8, pp. 11470–11492, ELSEVIER, 2015
- [17]. P. A. Frieze, (6 Januari 2015) *Offshore Structure Design and Construction, Encyclopedia of Life Support Systems* (EOLSS), <http://www.eolss.net/Sample- Chapters/C05/E6-177-OD-01.pdf>
- [18]. S. M. Lumbanraja, Yuliasuti, “Kajian Pemanfaatan PLTN SMART untuk Kawasan Bareleng”, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Volume 8, Nomor 2, 2006
- [19]. K. B. Park, “SMART an Early Deployable Integral Reactor for Multipurpose Applications”, INPRO Dialogue Forum on Nuclear Energy Innovations: CUC for Small & Medium-sized Nuclear Power Reactors, Vienna, Austria, 10–14 October 2011
- [20]. K. Min Kim, et al, “Experimental and Numerical Study on Local Pressure Distributions in A System-Integrated Modular Reactor”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol 47, pp. 216–224, ELSEVIER, 2012
- [21]. M. Abrams, (6 Januari 2015), *Offshoring Nuclear Plants*, Available: <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/nuclear/offshoring-nuclear-plants>.
- [22]. WNA, (16 April 2014), *New Concept for Offshore Nuclear Plant*, World Nuclear News, <http://www.world-nuclear-news.org/nn-new-concept-for-offshore-nuclear-plant-1604141.html>,
- [23]. S. G Hong, J. S. Song, “A Preliminary Simulation Study of Dynamic Rod Worth for the SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) reactor”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol 60, pp. 350–356, ELSEVIER, 2013
- [24]. J. Morzinski, J. Boungiorno, (12 Januari 2015), *MIT Offshore Floating Nuclear Power Plants*, <https://wikis.mit.edu/confluence/display/FLOATING REACTOR/MIT+ Offshore+ Floating+ Nuclear+ Power+ Plant>,
- [25]. TEVA, (12 Januari 2015), *Concrete Gravity Based Structure Coastal Labrador Natural Gas Extraction, Midterm Reports, Peter Tromans*, <http://www.engr.mun.ca/~sbruneau/teaching/8700project/archive/classof2008/midtevox.pdf>,
- [26]. R. P. Fernández, M. L. Pardo, “Offshore Concrete Structures”, *Ocean Engineering*, Volume 58, pp. 304–316, ELSEVIER 2013
- [27]. S. B. Anderson, (12 Januari 2015), *Gravity Base Foundations*, [http://www.iabse.dk/Seminar\\_WindTurbine/London Array\\_COWI.pdf](http://www.iabse.dk/Seminar_WindTurbine/London Array_COWI.pdf).
- [28]. C. J. Vos, (20 Januari 2015) *25 Years of Gravity Based Structures Design, Construction, and Installations*, part1. <http://www.dmc.nl/upload/publicaties/documenten/25-years.pdf>.
- [29]. Lisa B. Waters, et.al, (20 Januari 2015), *Design And Construction of Gravity Based Structure and Modularized LNG Tanks for the Adriatic LNG Terminal*, <http://www.cne.es/cgibin/BRSCGI.exe?CMD=VERO BJ&MLKOB=311697274848>,
- [30]. W. Qiu, et.al, “Uncertainties Related To Predictions of Loads and Responses for Ocean And Offshore Structures”, *Ocean Engineering*, Vol 86, pp. 58–67, ELSEVIER, 2014
- [31]. R.S. Orr, C. Dotson, “Offshore Nuclear Power Plants”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol 25, pp. 334–349, ELSEVIER, 1973
- [32]. M. J. Fadaee, et al, “Shakedown Limitofelastic Plastic Offshore Structures Under Cyclic Wave Loading”, *Ocean Engineering*, Vol 35, pp. 1854–1861, ELSEVIER, 2008
- [33]. ESDM, (Mei 2016), *Gempa Merusak di Indonesia 2015*, <http://geomagz.geologi.esdm.go.id/gempa-merusak-di-indonesia-2015/>
- [34]. E. Sathiamurthy, H. K. Voris, “Maps of Holocene Sea Level Transgression and Submerged Lakes on the Sunda Shelf”, *The Natural History Journal of Chulalongkorn University*, Vol 2: pp. 1–43, 2006
- [35]. IAEA, *Site Evaluation for Nuclear Installations*, Safety Requirements Series No. NS-R-3, Vienna 2003
- [36]. AELB, *Regulatory Requirements For Site Evaluation of Nuclear Power Plant*, Atomic Energy Atomic Licencing Boards (AELB) Malaysia, Selangor 2011
- [37]. BAPETEN, Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 Tentang Keselamatan dan Keamanan Instalasi Nuklir, Jakarta 2014