

KONSEP TEKNOLOGI REAKTOR NUKLIR SEBAGAI SISTEM PROPULSI KAPAL PERANG LOGISTIK LANDING PLATFORM DOCK

TECHNOLOGY CONCEPT OF NUCLEAR REACTOR AS PROPULSION SYSTEM ON LOGISTIC WARSHIP LANDING PLATFORM DOCK

Muhamad Irfan¹, Romie Oktovianus Bura², Dedy Wahyudi³

Universitas Pertahanan

muhamad.irfan@tp.idu.ac.id, romiebura@idu.ac.id, dewahyudi79@yahoo.co.id

Abstrak – Saat ini kapal perang belum dapat beroperasi secara optimal akibat permasalahan pasokan bahan bakar. Untuk mengatasi permasalahan kekurangan pasokan BBM dan ancaman kelangkaan minyak bumi dunia di masa depan, maka perlu dipikirkan strategi yang tepat dalam arah kebijakan pembangunan kapal perang TNI AL. Salah satu sumber EBT yang sudah digunakan sejak cukup lama dan kemungkinan akan menjadi pilihan menarik adalah energi nuklir sebagai sistem propulsi kapal perang. Pada penelitian ini dilakukan analisis konsep teknologi reaktor nuklir sebagai sistem propulsi yang tepat untuk diterapkan pada kapal LPD. Setelah studi literatur berbagai klasifikasi reaktor nuklir dan referensi desain reaktor nuklir yang telah ada, ditentukan konsep teknologi reaktor nuklir yang sesuai dengan standar kebutuhan tersebut sehingga dikerucutkan menjadi beberapa konsep teknologi reaktor nuklir yang dipilih, dan akhirnya ditentukan satu sebagai konsep teknologi reaktor nuklir dengan metode AHP, yaitu reaktor nuklir tipe MSR yang merupakan reaktor daya cepat pembiak modular kecil yang mampu menghasilkan daya termal sekurang-kurangnya 33 MWth, berbahan bakar Thorium-Uranium²³³ dan berpendingin garam cair sehingga memanfaatkan tekanan rendah serta mampu beroperasi pada suhu yang sangat tinggi.

Kata Kunci: Konsep Teknologi, Landing Platform Dock, Molten Salt Reactor, Reaktor Nuklir, dan Sistem Propulsi.

Abstract – At present warships cannot operate optimally due to fuel supply problems. To overcome the problem of shortages of fuel supply and the threat of scarcity of world oil in the future, it is necessary to think of the right strategy in the direction of the Navy's warship development policy. One source of EBT that has been used for quite a long time and is likely to be an attractive choice is nuclear energy as a warship propulsion system. In this research, an analysis of the concept of nuclear reactor technology is used as an appropriate propulsion system to be applied to LPD vessels. After a literature study of various classifications of nuclear reactors and reference designs for existing nuclear reactors, the concept of nuclear reactor technology was determined in accordance with the standard requirements so that it was reduced to several concepts of selected nuclear reactor technology, and finally determined one as a concept of nuclear reactor technology with the AHP method, which is an MSR type nuclear reactor which is a small modular breeder fast power reactor capable of producing thermal power of at least 33 MWth, fueled by Thorium-Uranium²³³ and liquid salt cooled so that it utilizes low pressure and is able to operate at very high temperatures.

Keywords: Technological Concept, Landing Platform Dock, Molten Salt Reactor, Nuclear Reactor, and Propulsion System.

¹ Program Studi Teknologi Daya Gerak, Fakultas Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Indonesia.

² Program Studi Teknologi Daya Gerak, Fakultas Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Indonesia.

³ Departemen Permesinan, PT. PAL Indonesia (Persero), Surabaya, Indonesia.

Pendahuluan

Berbicara tentang kapal perang, maka tidak akan terlepas dari konsumsi bahan bakar yang harus disediakan. Kapal perang tidak didesain untuk hemat, tapi lebih ke persoalan performa. TNI AL menghadapi beberapa permasalahan dalam tugasnya mengamankan perairan Indonesia yang sangat luas. Jumlah kapal perang sebagai alat utama operasi TNI AL masih sangat jauh dari cukup untuk mencapai kondisi ideal sesuai standar minimum yang dicitakan⁴. TNI AL juga menghadapi masalah pasokan energi untuk pengoperasian kapal perang yang telah dimiliki. Saat ini kapal perang belum dapat beroperasi secara optimal akibat permasalahan pasokan bahan bakar⁵.

TNI masih mengalami kekurangan pasokan akibat anggaran bahan bakar yang kurang mencukupi. Bahkan tercatat hutang dari penggunaan bahan bakar TNI pada Pertamina setiap tahunnya selalu

bertambah⁶. Purnomo Yusgiantoro menyatakan bahwa dengan pasokan BBM terbatas yang hanya mampu memenuhi keperluan operasi 40% alutsista yang ada pada tahun 2013, TNI masih menanggung beban hutang BBM pada Pertamina sebesar Rp 8 triliun sampai dengan akhir periode kepemimpinan kabinetnya⁷.

Untuk mengatasi permasalahan kekurangan pasokan BBM (Bahan Bakar Minyak) dan ancaman kelangkaan minyak bumi dunia di masa depan, maka perlu dipikirkan strategi yang tepat dalam arah kebijakan pembangunan kapal perang TNI AL⁸. Harus dicari formulasi yang tepat sehingga terwujud satuan kapal perang yang *energy friendly* sehingga tetap dapat dioperasikan secara optimal guna melindungi segenap wilayah perairan Indonesia yang sangat luas, tetapi di sisi juga tidak bermasalah dari sisi pasokan, anggaran bahan bakarnya dan juga aspek teknoekonominya⁹.

⁴ Buku Putih Pertahanan, (Jakarta: Kementerian Pertahanan RI, 2015).

⁵ AECL, 1996, CANDU 6 Technical Outline, Atomic Energy of Canada Limited, Mississauga, Ontario, Canada

⁶ Dewan Energi Nasional. (2013). *Lampiran Surat Nomor 311/DEN/2013 tertanggal 31 Mei 2013 Tentang Draft Peraturan Presiden Republik Indonesia Tentang Kebijakan Energi Nasional*.

⁷ Ahmad, Baiquni. "Tiap tahun TNI utang BBM Rp 8 triliun ke Pertamina", dalam *Harian Merdeka*

Online, <http://www.merdeka.com/uang/tiap-tahun-tni-utang-bbm-rp-8-triliun-ke-pertamina.html>, 18 Desember 2013, diakses pada 16 September 2019.

⁸ David, LeBlanc, 2013, *The Curious Tale of Molten Salt Reactor*, Presentation to Canadian Nuclear Safety Commission, Ottawa Branch.

⁹ AECL, 1981, *CANDU Nuclear Power System*, Atomic Energy of Canada Limited, Mississauga, Ontario, Canada

Terdapat banyak pilihan bahan bakar yang bersumber dari EBT (Energi Baru dan Terbarukan) yang dapat digunakan dalam menghadapi ancaman krisis bahan bakar minyak¹⁰. Salah satu sumber EBT yang sudah digunakan sejak cukup lama dan kemungkinan akan menjadi pilihan menarik adalah energi nuklir¹¹. Sejak pertama kali digunakan oleh Amerika Serikat sebagai sumber energi penggerak kapal selam Nautilus pada tahun 1940, sampai saat ini nuklir sudah menjadi sumber tenaga bagi 452 kapal perang yang dioperasikan oleh 5 negara¹².

Karakteristik nuklir yang memiliki densitas energi yang jauh lebih besar dari pada densitas energi minyak bumi menyebabkan kebutuhan bahan bakar nuklir relatif sedikit. Sedikitnya kebutuhan bahan bakar nuklir mengakibatkan harga bahan bakar nuklir relatif konstan dan juga relatif tidak berpengaruh terhadap total biaya seluruh

rentang operasi instalasi nuklir¹³. Hal ini sangat berbeda dengan kapal perang atau instalasi yang bergantung pada pasokan bahan bakar minyak. Total biaya operasional kapal perang atau instalasi yang bergantung pada bahan bakar minyak akan sangat berpengaruh dengan fluktuasi harga minyak dan pada umumnya biaya bahan bakar akan menjadi sekian kali lipat biaya kapital kapal perang atau instalasi tersebut. Dengan demikian, nuklir memiliki potensi besar untuk dapat menggantikan peran minyak bumi pada sistem keenergian kapal perang.

Dalam era teknologi saat ini, energi nuklir telah menjadi penghasil energi yang cukup menjanjikan karena mampu menghasilkan energi yang jauh lebih besar dalam jangka waktu yang lebih panjang dibandingkan pembangkit energi lainnya, serta aman bagi lingkungan dan kehidupan manusia dengan limbah dan biaya operasi yang lebih rendah¹⁴.

¹⁰ Dewan Perwakilan Rakyat. (2010). *Laporan Kunjungan Kerja Komisi I DPR RI ke Propinsi Nusa Tenggara Barat dalam Reses Masa Persidangan II Tahun Sidang 2010-2011 Tanggal 19-22 Desember 2010*. Jakarta: Penyusun.

¹¹ Nuclear Options for Hydrogen and Hydrogen Based Liquid Fuel Production, MIT Report: MIT-NES-TR-001, September 2003.

¹² Matterson Marine Pty Ltd, "World Warship", dalam <http://www.worldwarships.com>, Oktober 2014, diakses pada 16 September 2019.

¹³ Forsbeg, C. W., Peterson, P. F., Zhao, H.H., 2004, An advanced Molten salt Reactor Using High Temperature Reactor Technology, ICAPP. 2004. MSR. Paper, 2004 International Congress on Advanced in Nuclear Power Plants (ICAPP '04) Embedded International Topical Meeting, 2004 American Nuclear Society Annual Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania.

¹⁴ IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2016. *Advances in Small Modular Reactor Technology*

Reaktor nuklir dapat menggantikan pembangkit energi lainnya yang cenderung mengabaikan polusi udara yang cukup berbahaya untuk makhluk hidup. Bagaimanapun juga pemanfaatan teknologi nuklir perlu persiapan yang matang dari berbagai pihak yang terlibat karena teknologi ini memang dapat menyebabkan kecelakaan besar¹⁵.

Di dunia sejauh ini, pemanfaatan sistem propulsi nuklir pada kapal baru diterapkan pada kapal induk (*aircraft carrier*) dan kapal selam (*submarine*)¹⁶. Oleh karena itu, pada penelitian tesis ini akan dilakukan desain konseptual spesifikasi reaktor nuklir sebagai sistem keenergian pada kapal perang *Landing Platform Dock* (LPD) dan selanjutnya akan dilakukan studi komparasi antara kapal LPD dengan sistem keenergian berbasis nuklir dan sistem konvensional.

Sebuah kapal LPD adalah sebuah kapal perang amfibi yang meluncurkan, membawa dan mendaratkan elemen kekuatan darat untuk misi-misi perang gerak cepat. Kapal-kapal ini umumnya dirancang untuk membawa pasukan ke

zona pertempuran lewat laut dan memiliki kemampuan membawa kekuatan udara terbatas (biasanya helikopter).

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian ini adalah menganalisis klasifikasi dan menentukan konsep teknologi reaktor nuklir sebagai sistem propulsi kapal LPD.

Penelitian ini ada karena munculnya permintaan kepada PT. PAL Indonesia bekerja sama dengan Balitbang Kemhan untuk melakukan desain konseptual spesifikasi reaktor nuklir sebagai sistem keenergian pada kapal perang *Landing Platform Dock* (LPD). Oleh sebab itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi tambahan jawaban, referensi dan rekomendasi bagi PT. PAL Indonesia dan Balitbang Kemhan, maupun berbagai pemangku kepentingan, terkait implementasi reaktor nuklir sebagai sistem keenergian pada kapal LPD.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan diskusi dengan berbagai pihak terkait dan pemangku kepentingan guna

Developments. Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA).

¹⁵ D. A. Copinger and D. L. Moses, *Fort Saint Vrain Gas Cooled Reactor Operation Experience*, Oak Ridge National

Laboratory, NUREG/CR-6839, ORNL/TM-2003/223, January 2004.

¹⁶ Royal Academy of Engineering. (2013). *Future Ship Powering Option: Exploring Alternative Methods of Ship Propulsion*. UK: Royal Academy of Engineering.

mengetahui standar kebutuhan (*requirement standard*) dari reaktor nuklir. Kemudian, dilakukan studi literatur terkait berbagai jenis reaktor nuklir yang digunakan sebagai sistem propulsi dan berbagai klasifikasi reaktor nuklir beserta materialnya, seperti material bahan bakar nuklir, material pendingin, dan lain-lain. Selanjutnya dilakukan analisis regresi linear dari berbagai jenis reaktor nuklir untuk melihat bagaimana hubungan antara variabel daya termal reaktor nuklir dengan variabel tonase kapal guna menentukan daya termal reaktor nuklir pada penelitian ini.

Hingga pada akhirnya dikerucutkan hingga beberapa pilihan konsep teknologi yang paling relevan dan sesuai dengan standar kebutuhan untuk

diterapkan sebagai sistem propulsi kapal LPD. Dari beberapa pilihan konsep teknologi reaktor nuklir tersebut kemudian ditentukan satu konsep teknologi dengan analisis proses hirarki (*Analytic Hierarchy Process*) sehingga pada akhirnya dilakukan pengembangan dari konsep teknologi reaktor yang telah ditentukan tersebut.

Keabsahan dari hasil yang didapatkan dari analisis proses hirarki (AHP) dengan menentukan nilai *Consistency Ratio* (CR). Hasil tentang perbandingan elemen dianggap konsisten (absah/valid) jika nilai CR tidak melebihi 10% ($CR \leq 0,1$). Jika nilai tersebut tidak terpenuhi berarti penilaian yang telah dilakukan mungkin dilakukan secara acak (*random*) dan perlu direvisi.

Tabel 1. Harapan Kriteria Reaktor Nuklir dari Balitbang Kemhan RI

No	Harapan Kriteria Reaktor Nuklir
1	Sistem keamanan & keselamatan tinggi: keselamatan pasif (<i>passive safety</i>)
2	Mampu menghasilkan listrik murah
3	Umur operasi panjang (<i>long-life</i>)
4	Memanfaatkan bahan bakar Thorium
5	Ukuran reaktor kecil: <i>Small Modular Reactor</i> (SMR)
6	Memiliki ketahanan proliferasi
7	Limbah yang dihasilkan sedikit
8	Memiliki fitur lain: desalinasi air

Sumber: Iptekhan Balitbang Kemhan RI, 2020

Tabel 2. Konsep Reaktor Nuklir yang Ditawarkan oleh Thorcon

No	Konsep Reaktor Nuklir yang Ditawarkan
1	Sistem keamanan & keselamatan tinggi: keselamatan pasif (<i>passive safety</i>)
2	Mampu menghasilkan listrik murah bersaing dengan PLTU. Mampu menurunkan BPP dan TDL.
3	Umur operasi panjang (<i>long-life</i>)
4	Memanfaatkan bahan bakar Thorium
5	Ukuran reaktor kecil: <i>Small Modular Reactor</i> (SMR)
6	Memiliki ketahanan proliferasi

7	Limbah yang dihasilkan sedikit
8	Dapat dipindahkan/dimobilisasi melalui jalur laut/sungai
9	Tidak membutuhkan lahan dengan menempatkannya di dermaga/tengah laut.
10	Tahan gempa Melibatkan investasi swasta tanpa APBN Desain reaktor terbukti

Sumber: Throcon Indonesia, 2020

Hasil dan Pembahasan

Balitbang Kemhan RI dan Thorcon Indonesia merupakan dua pihak di Indonesia yang dalam kerjasama melakukan kajian untuk pembangunan teknologi nuklir di Indonesia. Dengan demikian, hasil diskusi ini guna mengetahui standar kebutuhan (*standard requirement*) untuk menjadi dasar dalam membuat konsep teknologi reaktor nuklir.

Pertimbangan Tujuan Penggunaan dari Reaktor Nuklir

Berdasarkan tujuan penggunaan, reaktor nuklir diklasifikasikan menjadi reaktor eksperimental dan reaktor daya. Reaktor eksperimental merupakan reaktor yang digunakan untuk keperluan riset/penelitian dan pembuatan radioisotop sehingga tidak menghasilkan

daya listrik¹⁷. Sedangkan, reaktor daya merupakan reaktor yang digunakan untuk membangkitkan listrik dari energi kalor yang dihasilkannya melalui reaksi nuklir dan dikendalikan dengan batang kendali (*control rod*)¹⁸.

Dalam hal penelitian ini, reaktor nuklir digunakan sebagai sistem propulsi kapal LPD dengan menghasilkan listrik yang dimanfaatkan untuk keperluan kapal, motor listrik propulsi, dan mampu menjadi pembangkit listrik bagi suatu kawasan saat kapal tersebut sedang bersandar di suatu pulau atau tempat¹⁹. Dengan demikian, maka reaktor nuklir digunakan untuk tujuan menghasilkan daya listrik sehingga merupakan reaktor daya²⁰.

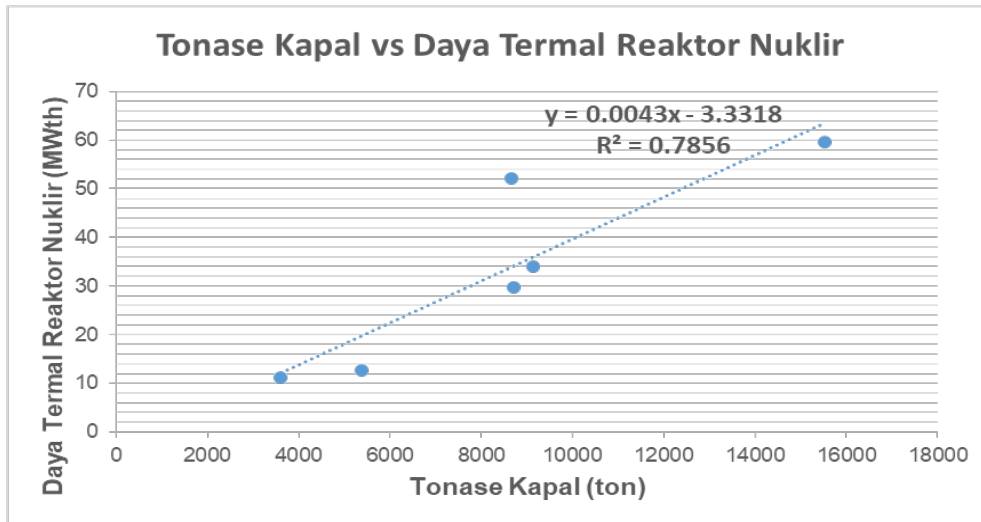
¹⁷ KOPEC, *Korean Standart Nuclear Power Plant, KSNP (OPR) Design*, Korean power Engineering INC

¹⁸ Jacobs, J.G.C.C. (2007). *Nuclear Short Sea Shipping: The Integration of a Helium Cooled Reactor in a 800 Teu Container Feeder*. Netherlands: TU Delft.

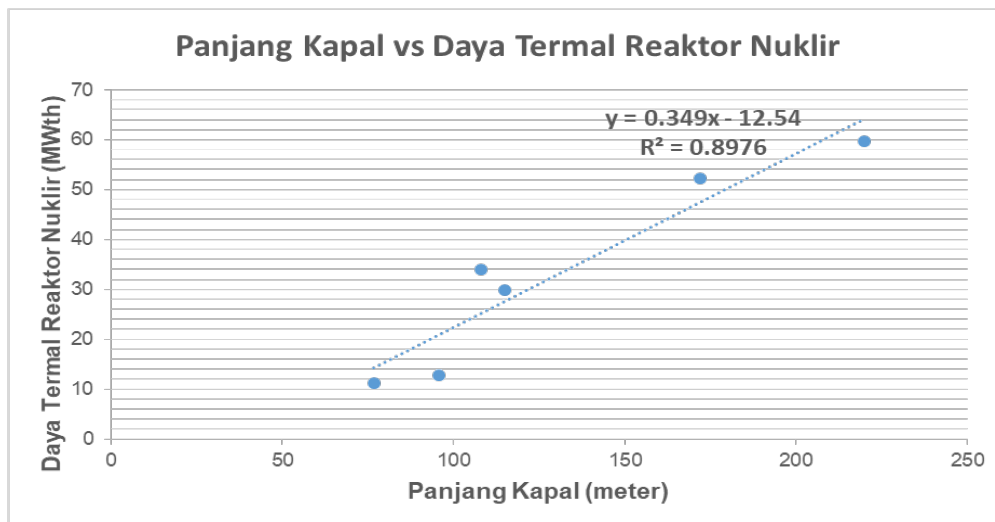
¹⁹ Djati H, Salimy. (2010). *Aplikasi Reaktor Nuklir Temperatur Tinggi Pada Produksi Hidrogen dari*

Air Proses Hibrida Siklus Belerang. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV, 2010 Pusat Pengembangan Energi Nuklir Badan Tenaga Nuklir Nasional.

²⁰ IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2016. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA).



Gambar 1. Grafik Tonase Kapal vs Daya Termal Reaktor Nuklir
Sumber: diolah peneliti, 2020



Gambar 2. Grafik Panjang Kapal vs Daya Termal Reaktor Nuklir
Sumber: diolah peneliti, 2020

Pertimbangan Besar Daya Termal dari Reaktor Nuklir

Pada bagian ini, ditentukan besar daya termal dari reaktor nuklir yang menjadi obyek pada penelitian ini. Hal ini dilakukan dengan melakukan studi literatur dari berbagai reaktor nuklir kapal dengan perbandingan antara tonase, panjang kapal, dan daya propulsi kapal. Data dihimpun dari berbagai referensi yang disajikan dalam bentuk Tabel 4.3.

Dari Tabel 4.3 di atas selanjutnya diolah menjadi suatu grafik perbandingan antara daya termal reaktor nuklir dan tonase kapal. Selanjutnya dibuat suatu persamaan regresi linear dari grafik tersebut, untuk kemudian ditentukan daya termal reaktor nuklir disesuaikan dengan tonase kapal LPD pada konsep desain penelitian ini.

Dari grafik sebagaimana pada Gambar 1, didapatkan persamaan regresi linear sebagai berikut,

$$y = 0,0043x - 3,3318 \quad (4.1)$$

Keterangan:

x: Tonase Kapal (ton)

y: Daya Termal Reaktor Nuklir (MWth)

Berdasarkan profil kapal, kapal LPD 143 M memiliki tonase sebesar 8.486 ton, sehingga besar daya termal reaktor nuklir ditentukan dengan perhitungan persamaan (4.1) sebagai berikut,

$$y = 0,0043x - 3,3318 \quad (4.2)$$

$$y = 0,0043 (8.486 \text{ ton}) - 3,3318 \quad (4.3)$$

$$y = 33,158 \text{ MWth} \quad (4.4)$$

$$y \approx 33,2 \approx 33 \text{ MWth} \quad (4.5)$$

Dari grafik sebagaimana pada Gambar 2, didapatkan persamaan regresi linear sebagai berikut,

$$y = 0,349x - 12,54 \quad (4.6)$$

Keterangan:

x: Panjang Kapal (meter)

y: Daya Termal Reaktor Nuklir (MWth)

Berdasarkan profil kapal, kapal LPD 143 M memiliki panjang sebesar 143 meter, sehingga besar daya termal reaktor nuklir ditentukan dengan perhitungan persamaan (4.6) sebagai berikut,

$$y = 0,349x - 12,54 \quad (4.7)$$

$$y = 0,349 (143 \text{ meter}) - 12,54 \quad (4.8)$$

$$y = 37,367 \text{ MWth} \quad (4.9)$$

$$y \approx 37,4 \approx 37 \text{ MWth} \quad (4.10)$$

Pada penelitian ini, ditinjau dari dua parameter, yaitu parameter tonase dan panjang kapal. Apabila mampu ditinjau parameter-parameter lain yang lebih banyak dan komprehensif, maka hasil perhitungan juga semakin baik. Namun pada penelitian ini dibatasi hanya ditinjau dari tiga parameter tersebut. Keabsahan dari perhitungan tersebut dilihat dari nilai R^2 yang mendekati nilai 1, semakin mendekati 1, maka perhitungan semakin baik dan akurat.

Dari dua perhitungan tersebut, maka daya termal reaktor nuklir sebagai sistem propulsi kapal LPD 143 M sekurang-kurangnya berada pada kisaran daya termal 33-37 MWth.

Pertimbangan Ukuran dari Reaktor Nuklir

Sebagian besar orang berpendapat bahwa sebuah reaktor nuklir membutuhkan peralatan yang canggih dan sangat mahal serta fisiknya yang sangat besar sekaligus berbahaya dalam pengoperasiannya²¹. Kenyataannya, reaktor nuklir dalam praktik tidak selalu memiliki bentuk yang luar biasa besar.

²¹ IAEA TECDOC – 119, Current Status and Future Development of Modular High Temperature Reactor.

Reaktor nuklir dapat pula dalam bentuk yang lebih kecil²². Reaktor yang memiliki bentuk yang lebih kecil memang hanya memproduksi energi yang lebih kecil pula, tetapi desain dan rancang bangunnya menjadi lebih sederhana. Reaktor nuklir dalam ukuran kecil ini disebut dengan SMR (*Small Modular Reactor*).

Beberapa penelitian tentang SMR telah dilakukan di berbagai belahan dunia karena meninjau potensi yang mampu diberikannya. Penggunaan reaktor berukuran lebih kecil menyebabkan beberapa faktor kompleks dapat direduksi secara maksimal tanpa memengaruhi keamanan reaktor. Selain itu, SMR tidak membutuhkan infrastruktur yang kompleks dalam pengoperasiannya. Sisi lain yang menjadi perhatian khusus ialah ditinjau dari aspek ekonomi, SMR dapat mengurangi biaya pengeluaran untuk membangun dan perawatan reaktor nuklir skala besar. Dalam bidang keamanannya, bisa dikatakan lebih aman disebabkan untuk

masalah kebocoran atau yang lainnya akan lebih mudah untuk dideteksi. Pada aspek keselamatannya, desain SMR dapat menggabungkan suatu sistem fitur keselamatan pasif (*passive safety*)²³, di mana reaktor nuklir skala besar tidak dapat melakukannya. Juga lebih dapat menghemat lahan untuk membangun SMR, sebab volumenya yang tidak memakan banyak ruang²⁴.

International Atomic Energy Agency (IAEA) mendefinisikan, SMR sebagai sistem PLTN yang dapat memproduksi listrik kurang dari 300 MWth yang dapat dengan mudah dikirim dan dipasang sesuai pesanan permintaan²⁵. SMR merupakan teknologi yang dikembangkan untuk menjawab tantangan kebutuhan energi bagi negara-negara yang kapasitas jaringan listriknya belum memadai untuk reaktor nuklir skala besar, seperti yang terdapat pada beberapa negara berkembang termasuk Indonesia²⁶, serta dapat pula digunakan

²² Zaki, Su'ud. 2007. *Advanced SPINNORs Concept and The Prospect of Their Deployment in Remote Area*. International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering in Conjunction with LKSTN 2007 (199-207).

²³ L. Mathieu et al., "Possible Configurations for the TMSR and Advantages of the Fast Non Moderated Version," *Nuclear Science and Engineering*, vol. 161, pp. 78-79, 2009.

²⁴ M. Irfan. (2018): Analisis Neutronik Small Lead-Bismuth Cooled Nuclear Power Reactor

Without On-Site Refuelling (SPINNOR) Siklus Thorium Dengan Sistem Kode SRAC, Tugas Akhir Program Sarjana, Institut Teknologi Bandung.

²⁵ W. K. Sarber, ed., *Results of the Initial Nuclear Tests on the LWBR (LWBR Development Program)*, Bettis Atomic Power Laboratory, WAPD-TM-1336, June 1976.

sebagai sistem keenergian pada kapal perang dan lain sebagainya.

Atas dasar pertimbangan tersebut di atas, maka dengan demikian, dalam konsep teknologi reaktor nuklir pada penelitian ini ditentukan tipe ukuran reaktor, yaitu SMR (*Small Modular Reactor*).

Pertimbangan Tipe Reaksi dari Reaktor Nuklir

Berdasarkan tipe reaksi nuklir yang digunakan, reaktor nuklir diklasifikasikan menjadi reaktor fisi dan reaktor fusi. Reaktor fisi adalah reaktor nuklir yang memanfaatkan reaksi fisi nuklir (pembelahan inti atom) dalam melangsungkan reaksi nuklir dalam reaktor²⁷. Sedangkan, reaktor fusi adalah reaktor nuklir yang memanfaatkan reaksi fusi nuklir (penggabungan inti atom) dalam melangsungkan reaksi nuklir dalam reaktor²⁸.

Reaksi fisi nuklir adalah reaksi pembelahan inti atom berat akibat induksi dengan neutron sehingga menghasilkan beberapa inti atom baru

yang bermassa lebih kecil, beberapa neutron, radiasi elektromagnetik, dan sejumlah besar energi. Reaksi fusi nuklir adalah reaksi penggabungan dua atau lebih inti atom ringan menjadi atom baru dan menghasilkan sejumlah besar energi, juga dikenal sebagai reaksi yang bersih. Reaksi fusi nuklir juga menghasilkan radiasi sinar alfa, beta, dan gamma yang sangat berbahaya bagi manusia²⁹. Unsur yang digunakan dalam reaksi fisi nuklir adalah inti atom berat, di antaranya Uranium, Thorium, dan Plutonium. Sedangkan, dalam reaksi fusi nuklir unsur yang digunakan adalah inti atom ringan, di antaranya Lithium dan Hidrogen.

Sampai saat ini, semua reaktor nuklir komersial yang ada di dunia sejak awal perkembangan teknologi reaktor nuklir hingga saat ini memanfaatkan reaktor yang berbasis pada reaksi fisi nuklir, sedangkan teknologi reaktor nuklir fusi masih dalam tahap riset. Maka, sudah tentu konsep desain reaktor nuklir yang dipilih pada penelitian ini ialah reaktor fisi

²⁷ S. S. Bajaj, and A. R. Gore, "The Indian PHWR," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 236, no. 7, 2006.

²⁸ Snell, V. G., and Webb, J. R., 1998, CANDU-9 – The CANDU Product to Meet Customer and Regulator Requirements Now and in The Future, Pacific Basin Nuclear Conference Proceeding, p.p. 1445-1453

²⁹ R. Bäumer, I. Kalinowski, E. Röhler, J. Schöning, and W. Wachholz, "Construction and operating experience with the 300-MW THTR nuclear power plant," *Nuclear Engineering and Design*, Volume 121, Issue 2, 2 July 1990.

berantai terkendali (*controlled chain fission reactor*).

Pertimbangan Tipe Spektrum Energi Neutron dari Reaktor Nuklir

Ditinjau dari klasifikasi reaktor nuklir berdasarkan spektrum energi neutron yang digunakan, terdapat dua tipe reaktor nuklir, yaitu reaktor termal (lambat) dan reaktor cepat. Reaktor termal adalah reaktor yang memanfaatkan neutron dalam spektrum energi rendah untuk melangsungkan reaksi fisi nuklir berantainya³⁰. Reaktor ini bercirikan memiliki moderator neutron berfungsi untuk menyerap energi neutron sehingga memperlambat energi kinetik neutron sampai mempunyai energi kinetik rata-rata partikel yang ada di sekitarnya. Dalam reaktor termal, biasanya moderator juga berfungsi sebagai pendingin³¹.

Sedangkan, reaktor cepat merupakan reaktor nuklir yang memanfaatkan spektrum energi neutron cepat sehingga tidak diperlukan material moderator agar spektrum energi neutron tetap berada pada rentang energi cepat sehingga diperlukan bahan bakar yang memiliki material fisil dengan kandungan

yang lebih tinggi. Dengan kata lain, memerlukan pengayaan bahan bakar fisil yang lebih tinggi sebagai bahan bakar pemicu reaksi awal (*driver*). Reaktor cepat memiliki potensi menghasilkan limbah transuranik yang lebih sedikit sebab semua aktinida dapat terbelah dengan menggunakan neutron cepat³².

Sesuai dengan kebutuhan pengguna dan harapan terhadap konsep desain, maka diharapkan reaktor nuklir dapat memanfaatkan bahan bakar berupa Thorium dan memiliki fungsi pembiakan (*breeding*) yang hanya mampu dicapai oleh reaktor cepat. Atas dasar hal tersebut, maka reaktor konsep desain reaktor nuklir yang dipilih berupa reaktor pembiak cepat (*fast breeder reactor*).

Pertimbangan Tipe Bahan Bakar (*Nuclear Fuel*) dari Reaktor Nuklir

Selain pertimbangan di atas tersebut, perlu dipikirkan pengembangan teknologi reaktor nuklir alternatif agar pemanfaatannya tepat guna dan sesuai dengan keadaan di Indonesia. Dengan timbulnya permasalahan kelangkaan

³⁰ ACR – Advanced CANDU Reactor Concept, www.aecItechnologies.com

³¹ R.A. Knief. 1981, *Nuclear Energy Technology – Theory and Practice of Commercial Nuclear*

Power, Hemisphere Publishing Corporation, New York

³² Alan E. Waltar, *Fast Spectrum Reactors*, (New York: Springer, 2012).

(shortage) bahan Uranium³³, serta limbah radioaktif berumur sangat panjang akibat teknologi reaktor nuklir yang ada saat ini masih memanfaatkan Uranium-235 sebagai bahan bakar fisil, maka dibutuhkan pengembangan teknologi reaktor nuklir alternatif yang mampu memanfaatkan bahan bakar fertil (Uranium-238 dan Thorium)³⁴. Teknologi reaktor nuklir yang mempunyai kemampuan untuk memanfaatkan bahan bakar fertil sehingga menghasilkan bahan bakar fisil disebut sebagai reaktor pembiak (*breeder*), sebagaimana mampu mengubah isotop Uranium-238 menjadi isotop Plutonium-239 atau mengubah isotop Thorium-232 menjadi isotop Uranium-233³⁵.

Terdapat tiga siklus bahan bakar nuklir fisi, di antaranya, siklus Uranium terbuka, siklus Uranium tertutup, dan siklus Thorium tertutup. Siklus bahan bakar nuklir yang memanfaatkan isotop Uranium-235 sebagaimana digunakan pada teknologi reaktor nuklir yang ada saat ini disebut sebagai siklus Uranium terbuka (*Uranium open cycle*). Dikatakan

terbuka sebab pada siklus ini masih menyisakan sejumlah besar Uranium-238 dan aktinida minor yang seharusnya bisa dijadikan sebagai nuklida fisil. Siklus Uranium terbuka telah diaplikasi pada teknologi reaktor nuklir yang ada saat ini.

Siklus alternatif yang dikembangkan, yaitu siklus Uranium tertutup (*Uranium close cycle*) dan siklus Thorium tertutup (*Thorium close cycle*). Siklus Uranium tertutup, yaitu siklus bahan bakar nuklir yang mampu memanfaatkan isotop Uranium-238 melalui proses pembiakan sehingga bertransmutasi menjadi isotop Plutonium-239. Sedangkan, siklus Thorium tertutup, yaitu siklus bahan bakar nuklir yang mampu memanfaatkan isotop Thorium-232 melalui proses pembiakan sehingga bertransmutasi menjadi isotop Uranium-233. Siklus Uranium tertutup dan siklus Thorium tertutup diaplikasikan dengan memanfaatkan reaktor nuklir pembiak (*Breeder Nuclear Reactor*).

Pada reaktor nuklir pembiak, semua material fertil dari aktinida minor yang

³³ Anil Kakodkar, Towards sustainable, secure and safe energy future: Leveraging opportunities with Thorium

³⁴ Royal Academy of Engineering. (2013). *Future Ship Powering Option: Exploring Alternative*

Methods of Ship Propulsion. UK: Royal Academy of Engineering.

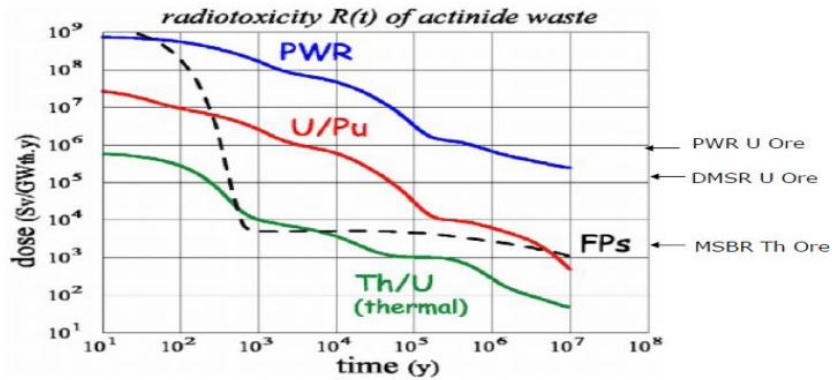
³⁵ M. W. Rosenthal, P. R. Kasten, and R. B. Briggs, "Molten-Salt Reactors – History, Status, and Potential," *Nuclear Applications and Technology*, vol. 8.2, pp. 107–117, 1970



Radiotoxicity PWR vs FBR* vs MSR*

* Assuming 0.1% Loss During Processing

Data and graph from Sylvain David, *Institut de Physique Nucléaire d'Orsay*



Turns waste management into 500 year job, not million year

Gambar 3. Perbandingan Dosis Limbah Radioaktif Reaktor LWR, FBR, dan MSR
Sumber: L. A. Neimark, Examination of an Irradiated Prototype Fuel Element for the Elk River Reactor, Argonne National Laboratory, ANL-6160, 1961

terbentuk, pada akhirnya dapat dikonversi menjadi nuklida fisis sehingga dapat terjadi reaksi fisi. Dengan demikian, reaktor pembiak secara potensial mampu memanfaatkan seluruh sumber daya nuklir alamiah. Jika reaktor non-pembiak memerlukan sekitar 180-200ton Uranium alam per GWe-tahun, maka reaktor pembiak hanya memerlukan 1-ton sumber daya nuklir alamiah per GWe-tahun, baik Uranium maupun Thorium.

Jika rentang waktu ketersediaan sumber daya Uranium terbukti diperkirakan hanya dapat bertahan hingga 50 tahun ke depan dengan menggunakan reaktor non-pembiak, maka dengan menggunakan reaktor pembiak rentang ketersediaan sumber daya Uranium dan Thorium terbukti

mampu mencapai hingga ribuan tahun ke depan³⁶.

Ditinjau dari segi limbah yang dihasilkan, reaktor nuklir non-pembiak menghasilkan berjumlah sekitar 20 ton limbah yang mengandung nuklida radioaktif dengan umur yang sangat panjang, hingga puluhan ribu tahun. Sedangkan, reaktor pembiak menghasilkan limbah berjumlah sekitar 1 ton per GWe-tahun dan tidak mengandung nuklida radioaktif yang berumur sangat panjang tersebut. Dengan demikian, reaktor pembiak jauh lebih aman dalam hal jumlah maupun limbah tersebut.

Dalam hal aktivitas radioaktif, pada siklus Thorium tertutup nilai aktivitas radioaktif lebih rendah daripada nilai

³⁶ David LeBlanc, 2012, A New Look at Molten Salt Reactors, Presentation to Canadian Nuclear Safety Commission

aktivitas radioaktif pada siklus Uranium Tertutup. Maka, dengan demikian siklus Uranium tertutup jauh lebih unggul daripada siklus Uranium terbuka, dan siklus Thorium tertutup lebih unggul daripada siklus Uranium tertutup. Berikut ditunjukkan Gambar 3, perbandingan dosis limbah radioaktif dari LWR (siklus Uranium terbuka), FBR (siklus Uranium tertutup), dan MSR (siklus Thorium tertutup) setelah reaktor dimatikan.

Berdasarkan hal tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa reaktor berbahan bakar Thorium lebih unggul daripada reaktor berbahan bakar Uranium (baik siklus terbuka maupun tertutup). Sementara itu, jumlah ketersediaan bahan Thorium alam di Bumi diperkirakan jauh lebih melimpah daripada jumlah ketersediaan bahan Uranium alam.

Thorium merupakan bahan bakar nuklir yang bersifat fertil, yaitu jenis bahan bakar yang tidak dapat langsung mengalami reaksi fisi saat bereaksi inti dengan neutron, melainkan bertransmutasi dahulu menjadi bahan bakar nuklir yang bersifat fisil, dalam hal ini isotop Uranium-233, untuk selanjutnya dapat bereaksi fisi. Thorium telah dimanfaatkan pada berbagai jenis reaktor nuklir, sekalipun pada umumnya masih

dalam tahap uji coba. Karena Thorium merupakan material fertil, maka dalam pemanfaatannya, Thorium harus didampingi dengan bahan bakar fisil sebagai bahan bakar *driver* guna men-start suatu reaktor nuklir pada tahap awal pengoperasian.

Atas dasar berbagai pertimbangan tersebut dan potensi yang dapat dihasilkannya, maka ditentukan bahan bakar nuklir yang digunakan bagi desain reaktor nuklir pada penelitian ini ialah bahan bakar Thorium-Uranium²³³ (Th, U²³³).

Pertimbangan Tipe Bahan Pendingin (Coolant) dari Reaktor Nuklir

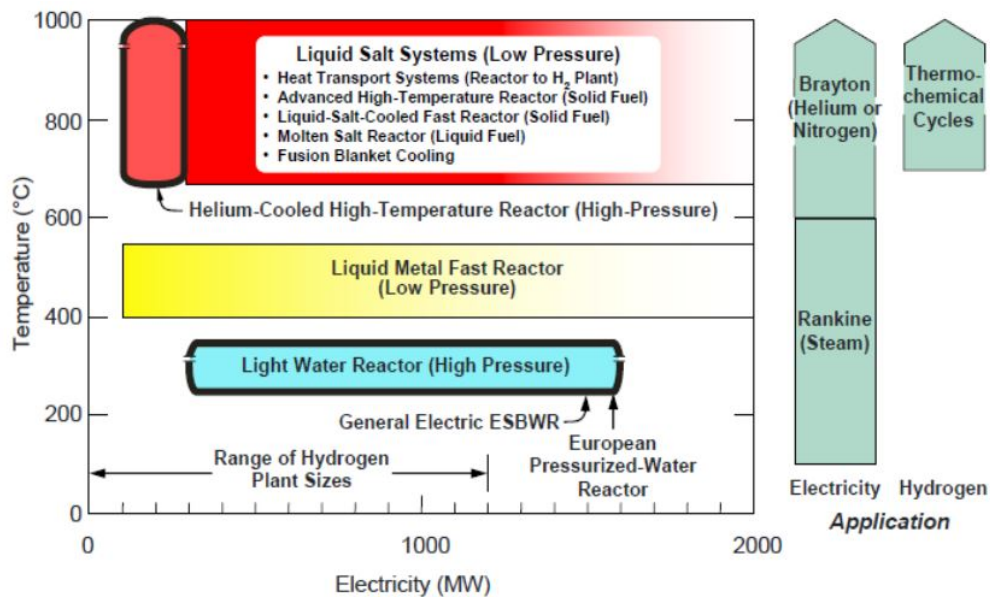
Selanjutnya, pada bagian ini dikaji berbagai tipe bahan pendingin (*coolant*) yang pada umumnya digunakan pada reaktor nuklir. Pendingin merupakan bahan berupa fluida yang berfungsi untuk mengurangi dan mentransfer energi panas (kalor) yang dihasilkan dari reaksi fisi nuklir dalam reaktor. Terdapat empat tipe bahan pendingin yang biasa digunakan pada reaktor nuklir, di antaranya air ringan (*light water*) dan air berat (*heavy water*), gas, logam cair

(liquid metal), dan garam cair (liquid salt)³⁷.

Dalam pemanfaatan pendingin bagi suatu reaktor nuklir, terdapat tiga variabel pertimbangan dalam menentukannya, yaitu suhu, tekanan, dan koefisien transfer kalor. Air ringan (light water) dan air berat (heavy water) memiliki nilai koefisien transfer kalor tinggi saat dioperasikan pada tekanan tinggi, serta tidak dapat mencapai suhu operasi yang terlalu tinggi. Gas sebagai pendingin mampu dioperasikan pada suhu tinggi saat dioperasikan pada tekanan tinggi, namun memiliki nilai

koefisien transfer kalor rendah. Logam cair (liquid metal) mampu dioperasikan pada tekanan rendah dan memiliki nilai koefisien transfer kalor tinggi, namun tidak dapat dioperasikan pada suhu yang terlalu tinggi. Sedangkan, garam cair (liquid salt) memiliki semua kelebihan sebagai fluida pendingin reaktor nuklir, yaitu mampu beroperasi pada suhu tinggi dengan tekanan rendah serta nilai koefisien transfer kalor tinggi³⁸.

Ditinjau dari aspek termodinamika, bagi pendingin suatu reaktor, kemampuan beroperasi pada suhu tinggi sangat menguntungkan sebab akan



Gambar 4. Peta Karakteristik Suhu dan Daya pada Berbagai Tipe Reaktor Nuklir
 Sumber: David LeBlanc, Molten Salt Reactors and the Oil Sands: Odd Couple or Key to North American Energy Independence?, Presentation to Canadian Nuclear Safety Commission, 2012

³⁷ D. A. Copinger and D. L. Moses, *Fort Saint Vrain Gas Cooled Reactor Operation Experience*, Oak Ridge National Laboratory, NUREG/CR-6839, ORNL/TM-2003/223, January 2004.

³⁸ Lahey, R.T. and Moody, F.J., 1975, *The Thermal Hydraulics of Boiling Water Reactor*, American Nuclear Society

meningkatkan efisiensi konversi energi sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar. Pemanfaatan pendingin berbentuk cair mempunyai kelebihan dibandingkan dengan pemanfaatan pendingin berbentuk gas, karena nilai koefisien transfer kalor lebih tinggi serta hambatan aliran lebih rendah. Sementara itu, pengoperasian reaktor nuklir pada tekanan rendah lebih menguntungkan sebab dapat menghindari kecelakaan akibat tekanan berlebih (*overpressure*).

Ditunjukkan peta karakteristik suhu dan daya pada berbagai tipe reaktor nuklir pada Gambar 4 di atas. Reaktor berpendingin air ringan (*light water reactor*) beroperasi pada suhu yang relatif rendah dengan tekanan tinggi. Reaktor berpendingin logam cair (*liquid metal reactor*) beroperasi pada suhu menengah dengan tekanan rendah. Sementara itu, reaktor berpendingin gas (*gas cooled reactor*) dan reaktor berpendingin garam cair (*liquid salt reactor*) beroperasi pada suhu tinggi. Namun reaktor berpendingin gas memerlukan tekanan yang tinggi, sedangkan reaktor berpendingin garam cair tidak memerlukan tekanan yang tinggi pada saat beroperasi. Di sisi lain,

reaktor berpendingin gas cukup terbatas pada tingkat daya listrik yang dihasilkannya, sebab gas mempunyai nilai koefisien transfer kalor yang rendah dan nilai hambatan aliran yang tinggi.

Atas dasar berbagai pertimbangan tersebut dan potensi yang dapat dihasilkannya, maka guna menghindari kecelakaan tekanan berlebih (*overpressure*) ditentukan tipe bahan pendingin yang memanfaatkan tekanan rendah (*low pressure*), di antaranya pendingin logam cair (*liquid metal*) atau garam cair (*liquid salt*).

Pertimbangan Generasi Teknologi dari Reaktor Nuklir

Perkembangan teknologi reaktor nuklir diklasifikasikan dengan istilah “generasi”. Teknologi nuklir terus berkembang menuju kesempurnaan dari generasi ke generasi. Hingga saat ini, generasi teknologi reaktor nuklir berkembang mulai dari Generasi I, II, III, III+, NTD, dan IV sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Perbedaan penting antara berbagai generasi reaktor yaitu terletak pada karakteristik teknologi reaktor nuklir yang berfokus pada enam faktor kunci, di antaranya ialah³⁹,

³⁹ L.S. Tong, and Weisman, J., 1970, *Thermal Analysis of Pressurizer Water Reactor*, American Nuclear Society

- a. Efektivitas biaya
- b. Keselamatan
- c. Keamanan dan non-proliferasi
- d. Kesesuaian jaringan
- e. Komersialisasi *roadmap*
- f. Siklus bahan bakar

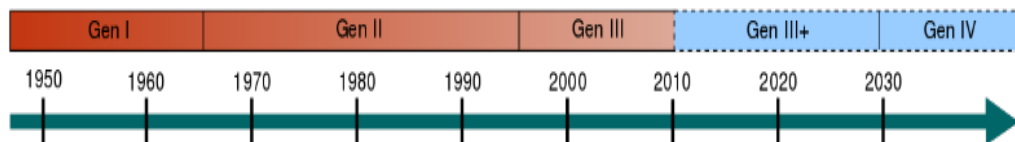
Generation IV International Forum (GIF) telah menetapkan enam konsep desain reaktor nuklir yang dikategorikan sebagai desain reaktor generasi keempat yang diklasifikasikan berdasarkan jenis pendingin dan spektrum energi neutron yang digunakan, yaitu

- a. SCWR (*Supercritical Light Water Reactor*)
- b. VHTR (*Very High Temperature Reactor*)
- c. GFR (*Gas Cooled Fast Reactor*)
- d. LFR (*Liquid Metal Fast Reactor*)
- e. SCR (*Sodium Cooled Reactor*)
- f. MSR (*Molten Salt Reactor*)

Ditinjau dari klasifikasi perkembangan teknologi reaktor nuklir, dari teknologi reaktor nuklir generasi I, II, III, III+, NTD, hingga IV, terdapat beberapa

pertimbangan dalam pemilihannya untuk diterapkan sebagai sistem propulsi kapal LPD di Indonesia. Pasca kecelakaan reaktor nuklir Chernobyl pada tahun 1986, perkembangan teknologi reaktor nuklir di dunia mengalami revolusi terutama pada aspek keselamatan dan keamanan, yang mana reaktor nuklir pada saat itu masih bergantung pada sistem keselamatan aktif (*active safety*) yang sangat bergantung pada manusia dan rentan terhadap kesalahan manusia (*human error*). Sejak saat itu mulai dipikirkan dan didesain sistem keselamatan mandiri (*inherent safety*) dan keselamatan pasif (*passive safety*) sehingga reaktor dapat secara otomatis mati (*shutdown*) ketika terjadi suatu kegagalan atau kesalahan pada saat beroperasi⁴⁰.

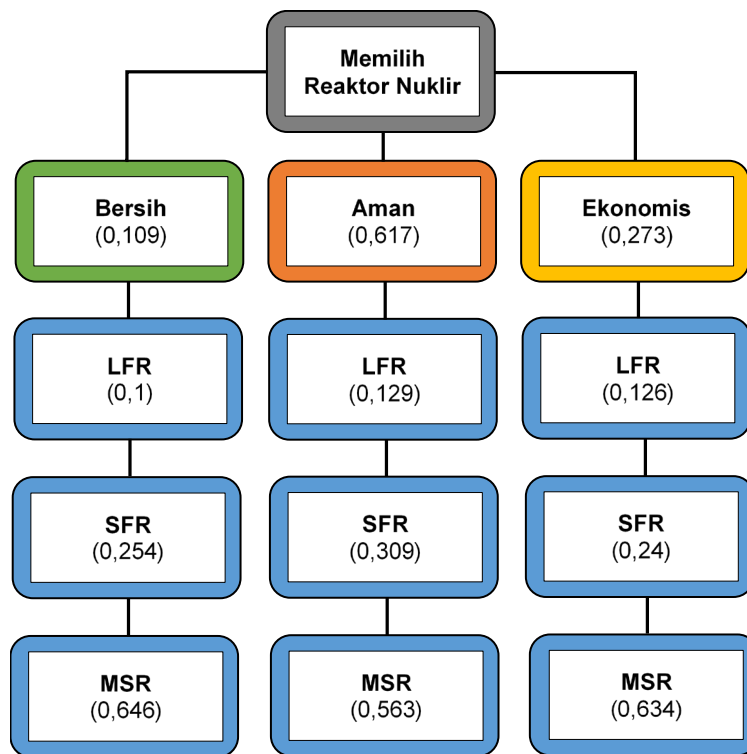
Reaktor nuklir saat ini merupakan suatu tuntutan bagi banyak negara dalam mengatasi keterbatasan sumber daya energi saat ini sehingga banyak negara yang mulai melirik energi nuklir sebagai



Gambar 5. Evolusi Sistem Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir/PLTN
 Sumber: Generation IV International Forum, 2017

⁴⁰ W. K. Sarber, ed., *Results of the Initial Nuclear Tests on the LWBR (LWBR Development*

Program), Bettis Atomic Power Laboratory, WAPD-TM-1336, June 1976.



Gambar 6. Diagram Hirarki Metode AHP Pemilihan Reaktor Nuklir Berserta Bobot Kriteria dan Alternatif Pilihan
 Sumber: diolah peneliti, 2020

LFR	0,1	0,129	0,126	Bersih	0,109
SFR	0,254	0,309	0,24	Aman	0,617
MSR	0,646	0,563	0,634	Ekonomis	0,273

Gambar 7. Perkalian Matriks Bobot Alternatif Pilihan dengan Matriks Bobot Kriteria untuk Mendapatkan Bobot Hasil Keputusan
 Sumber: diolah peneliti, 2020

salah satu sumber energinya. Mengingat energi nuklir mampu menghasilkan energi yang sangat besar dengan bahan bakar yang sedikit, tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca, fleksibel, kompetitif, ramah lingkungan, serta

handal dan kontinyu. Tantangan lainnya pada teknologi reaktor nuklir, yaitu permasalahan limbah, ketahanan proliferasi, ekonomis, dan diharapkan efisiensi yang tinggi dari penggunaan bahan bakar nuklir⁴¹.

⁴¹ L. A. Neimark, *Examination of an Irradiated Prototype Fuel Element for the Elk River*

Reactor, Argonne National Laboratory, ANL-6160, 1961.

Tabel 3. Klasifikasi Konsep Desain Reaktor Nuklir

No.	Klasifikasi Konsep Desain Reaktor Nuklir	
1.	Tujuan penggunaan	Reaktor daya: menghasilkan listrik untuk sistem propulsi, sistem kelistrikan kapal, melistriki suatu kawasan/pulau, serta memiliki fitur lain seperti desalinasi, dsb.
2.	Daya termal	Sekurang-kurangnya mampu menghasilkan listrik hingga 33 MWth
3.	Tipe ukuran reaktor nuklir	Reaktor modular kecil (<i>small modular reactor</i>)
4.	Tipe reaksi nuklir	Reaksi fisi berantai terkendali (<i>controlled chain fission reaction</i>)
5.	Tipe spektrum energi neutron	Reaktor pembiak cepat (<i>fast breeder reactor</i>)
6.	Tipe bahan bakar nuklir (<i>nuclear fuel</i>)	Thorium-Uranium ²³³ (Th, U ²³³)
7.	Tipe bahan pendingin (<i>coolant</i>)	Logam cair (<i>liquid metal</i>) atau garam cair (<i>liquid salt</i>).
8.	Generasi teknologi reaktor nuklir	Reaktor nuklir generasi IV

Sumber: diolah peneliti, 220

Di sisi lain, stigma masyarakat terhadap teknologi nuklir masih belum baik, serta keadaan listrik di Indonesia yang masih belum stabil juga menjadi bahan pertimbangan. Oleh karena itu, dalam hal ini ditentukan teknologi reaktor nuklir yang tepat untuk diterapkan di Indonesia, yaitu teknologi reaktor nuklir yang memiliki sistem keamanan dan keselamatan yang sangat tinggi dan ekonomis ialah teknologi reaktor nuklir generasi IV.

Rangkuman Klasifikasi Konsep Reaktor Nuklir

Berikut dirangkum pada Tabel 3 klasifikasi konsep desain reaktor nuklir berdasarkan berbagai pertimbangan di atas.

Pembobotan AHP

Untuk mendapatkan hasil keputusan, masing-masing bobot

alternatif pilihan dikalikan dengan bobot kriteria sebagaimana Gambar 7. Sehingga perhitungan untuk pemilihan reaktor nuklir keseluruhan nilai masing-masing alternatif pilihan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Bobot Hasil Keputusan

LFR	0,125
SFR	0,284
MSR	0,591

Sumber: diolah peneliti, 2020

Hasil keputusan merupakan alternatif pilihan dengan bobot nilai terbesar. Dengan demikian, pilihan yang paling sesuai dengan kebutuhan dan harapan pada pengambilan keputusan ini adalah reaktor nuklir dengan tipe MSR (*Molten Salt Reactor*).

Kesimpulan dan Rekomendasi

Berikut beberapa poin kesimpulan untuk menjawab tujuan penelitian,

a. Setelah dilakukan analisis dengan studi literature guna menentukan klasifikasi konsep teknologi reaktor nuklir sebagai sistem propulsi kapal LPD, maka dirangkum klasifikasi konsep teknologi reaktor nuklir sebagaimana berikut,

- i. Tujuan penggunaan: Reaktor daya: menghasilkan listrik untuk sistem propulsi, sistem kelistrikan kapal, melistriki suatu kawasan/pulau, serta memiliki fitur lain seperti desalinasi, dsb.
- ii. Daya termal: Sekurang-kurangnya mampu menghasilkan listrik hingga 33 MWth.
- iii. Ukuran reaktor nuklir: Reaktor modular kecil (*small modular reactor*).
- iv. Reaksi nuklir: Reaksi fisi berantai terkendali (*controlled chain fission reaction*).
- v. Spektrum neutron: Reaktor pembiak cepat (*fast breeder reactor*).
- vi. Bahan bakar nuklir: Thorium-Uranium²³³ (Th, U²³³).

vii. Bahan pendingin: Logam cair (*liquid metal*) atau garam cair (*liquid salt*).

viii. Generasi reaktor nuklir: Reaktor nuklir generasi IV

b. Setelah studi literatur berbagai klasifikasi reaktor nuklir dan referensi desain reaktor nuklir yang telah ada digunakan sebagai sistem propulsi kapal LPD 143 M, ditentukan konsep desain reaktor nuklir yang sesuai dengan standar kebutuhan tersebut sehingga dikerucut menjadi beberapa konsep desain reaktor nuklir yang dipilih, dan akhirnya ditentukan satu sebagai konsep desain reaktor nuklir dengan metode AHP (*Analytics Hierarchy Process*). Hasilnya yaitu konsep desain reaktor nuklir tipe MSR (*Molten Salt Reactor*) sehingga selanjutnya dibahas dan dikembangkan dari aspek kebersihan, keamanan, dan keekonomian dengan merujuk dari berbagai literatur. Konsep desain berupa reaktor MSR yaitu reaktor daya cepat pembiak modular kecil yang mampu menghasilkan daya termal sekurang-kurangnya 33 MWth, berbahan bakar Thorium-

Uranium²³³ (Th,U²³³) dan berpendingin garam cair (molten salt) sehingga memanfaatkan tekanan rendah serta mampu beroperasi pada suhu yang sangat tinggi.

Setelah didapatkan konsep teknologi reaktor nuklir sebagai sistem propulsi kapal LPD, selanjutnya dilanjutkan desain dasar (*basic design*) dan desain rinci (*detail design*) dari reaktor nuklir dengan melakukan studi neutronik yaitu studi terkait reaksi nuklir dan distribusi neutron, studi termal hidrolik yaitu studi terkait transfer kalor, studi keselamatan dan keekonomian, hingga dapat diterapkan sebagai sistem propulsi kapal LPD.

Penelitian ini perlu didalami lagi guna kepentingan pertahanan dan ketahanan nasional Indonesia sehingga dapat menjadi rekomendasi bagi pemerintah dan berbagai pemangku kepentingan untuk menerapkan reaktor nuklir sebagai sistem propulsi kapal perang Indonesia.

Daftar Pustaka

Buku

- AECL, 1981, *CANDU Nuclear Power System*, Atomic Energy of Canada Limited, Mississauga, Ontario, Canada
- AECL, 1996, *CANDU 6 Technical Outline*, Atomic Energy of Canada Limited, Mississauga, Ontario, Canada
- Bäumer, R., Kalinowski, I., Röhler, E., Schöning, J., and Wachholz, W. 1990. "Construction and operating experience with the 300-MW THTR nuclear power plant," *Nuclear Engineering and Design*, Volume 121, Issue 2, 2 July 1990.
- Buku Putih Pertahanan. 2015.
- Copinger, D. A., and Moses, D. L. *Fort Saint Vrain Gas Cooled Reactor Operation Experience*, Oak Ridge National Laboratory, NUREG/CR-6839, ORNL/TM-2003/223, January 2004.
- Knief, R. A., 1981, *Nuclear Energy Technology – Theory and Practice of Commercial Nuclear Power*, Hemisphere Publishing Corporation, New York
- KOPEC, *Korean Standard Nuclear Power Plant, KSNP (OPR) Design*, Korean power Engineering INC
- Lahey, R.T. and Moody, F.J. 1975. *The Thermal Hydraulics of Boiling Water Reactor*, American Nuclear Society
- Lamarsh, J.R. 1966. *Introduction to Nuclear Reactor Theory*
- LeBlanc, David, 2012, *A New Look at Molten Salt Reactors*, Presentation to Canadian Nuclear Safety Commission
- Neimark, L. A. 1961. *Examination of an Irradiated Prototype Fuel Element for the Elk River Reactor*, Argonne National Laboratory, ANL-6160.
- Rosenthal, M. W., Kasten, P. R., and Briggs, R. B. 1970. "Molten-Salt Reactors – History, Status, and

Potential,” *Nuclear Applications and Technology*, vol. 8.2, pp. 107–117.

Royal Academy of Engineering. (2013). *Future Ship Powering Option: Exploring Alternative Methods of Ship Propulsion*. UK: Royal Academy of Engineering.

Sarber, W. K. ed., *Results of the Initial Nuclear Tests on the LWBR (LWBR Development Program)*, Bettis Atomic Power Laboratory, WAPD-TM-1336, June 1976.

Tong, L.S. and Weisman, J., 1970, *Thermal Analysis of Pressurizer Water Reactor*, American Nuclear Society

Waltar, Alan E. 2012. *Fast Spectrum Reactors*. Springer.

Website

ACR – Advanced CANDU Reactor Concept,
www.aecntechnologies.com

Baiquni, Ahmad. (2013, 18 Desember). *Tiap tahun TNI utang BBM Rp 8 triliun ke Pertamina*. *Harian Merdeka Online*.
<http://www.merdeka.com/uang/tiap-tahun-tni-utang-bbm-rp-8-triliun-ke-pertamina.html>

Matterson Marine Pty Ltd, *World Warship*. Oktober 2014.
<http://www.worldwarships.com>

Jurnal

Bajaj, S. S., and Gore, A. R. 2006. “The Indian PHWR,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 236, no. 7.

Bäumer, R., Kalinowski, I., Röhler, E., Schöning, J., and Wachholz, W. 1990. “Construction and operating experience with the 300-MW THTR nuclear power plant,” *Nuclear Engineering and*

Design, Volume 121, Issue 2, 2 July 1990.

Irfan, M. (2018): *Analisis Neutronik Small Lead-Bismuth Cooled Nuclear Power Reactor Without On-Site Refuelling (SPINNOR) Siklus Thorium Dengan Sistem Kode SRAC*, Tugas Akhir Program Sarjana, Institut Teknologi Bandung.

Jacobs, J.G.C.C. (2007). *Nuclear Short Sea Shipping: The Integration of a Helium Cooled Reactor in a 800 Teu Container Feeder*. Netherlands: TU Delft.

Mathieu, L. et al., “Possible Configurations for the TMSR and Advantages of the Fast Non-Moderated Version,” *Nuclear Science and Engineering*, vol. 161, pp. 78–79, 2009.

Rosenthal, M. W., Kasten, P. R., and Briggs, R. B. 1970. “Molten-Salt Reactors – History, Status, and Potential,” *Nuclear Applications and Technology*, vol. 8.2, pp. 107–117.

Salimy, Djati H. 2010. *Aplikasi Reaktor Nuklir Temperatur Tinggi Pada Produksi Hidrogen dari Air Proses Hibrida Siklus Belerang*. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV, 2010 Pusat Pengembangan Energi Nuklir Badan Tenaga Nuklir Nasional.

Snell, V. G., and Webb, J. R., 1998, *CANDU-9 – The CANDU Product to Meet Customer and Regulator Requirements Now and in The Future*, Pacific Basin Nuclear Conference Proceeding, p.p. 1445-1453

Su’ud, Zaki. 2007. *Advanced SPINNORs Concept and The Prospect of Their Deployment in Remote Area*. International Conference on

Advances in Nuclear Science and Engineering in Conjunction with LKSTN 2007 (199-207).

Dokumen

Dewan Energi Nasional. 2013. *Lampiran Surat Nomor 311/DEN/2013 tertanggal 31 Mei 2013 Tentang Draft Peraturan Presiden Republik Indonesia Tentang Kebijakan Energi Nasional*.

Dewan Perwakilan Rakyat. 2010. *Laporan Kunjungan Kerja Komisi I DPR RI ke Propinsi Nusa Tenggara Barat dalam Reses Masa Persidangan II Tahun Sidang 2010-2011 Tanggal 19-22 Desember 2010*. Jakarta: Penyusun.

Forsbeg, C. W., Peterson, P. F., Zhao, H.H., 2004, An advanced Molten salt Reactor Using High Temperature Reactor Technology, ICAPP. 2004. MSR. Paper, 2004 International Congress on Advanced in Nuclear Power Plants (ICAPP '04) Embedded International Topical Meeting, 2004 American Nuclear Society Annual Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania.

IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2016. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA).

IAEA TECDOC – 119, Current Status and Future Development of Modular High Temperature Reactor.

Kakodkar, Anil. Towards sustainable, secure and safe energy future: Leveraging opportunities with Thorium

LeBlanc, David. 2012, *Molten Salt Reactors and the Oil Sands: Odd Couple or Key to North American Energy Independence?*, Presentation to

Canadian Nuclear Safety Commission.

LeBlanc, David. 2013, *The Curious Tale of Molten Salt Reactor*, Presentation to Canadian Nuclear Safety Commission, Ottawa Branch.

Nuclear Options for Hydrogen and Hydrogen Based Liquid Fuel Production, MIT Report: MIT-NES-TR-001, September 2003.

