

Literatur Review: Penggunaan Reaktor Nuklir Dalam Sistem Propulsi Kapal Laut Studi Kasus TNI AL

Priska Ezrahayu¹, Sovian Aritonang², Ansori Zaini³

^{1,2,3} Prodi Teknologi Daya Gerak, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor, Indonesia
Email Penulis Korespondensi: ¹priskaa.ezrahayu@gmail.com

Abstrak– Pada penelitian ini, dilakukan analisis untuk menemukan solusi atas masalah keterbatasan pasokan bahan bakar yang menghambat optimalisasi operasional kapal laut. Dalam konteks ini, energi nuklir dianggap sebagai alternatif yang menarik dan berkelanjutan, khususnya untuk sistem propulsi kapal laut TNI AL. Dengan mempertimbangkan berbagai klasifikasi dan pemilihan reaktor nuklir yang tersedia, penelitian ini menitikberatkan pada konsep teknologi reaktor nuklir yang cocok untuk kapal laut. Setelah melakukan studi literatur sehingga dapat di lihat bahwa dipilihlah reaktor nuklir tipe MSR (Molten Salt Reactor) sebagai solusi yang paling sesuai. Reaktor ini adalah jenis reaktor daya cepat pembiak modular kecil, menggunakan bahan bakar Thorium-Uranium233, dan berpendingin garam cair, sehingga dapat beroperasi pada tekanan rendah dan suhu sangat tinggi, minimal 33 MWth. Pilihan ini diharapkan mampu memberikan keamanan energi yang lebih baik, mengurangi ketergantungan pada pasokan bahan bakar fosil, serta memberikan keleluasaan dalam operasional kapal laut di masa depan. Meskipun demikian, pengembangan teknologi ini memerlukan pendekatan yang hati-hati dalam mengelola risiko terkait pengelolaan limbah radioaktif dan keamanan operasional.

Kata Kunci: Energi Nuklir, Kapal laut, Thorium-Uranium 233, Radioaktif, Operasional

Abstract– In this research, an analysis was carried out to find a solution to the problem of limited fuel supply which hampers the optimization of ship operations. In this context, nuclear energy is considered an attractive and sustainable alternative, especially for the propulsion system of Indonesian Navy warships. By considering the various classifications and selection of available nuclear reactors, this research focuses on the concept of nuclear reactor technology suitable for ships. After conducting a literature study, it can be seen that the MSR (Molten Salt Reactor) type nuclear reactor was chosen as the most suitable solution. This reactor is a type of small modular fast breeder power reactor, uses Thorium-Uranium233 fuel, and is cooled with molten salt, so it can operate at low pressure and very high temperatures, a minimum of 33 MWth. This option is expected to provide better energy security, reduce dependence on fossil fuel supplies, and provide freedom in warship operations in the future. However, the development of this technology requires a careful approach in managing risks related to radioactive waste management and operational security.

Keywords: Nuclear Energy, Warships, Thorium-Uranium 233, Radioactive, Operational

1. PENDAHULUAN

Bahan bakar yang cukup untuk optimalitas performa kapal, pada perang harus memastikan adanya pasokan bahan bakar agar dapat beroperasi dengan baik, TNI AL menghadapi tantangan besar dalam menjaga keamanan perairan Indonesia yang luas. Jumlah kapal laut sebagai alat utama operasi TNI AL masih sangat jauh dari cukup untuk mencapai kondisi ideal sesuai standar minimum yang dicita-citakan Buku Putih Pertahanan [1]. Masalah pada TNI AL saat ini kapal laut belum dapat beroperasi secara optimal akibat permasalahan pasokan bahan bakar [2]. TNI mengalami kekurangan pasokan akibat anggaran bahan bakar yang kurang mencukupi. Bahwa ada informasi penggunaan dari bahan bakar TNI pada Pertamina bertambah [3]. Dikhawatirkan adanya permasalahan kekurangan pasokan bahan bakar minyak dan akan adanya ancaman kelangkaan minyak bumi di masa depan, maka harus ada strategi yang digunakan untuk penggunaan dari kapal laut [4]. Penting untuk mengembangkan kapal laut yang tidak hanya efisien dalam penggunaan energi tetapi juga dapat dioperasikan secara optimal tanpa mempengaruhi aspek ekonominya [5]. Sehingga diperlukan bahan bakar yang efektif, ekonomis dan mudah ditemui untuk keberlangsungan dari operasional kendaraan kapal laut di TNI AL. Dalam penelitian ini hanya melakukan studi literatur dari berbagai sumber yang mendukung dapat menunjukkan bahwa adanya bahan bakar yang dapat digunakan secara efisien untuk kendaraan kapal laut

Penggunaan bahan bakar dari Energi Baru dan Terbarukan (EBT) dapat menjadi solusi yang efektif dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar minyak konvensional, terutama dalam konteks kapal laut [6]. Sumber EBT yang sudah terkenal cukup lama dan menjadi salah satu sumber yang menarik adalah energi nuklir, salah satu contohnya sudah digunakan oleh Amerika Serikat untuk sumber energi penggerak kapal selam [7]. Karakteristik nuklir yang memiliki densitas energi yang jauh lebih besar daripada minyak bumi mempengaruhi kebutuhan bahan bakar nuklir yang relatif sedikit. Karena densitas energinya yang tinggi, jumlah bahan bakar nuklir yang diperlukan untuk menghasilkan energi yang sama lebih kecil dibandingkan dengan energi yang dihasilkan oleh minyak bumi. Hal ini mengakibatkan harga bahan bakar nuklir cenderung relatif konstan, karena biaya bahan bakar nuklir hanya merupakan bagian kecil dari total biaya operasional instalasi nuklir [8]. Nuklir menawarkan stabilitas biaya operasional yang tinggi dibandingkan kapal laut yang menggunakan bahan bakar minyak. Kapal laut yang tergantung pada minyak rentan terhadap fluktuasi harga yang dapat signifikan mempengaruhi biaya operasional mereka. Sebaliknya, nuklir membutuhkan sedikit bahan bakar dan biaya bahan bakarnya relatif stabil dalam jangka panjang. Ini membuat nuklir menjadi alternatif yang menjanjikan untuk mengurangi ketergantungan pada minyak bumi dalam sistem energi kapal



laut. Energi nuklir saat ini dianggap sebagai salah satu solusi utama dalam menyediakan kebutuhan energi global. Keunggulannya terletak pada kapasitasnya untuk menghasilkan energi dalam jumlah besar dan bertahan dalam jangka panjang tanpa emisi gas rumah kaca yang signifikan.

Dibandingkan dengan sumber energi lainnya, seperti batu bara atau gas, energi nuklir juga dianggap lebih aman bagi lingkungan dan manusia dalam hal emisi polutan. Namun, ada beberapa tantangan yang perlu diatasi, seperti pengelolaan limbah radioaktif yang berbahaya dan biaya pembangunan serta pengelolaan yang tinggi. Dengan pertimbangan ini, pengembangan energi nuklir perlu dilakukan dengan cermat untuk memaksimalkan manfaatnya sambil meminimalkan risikonya terhadap keamanan, keselamatan, dan lingkungan [9]. 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 besar [10]. Di masa ini pemanfaatan sistem propulsi nuklir pada kapal baru diterapkan pada kapal induk (aircraft carrier) dan kapal selam (submarine). Seperti pada table 1 menunjukkan bahwa ada harapan kriteria reaktor nuklir menurut Iptekhan Balitbang Kemhan RI tahun 2020. Sehingga pada penelitian ini dilakukan literatur review untuk memahami tentang penggunaan reaktor nuklir sebagai system propulsi pada kapal laut TNI AL. Hingga pada penelitian ini dapat menunjukkan adanya teknologi yang relevan dan sesuai dengan standar kebutuhan digunakan untuk kapal laut di TNI AL.

Tabel 1. Harapan Kriteria Reaktor Nuklir (Sumber: Iptekhan Balitbang Kemhan RI, 2020)

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

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan studi literatur terkait dengan jenis reaktor nuklir yang digunakan sebagai system propulsi dan klasifikasi reaktor nuklir beserta materialnya. Metodologi yang digunakan pada penelitian ini adalah metode kualitatif. Teknik yang digunakan oleh penulis adalah teknik pengumpulan data sebanyak-banyaknya yang diperoleh dari karya tulis berupa jurnal maupun buku yang tersebar. Kemudian dari data yang didapatkan, penulis kembali mengolah dan menganalisis sesuai dengan teori yang digunakan untuk menjelaskan suatu fenomena dengan mendalam. Karena berfokus pada fenomena penggunaan reaktor nuklir pada kapal laut, penelitian kualitatif tidak mengadakan penghitungan secara garis besar walaupun dalam pengembangannya penelitian kualitatif juga tetap membutuhkan bantuan angka untuk menjelaskan fenomena yang diteliti. Hasil penelitian dengan menggunakan metode kualitatif adalah berupa data deskriptif.

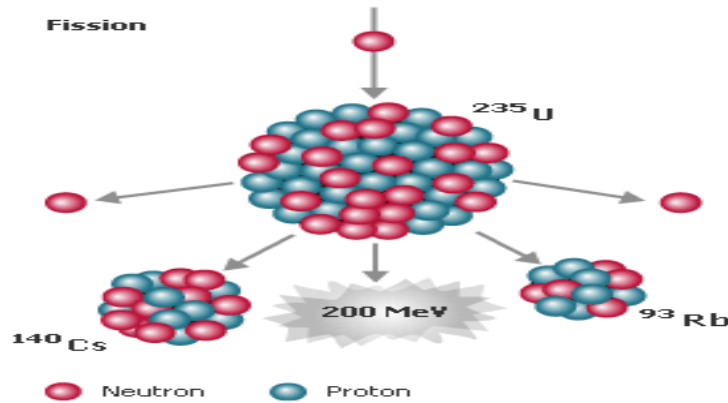
Pada penelitian ini, teknik pengumpulan data yang digunakan adalah studi literatur review. Pada studi dokumen penulis mengumpulkan data dari berbagai macam dokumen yang tersebar sebagai bahan analisis. Dokumen yang penulis gunakan adalah dokumen sekunder yang mana merupakan dokumen yang dikumpulkan dari studi ataupun penelitian kepustakaan, dengan mempelajari dokumen-dokumen ataupun buku-buku yang memiliki kaitan dengan masalah yang dianalisis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Energi Nuklir

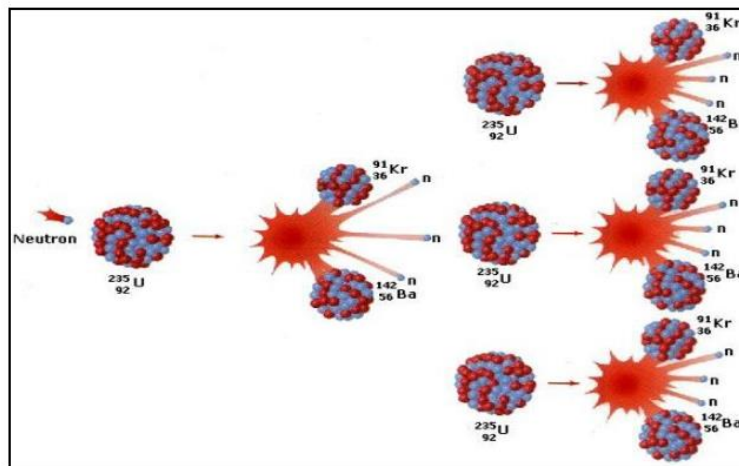
Energi nuklir merupakan salah satu energi alternatif atas masalah yang ditimbulkan oleh semakin berkurangnya sumber energi fosil serta dampak lingkungan yang ditimbulkannya. Energi nuklir termasuk salah satu energi bersih masa depan, karena tidak menghasilkan emisi [11]. Energi nuklir dapat dihasilkan melalui dua macam mekanisme yaitu pembelahan inti (reaksi fisi) dan penggabungan beberapa inti (reaksi fusi) [12]. Mekanisme produksi energi nuklir banyak menggunakan reaksi fisi nuklir. Reaksi fisi dapat dilihat pada Gambar 1.





Gambar 1. Reaksi fisi (Net Sains, 2009).

Sebuah inti berat ditumbuk oleh partikel (neutron) dapat membelah menjadi dua inti yang lebih ringan dan beberapa partikel lain. Mekanisme ini disebut pembelahan inti (fisi nuklir) [13]. Contoh reaksi fisi adalah inti uranium yang ditumbuk oleh neutron. Saat sebuah inti ditembakkan oleh sebuah neutron dengan presentasi tertentu, inti akan mengalami pembelahan atau reaksi fisi [14]. Reaksi fisi uranium seperti di atas menghasilkan neutron. Neutron yang dihasilkan dapat menumbuk kembali inti uranium untuk membentuk reaksi fisi selanjutnya [15]. Mekanisme ini terus terjadi dalam waktu yang sangat cepat hingga membentuk reaksi berantai tak terkendali. Akibatnya terjadi pelepasan energi yang besar secara singkat. Pelepasan energi yang dihasilkan melalui reaksi fisi berantai dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik apabila reaksi fisi berantai ini terkendali [16]. Reaksi fisi berantai dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Reaksi fisi berantai (Net Sains, 2009).

3.2 Reaktor Nuklir

Keberadaan reaktor nuklir saat ini didahului dengan penemuan neutron pada tahun 1932, karena neutron mempunyai pengaruh terjadinya proses reaksi nuklir. Tahun 1938, beberapa orang ilmuwan yaitu Lise Meitner, Fritz Strassman dan Otto Hahn membuat reaktor nuklir sebagai tempat terjadinya reaksi nuklir pada bahan uranium. Pada akhir tahun 1942, reaktor nuklir pertama dibangun di *University of Chicago*. Istilah reaktor nuklir digunakan untuk perangkat yang berfungsi mengontrol terjadinya reaksi fisi. Pada reaktor ini berlangsung reaksi fisi berantai terkendali dan kontinu untuk menghasilkan energi nuklir, radioisotop dan nuklida baru [11]. Terkendali yang dimaksud dalam hal ini adalah jumlah reaksi fisi dapat dinaik-turunkan sesuai dengan kebutuhan energi. Sedangkan reaksi fisi kontinu harus terjadi dalam uranium alam, yang mengandung bahan fisil U-235 (0,7%). Neutron dalam reaktor nuklir digunakan untuk menginduksi terjadinya reaksi fisi inti. Reaksi fisi ini nantinya akan menghasilkan inti ringan, neutron dan energi sebesar 200 MeV. Prinsip kerja reaktor nuklir mirip dengan pembangkit listrik konvensional. Perbedaan utamanya terletak pada sumber energi dan jenis bahan bakar. Sumber energi pada pembangkit listrik konvensional berasal dari proses pembakaran secara kimia bahan bakar fosil, sedangkan sumber energi reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi nuklir pada material-material fisil [17]. Energi yang dihasilkan dari reaksi fisi nuklir terkendali di dalam sebuah reaktor nuklir berupa energi panas. Energi panas ini dapat menguapkan air sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pemutar turbin dan membangkitkan listrik.

Berdasarkan energi yang digunakan untuk mempertahankan reaksi fisi berantai, reaktor nuklir dibagi menjadi dua macam yaitu:



1. Reaktor lambat (*thermal*) yaitu reaktor yang di dalamnya terjadi reaksi fisi dengan didominasi oleh neutron lambat. Hal ini ditandai oleh adanya moderator yang digunakan untuk menurunkan kecepatan neutron dan menurunkan energi kinetiknya.
2. Reaktor cepat (*fast*) yaitu reaktor yang di dalamnya terjadi reaksi fisi dengan didominasi oleh neutron cepat. Hal ini ditandai dengan adanya pengurangan bahan moderator [11].

Perkembangan reaktor nuklir terjadi beberapa generasi. Reaktor generasi I dikembangkan pada tahun 1950-1960. Sebagian besar reaktor generasi I ini menggunakan uranium alam sebagai bahan bakar dan grafit sebagai moderator. Reaktor generasi II menggunakan bahan bakar uranium yang telah diperkaya dan sebagian besar didinginkan serta dimoderatori oleh air. Reaktor generasi III adalah reaktor lanjutan dari beberapa reaktor generasi I yang beroperasi di Jepang dan perkembangan dari reaktor generasi II [18]. Reaktor generasi IV berbeda dengan reaktor I, II dan III karena reaktor ini dirancang tidak hanya untuk memasok daya listrik tapi juga untuk memasok energi termal. Pada reaktor generasi IV, terdapat enam tipe reaktor yaitu [19]:

1. *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR)
2. *Lead Cooled Fast Reactor* (LFR)
3. *Molten Salt Reactor* (MSR)
4. *Sodium Cooled Fast Reactor* (SFR)
5. SCWR
6. *Very High Temperature Reactor* (VHTR)

3.3 Bahan Bakar Reaktor

Kimia nuklir adalah cabang ilmu kimia yang mempelajari perubahan-perubahan dalam inti atom, yang dikenal sebagai reaksi inti atau nuklir. Reaksi inti dapat terjadi melalui berbagai proses, termasuk peluruhan radioaktif dan transmudasi. Contohnya adalah peluruhan polonium-210 menjadi timbal-206 dengan memancarkan partikel α . Transmutasi ini dapat disebabkan oleh pemboman inti oleh neutron, proton, atau inti lainnya [20]. Inti dari beberapa atom bersifat radioaktif, yang berarti mereka tidak stabil dan cenderung mengalami peluruhan seiring waktu. Ketika inti atom radioaktif pecah, sejumlah partikel dapat dilepaskan, dan inti tersebut berubah menjadi unsur yang berbeda. Proses ini terus berlanjut sampai inti tersebut mencapai kestabilan. Rangkaian perubahan ini disebut sebagai rangkaian peluruhan. Ada dua jenis reaksi inti yaitu reaksi fisi dan reaksi fusi. Reaksi fisi adalah reaksi dimana terjadi pemecahan dalam neutron sehingga terbelah menjadi dua, lalu neutron terbelah lagi menjadi dua lagi dan seterusnya. Ada tiga bahan utama nuklir yaitu Thorium, Plutonium dan Uranium.

1. Thorium

Jons Berzelius adalah seorang kimiawan Swedia yang menemukan thorium dalam bentuk kecil diantara batu dan tanah pada tahun 1828. Thorium adalah logam alami yang bersifat radioaktif dengan kelimpahan yang besar yaitu tiga kali lipat lebih banyak dari uranium. Pada keadaan murni thorium merupakan logam putih keperakan yang berkilau. Apabila terkontaminasi oksigen, thorium perlahan akan memudar di udara menjadi abu-abu kemudian hitam. Thorium merupakan sumber energi yang dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir meskipun tidak bersifat fisil [21]. Thorium yang bersifat fertil akan terlebih dahulu menyerap neutron lambat untuk menghasilkan uranium-233 yang bersifat fisil. Uranium-233 menghasilkan jumlah energi yang sama dengan U-235 yaitu 200 MeV [22].

Thorium adalah unsur yang menarik dalam konteks nuklir karena memiliki sifat fisikokimia yang unik. Thorium bereaksi dengan oksigen, hidrogen, halogen, dan sulfur, meskipun secara lambat dengan air dan tidak mudah larut dalam kebanyakan asam kecuali asam klorida dan asam nitrat pekat yang mengandung katalis ion fluoride. Thorium murni adalah logam radioaktif berwarna putih keperakan yang relatif stabil dalam udara, tetapi dapat berubah warna menjadi abu-abu hingga hitam jika terkontaminasi dengan oksida. Sifat fisika thorium sangat dipengaruhi oleh tingkat kontaminasi oksida, dengan titik leleh oksida thorium mencapai sekitar 3.300°C, nilai tertinggi dibandingkan dengan oksida unsur lain. Isotop thorium yang paling stabil adalah thorium-232 (Th-232) dengan waktu paruh sekitar 14,05 juta tahun. Dalam reaktor nuklir, Th-232 menyerap neutron lambat untuk menghasilkan uranium-233 (U-233), yang merupakan bahan fisil. Thorium-232 memiliki sifat "fertil" yang lebih unggul daripada uranium-238 karena tampang lintang penyerap neutronnya dalam reaktor termal tiga kali lebih besar dari U-238. Konversi Th-232 menjadi U-233 lebih efisien dalam spektrum neutron termal dibandingkan konversi U-238 menjadi Pu-239. Proses fisi U-233 dengan neutron lambat menghasilkan lebih banyak neutron per neutron yang diserap dibandingkan dengan fisi U-235 dan Pu-239 dalam spektrum termal. Secara energetis, hasil fisi satu atom U-233 menghasilkan sekitar 197,9 MeV energi, sedangkan U-235 menghasilkan sekitar 200 MeV. Namun, untuk menghasilkan energi yang setara, bahan bakar thorium membutuhkan lebih banyak neutron dibandingkan U-235. Keunikan ini membuat U-233 menjadi isotop fisil terbaik dalam spektrum neutron termal, dengan potensi untuk menjadi alternatif yang lebih berkelanjutan dalam teknologi nuklir di masa depan [23].

Penggunaan thorium sebagai bahan bakar nuklir lebih murah, lebih ramah lingkungan dan lebih aman. Thorium lebih murah karena jumlah kelimpahannya yang banyak dibanding uranium. Bahan bakar thorium lebih ramah lingkungan karena mengurangi emisi gas CO₂ dari sektor energi listrik, serta memiliki limbah radioaktif yang lebih sedikit dari uranium. Thorium menghasilkan 0,5 kg plutonium sementara uranium menghasilkan 230 kg Plutonium dari



reaktor dengan kapasitas 1 GWe selama satu tahun beroperasi [26]. dan lebih aman karena tidak memiliki isotop yang bersifat fisil sehingga tidak cocok untuk produksi senjata nuklir [24].

2. Plutonium

Plutonium adalah unsur kimia transurium yang sangat berbahaya dan radioaktif, dikenal dengan lambang Pu dan nomor atom 94. Ini adalah logam aktinida langka yang memiliki berbagai keadaan oksidasi dan dapat bereaksi dengan berbagai unsur seperti karbon, halogen, nitrogen, dan silikon. Terpapar kelembaban udara dapat menyebabkan plutonium membentuk oksida dan hidrida yang sangat reaktif, bahkan dapat menyala secara spontan. Isotop yang paling penting dari plutonium adalah plutonium-239, yang memiliki umur paruh sekitar 24.100 tahun. Plutonium-239 adalah bahan fisil yang dapat digunakan dalam senjata nuklir dan reaktor nuklir, karena kemampuannya untuk mempertahankan reaksi rantai nuklir setelah mencapai massa kritis. Isotop plutonium lainnya termasuk plutonium-238, yang digunakan sebagai sumber panas pada generator termolistrik radioisotop untuk misi luar angkasa. Plutonium pertama kali disintesis pada tahun 1940 oleh Glenn T. Seaborg dan Edwin McMillan di Universitas California, Berkeley, dan penemuannya menjadi krusial dalam pengembangan bom atom selama Proyek Manhattan selama Perang Dunia II. Isotop Pu-239 digunakan dalam bom atom yang dijatuhkan di Nagasaki. Plutonium adalah unsur yang memiliki peran penting dalam sejarah pengembangan senjata nuklir dan teknologi luar angkasa, tetapi juga menimbulkan risiko toksisitas yang signifikan bagi lingkungan dan manusia [25].

3. Uranium

Martin Klaproth adalah seorang kimiawan Jerman yang pertama kali menemukan uranium pada tahun 1789 (Kidd, 2009). Uranium adalah unsur terberat dari seluruh unsur alami, memiliki titik leleh yaitu 1132 oC dan tergolong sebagai logam putih keperakan. Simbol kimia uranium adalah U[26]. Uranium adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang U dan nomor atom 92. Uranium merupakan logam putih keperakan yang termasuk dalam deret aktinida pada tabel periodik. Uranium memiliki 92 proton dan 92 elektron, dan berelektron valensi 6. Inti uranium mengikat sebanyak 141 sampai dengan 146 neutron, sehingga terdapat 6 isotop uranium. Isotop yang paling umum adalah U238 (146 neutron) dan U 235 (143 neutron). Semua isotop uranium tidak stabil dan bersifat radioaktif lemah. Uranium memiliki bobot atom terberat kedua di antara semua unsur-unsur kimia yang dapat ditemukan di alam. Massa jenis uranium kira-kira 70% lebih besar daripada timbal, namun tidaklah sepadat emas ataupun tungsten. Uranium dapat ditemukan di alam dalam konsentrasi rendah (beberapa bagian per juta (ppm)) dalam tanah, bebatuan, dan air.

Uranium terdepleksi (Depleted Uranium/DU) adalah jenis uranium yang memiliki kadar isotop U235 yang lebih rendah dari uranium alam, biasanya sebagai hasil dari proses pengayaan uranium. Uranium alam terdiri dari tiga isotop utama: U238 (99,28%), U235 (0,72%), dan U234 (0,0057%). U235 adalah isotop yang fisil dan penting dalam industri nuklir karena kemampuannya untuk digunakan dalam reaktor nuklir dan senjata nuklir. Proses pengayaan uranium meningkatkan kadar U235 (biasanya di atas 90%), meninggalkan uranium sisa yang disebut uranium terdepleksi. Komposisi uranium terdepleksi biasanya adalah 99,8% U238, 0,2% U235, dan 0,001% U234. U 235 merupakan satu-satunya isotop unsur kimia alam yang bersifat fisil (yakni dapat mempertahankan reaksi berantai pada fisi nuklir), sedangkan U238 dapat dijadikan fisil dengan cara ditransmutasikan menjadi Pu239 (plutonium) yang bersifat fisil dalam reaktor nuklir. Isotop uranium lainnya yang juga bersifat fisil adalah U233, yang dapat dihasilkan dari Th232 (thorium)

Dalam beberapa penelitian yang sudah dilakukan, diperkirakan bahwa jika semua persediaan uranium di alam dapat dikonversikan menjadi bahan fisil didasarkan pada pemakaian reaktor pembiak, maka bahan bakar nuklir akan meningkat 100 kali dibandingkan sebelumnya. Kelimpahan thorium (Th) dalam kerak bumi diperkirakan 3 kali kelimpahan uranium di alam. Uranium alamiah, sedikit diperkaya dengan U 235 dengan kadar yang rendah, digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir untuk menghasilkan listrik. Thorium dari alam dapat diradiasikan dengan neutron untuk menghasilkan isotop U 233. Satu pon uranium yang tereaksi fisi secara lengkap memiliki nilai bahan bakar yang sama dengan batu bara sebanyak 1500 ton lebih. Kapasitas 429 reaktor pembangkit listrik tenaga nuklir di seluruh dunia yang beroperasi pada Januari 1990 diperkirakan mencapai 311000 megawatt.

Uranium terdepleksi ini telah digunakan dalam industri militer untuk membuat proyektil anti-tank dan anti-kendaraan lapis baja berbasis energi kinetik. Secara kimia, uranium adalah logam berat berwarna keperakan yang sangat padat. Pada suhu tinggi, uranium terdepleksi dapat mengalami pembakaran spontan dan membentuk kabut aerosol yang sangat panas. Senjata berbasis uranium terdepleksi, seperti yang digunakan dalam rudal TOW dan kendaraan lapis baja lainnya, mengandalkan prinsip Efek Munroe. Prinsip ini memanfaatkan penembusan baja target oleh "jet" uranium cair dan "slug" uranium yang lebih padat, yang terbentuk saat ledakan. Penggunaan uranium terdepleksi telah menjadi sumber kontroversi karena sifat radioaktif uranium yang dapat mempengaruhi lingkungan dan kesehatan manusia. Namun, investigasi menunjukkan bahwa paparan partikel uranium terdepleksi memiliki risiko kesehatan yang relatif rendah, meskipun tetap diatur untuk meminimalkan risiko tersebut. Uranium terdepleksi adalah produk samping dari proses pengayaan uranium, digunakan dalam industri militer untuk keperluan senjata anti-tank, dan merupakan bahan yang memicu debat tentang dampaknya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan [27].

Uranium alami yang ditemukan di kerak bumi terdiri dari tiga buah isotop yaitu U-238 (99,275%), U-235 (0,720%) dan U-234 (0,005%). Dari ketiga isotop tersebut yang memiliki sifat fisil adalah Uranium-235 (Kidd, 2009). Sedangkan uranium-238 bersifat fertil, namun dapat pula bersifat fisil dengan cara ditransmutasi menjadi plutonium-239. Uranium yang terkandung dalam batuan *phosphate* diperkirakan 22 juta ton dan di air laut 4200 juta ton [25].



Uranium merupakan sumber energi dengan kelimpahan yang sangat besar. Meski bukan termasuk energi yang terbarukan, uranium banyak digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir yang kemudian dimanfaatkan untuk produksi senjata nuklir kemudian berkembang untuk pembangkit listrik.

3.4 Konsep Teknologi Reaktor Nuklir Pada Propulsi Kapal Laut

Reaktor nuklir digunakan sebagai sistem propulsi kapal laut 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 tempat [28]. Dengan maka reaktor nuklir digunakan untuk tujuan menghasilkan daya listrik sehingga merupakan reaktor daya. Dari dua parameter, yaitu parameter tonase dan panjang kapal daya termal reaktor nuklir sebagai sistem propulsi kapal laut sekurang-kurangnya berada pada kisaran daya termal 33-37 MWth dimana perhitungan ini menggunakan regresi liner [29]. 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). Reaktor berukuran kecil (SMR) menawarkan keunggulan dalam reduksi kompleksitas, infrastruktur yang lebih sederhana, dan potensi pengurangan biaya pembangunan dan perawatan dibandingkan reaktor skala besar. Dalam aspek keamanan, SMR cenderung lebih mudah dideteksi kebocoran dan dapat mengintegrasikan fitur keselamatan pasif. Selain itu, penggunaan lahan untuk membangun SMR lebih efisien karena ukurannya yang lebih kecil [30].

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 manusia. Unsur yang digunakan dalam reaksi fusi 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. Namun dalam pengeoprasian untuk propeller kapal laut dan yang sering digunakan yaitu reaksi fusi [29]. Dua tipe utama reaktor nuklir berdasarkan spektrum energi neutron adalah reaktor termal dan reaktor cepat. Reaktor termal menggunakan neutron dengan energi rendah dan memerlukan moderator, sedangkan reaktor cepat menggunakan neutron dengan energi tinggi tanpa memerlukan moderator. Reaktor cepat memiliki potensi menghasilkan limbah transuranik yang lebih sedikit dan memungkinkan pembiakan bahan bakar, agar memiliki keefektifan dalam penggunaan propeller kapal maka digunakan, reaktor konsep desain yang dipilih adalah reaktor pembiak cepat (fast breeder reactor) [31].

Dengan timbulnya permasalahan kelangkaan bahan uranium, serta limbah radioaktif maka dibutuhkan pengembangan teknologi reaktor nuklir alternative yang mampu memanfaatkan bahan bakar fertile (Uranium-238 dan Thorium). Siklus Uranium tertutup dan siklus Thorium tertutup adalah dua konsep penting dalam teknologi bahan bakar nuklir yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya nuklir dan mengurangi limbah radioaktif. Siklus Uranium tertutup dimulai dengan menggunakan Uranium-235 (U-235) sebagai bahan bakar dalam reaktor nuklir, tetapi juga memanfaatkan Uranium-238 (U-238) dengan mengubahnya melalui proses pembiakan menjadi Plutonium-239 (Pu-239). Pu-239 kemudian digunakan kembali sebagai bahan bakar, memungkinkan reaktor untuk memproduksi lebih banyak energi sambil menghasilkan limbah radioaktif yang lebih sedikit daripada siklus konvensional. Di sisi lain, siklus Thorium tertutup menggantikan Uranium dengan Thorium-232 (Th-232) sebagai bahan bakar utama. Th-232, saat menangkap neutron dalam reaktor nuklir, bertransmutasi menjadi Uranium-233 (U-233), yang dapat digunakan sebagai bahan bakar fissil. Keunggulan Thorium termasuk pembiakan neutron yang lebih efisien dan potensial untuk menghasilkan limbah radioaktif yang lebih sedikit daripada siklus Uranium. Kedua siklus ini memerlukan pengembangan reaktor nuklir pembiak yang spesifik untuk menjaga kelangsungan siklus bahan bakar nuklir secara berkelanjutan. Dengan demikian, reaktor pembiak jauh lebih aman dalam hal jumlah maupun limbah tersebut [32].

Dalam aspek aktivitas radioaktif, siklus Thorium tertutup menunjukkan keunggulan signifikan dibandingkan dengan siklus Uranium tertutup. Thorium-232, yang merupakan bahan bakar utama dalam siklus Thorium tertutup, melalui proses pembiakan nuklir dapat bertransmutasi menjadi Uranium-233. Limbah radioaktif yang dihasilkan dari siklus ini memiliki tingkat aktivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan siklus Uranium tertutup, karena Uranium-233 cenderung menghasilkan produk fisi dengan massa yang lebih rendah dan periode paruh yang lebih singkat. Sebagai hasilnya, siklus Thorium tertutup tidak hanya menawarkan keuntungan dalam pengelolaan limbah radioaktif, tetapi juga dalam aspek keselamatan lingkungan dan kesehatan manusia. Dalam konteks perbandingan lebih luas antara reaktor berbahan bakar Thorium dan Uranium, baik siklus terbuka maupun tertutup, Thorium juga memiliki keunggulan lainnya. Ketersediaan Thorium di alam diperkirakan lebih melimpah daripada Uranium, yang menjadi aset penting dalam menjaga kelangsungan energi nuklir jangka panjang. Selain itu, Thorium juga menawarkan potensi lebih besar untuk mengurangi risiko proliferasi senjata nuklir, karena produk sampingan dari siklus Thorium tertutup lebih sulit untuk diekstraksi menjadi bahan bakar senjata dibandingkan dengan Plutonium-239 yang dihasilkan dari siklus Uranium tertutup. Dengan demikian, dari segi keamanan, keberlanjutan, dan pengelolaan limbah radioaktif, reaktor berbahan bakar Thorium, khususnya dalam siklus tertutupnya, menunjukkan potensi yang lebih besar dalam mendukung pengembangan teknologi nuklir masa depan yang aman dan berkelanjutan [33].

Thorium adalah bahan bakar nuklir yang bersifat "fertile", artinya tidak langsung mengalami reaksi fisi ketika terkena neutron dalam reaktor nuklir. Sebagai gantinya, Thorium mengalami transmutasi menjadi isotop Uranium-233 (U233), yang merupakan bahan bakar nuklir fisil yang aktif secara fisi. Proses transmutasi ini memungkinkan Thorium untuk digunakan sebagai bahan bakar dalam berbagai jenis reaktor nuklir, meskipun umumnya



masih dalam tahap uji coba. Dalam pemanfaatannya, Thorium harus dipadukan dengan bahan bakar fisil lainnya, seperti Uranium-235 atau Plutonium-239, yang berfungsi sebagai "bahan bakar penggerak" (driver fuel). Bahan bakar penggerak ini diperlukan untuk memulai dan mempertahankan reaksi fisi dalam reaktor pada tahap awal pengoperasian. Tanpa bahan bakar penggerak, Thorium tidak dapat memulai reaksi fisi sendiri. Penggunaan Thorium dalam reaktor nuklir menawarkan beberapa keuntungan potensial, termasuk kemampuan untuk mengurangi limbah nuklir, ketersediaan yang lebih melimpah dibandingkan dengan Uranium, serta potensi dalam mengurangi risiko proliferasi senjata nuklir. Meskipun demikian, implementasi Thorium dalam skala komersial masih memerlukan lebih banyak penelitian dan pengembangan teknologi untuk menyelesaikan tantangan teknis yang terkait dengan penggunaan bahan bakar fertil ini [34]. Dengan keunggulan ini, penggunaan bahan bakar Thorium-Uranium-233 dianggap sebagai pilihan yang menjanjikan untuk pengembangan reaktor nuklir di Indonesia. Thorium memiliki potensi besar sebagai sumber energi alternatif untuk mendukung operasional dan logistik alutsista matra laut. Penggunaan Thorium sebagai sumber energi dapat mendukung kebijakan energi nuklir yang tepat sasaran dan aman, sambil menjaga lingkungan dan mendukung pembangunan berkelanjutan. Dalam pemilihan bahan pendingin untuk reaktor nuklir, penting untuk mempertimbangkan kemampuan operasi pada suhu tinggi dan tekanan rendah guna meningkatkan efisiensi konversi energi dan menghindari kecelakaan akibat tekanan berlebih. Garam cair (liquid salt) merupakan pilihan yang optimal karena mampu beroperasi pada suhu tinggi tanpa memerlukan tekanan tinggi, serta memiliki nilai koefisien transfer kalor tinggi dan hambatan aliran rendah. Oleh karena itu, untuk menghindari kecelakaan akibat tekanan berlebih, reaktor nuklir sebaiknya menggunakan bahan pendingin seperti logam cair (liquid metal) atau garam cair (liquid salt) yang memanfaatkan tekanan rendah [35].

Berdasarkan studi literatur dan referensi desain reaktor nuklir, dipilih konsep desain reaktor nuklir untuk sistem propulsi kapal laut yang efektif. Tujuan analisis ini untuk menghasilkan sistem propulsi, kelistrikan suatu kapal. Daya thermal yang digunakan menghasilkan listrik hingga 33 MWth. Sedangkan ukuran yang cocok untuk kapal laut adalah reaktor modular kecil (small modular reactor). Sedangkan reaksi nuklir yaitu reaksi fisi berantai terkendali (controlled chain fission reaction). Untuk mengoptimalkan menggunakan spektrum reaktor pembiak cepat, dengan menggunakan bahan nuklir yaitu Thorium-Uranium-233. Berpendingin Logam cair (liquid metal) atau garam cair (liquid salt) memanfaatkan tekanan rendah dan mampu beroperasi pada suhu tinggi. Penggunaan ini dipilih setelah proses penilaian menggunakan metode AHP, dengan pertimbangan kebersihan, keamanan, dan keekonomian.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan reaktor nuklir sebagai sistem propulsi kapal laut, terutama dengan memanfaatkan bahan bakar Thorium, dapat menjadi solusi yang efektif untuk mengatasi tantangan dalam pasokan bahan bakar dan ketergantungan pada bahan bakar minyak. Dengan karakteristik energi nuklir yang memiliki densitas energi yang tinggi dan stabil dalam biaya operasional jangka panjang, reaktor nuklir menawarkan alternatif yang menjanjikan bagi kapal laut untuk beroperasi secara optimal tanpa terpengaruh oleh fluktuasi harga bahan bakar konvensional. Keunggulan dari reaktor nuklir, terutama yang menggunakan bahan bakar Thorium, antara lain adalah potensi untuk menghasilkan lebih sedikit limbah radioaktif, keamanan operasional yang tinggi, dan potensi proliferasi senjata nuklir yang lebih rendah dibandingkan dengan reaktor berbahan bakar Uranium. Namun, tantangan seperti manajemen limbah radioaktif yang efektif dan biaya pengembangan yang tinggi tetap harus diatasi dalam implementasi teknologi ini.

Dengan demikian, pengembangan dan implementasi teknologi reaktor nuklir berbahan bakar Thorium sebagai sistem propulsi kapal laut TNI AL memerlukan pendekatan yang hati-hati dan matang, termasuk penelitian lebih lanjut, pengujian, dan regulasi yang ketat untuk memastikan keamanan, keselamatan, dan keberlanjutan lingkungan. Meskipun memiliki keuntungan yang signifikan, penggunaan teknologi reaktor nuklir juga memiliki risiko yang harus dikelola dengan baik, seperti keselamatan, keamanan, dan perlindungan lingkungan. Oleh karena itu, kapal dengan propulsi nuklir harus dilengkapi dengan sistem pengamanan dan pemantauan yang canggih untuk memastikan operasi yang aman dan bertanggung jawab.

REFERENCES

- [1] Kemhan, Buku Putih Pertahanan Kementerian Pertahanan RI, Jakarta, 2015.
- [2] AECL, "CANDU 6 Technical Outline, Atomic Energy of Canada Limited," pp. Mississauga, Ontario, Canada, 1996.
- [3] D. E. Nasional, "Lampiran Surat Nomor 311/DEN/2013 Tentang Draft Peraturan Presiden Republik Indonesia Tentang Kebijakan Energi Nasional," 2013.
- [4] AECL, (, , *CANDU Nuclear Power System, Atomic Energy of Canada Limited*, pp. , Mississauga, Ontario, Canada, 1981.
- [5] DPR, "Laporan Kunjungan Kerja Komisi I DPR RI ke Propinsi Nusa Tenggara Barat dalam Reses Masa Persidangan II," pp. Tahun Sidang 2010-2011 Tanggal 19-22 Desember 2010. Jakarta: Penyusun, 2010.
- [6] C. W. P. P. F. Z. H. Forsbeg, 2004, *An advanced Molten salt Reactor Using High Temperature Reactor*



- Technology*, vol. ICAPP. 2004. MSR., no. Embedded International Topical Meeting, American Nuclear Society Annual Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania), pp. Paper, 2004 International Congress on Advanced in Nuclear Power Plants (ICAPP'04), 2004.
- [7] *Nuclear Options for Hydrogen and Hydrogen Based Liquid Fuel Production*, pp. MIT Report:MIT-NES-TR-001, 2003.
- [8] LeBlanc dan D. , “The Curious Tale of Molten Salt Reactor, Presentation to Canadian Nuclear Safety Commission, Ottawa Branch),” 2013.
- [9] IAEA, *Advanced Reactors Information System (ARIS)*, vol. Advances in Small Modular Reactor Technology, 2016.
- [10] D. A. Copinger and D. L. Moses, *Fort Saint Vrain Gas Cooled Reactor Operation Experience, Oak Ridge National Laboratory*, , Vol. %1 dari %2NUREG/CR-6839 ORNL/TM- 2003/223,, January 2004.
- [11] K. H. L. W.-V. Jens-Volker Kratz, “Nuclear and Radiochemistry: Fundamentals and Applications,” vol. 2013, 2013.
- [12] A. M. Elkhadrawi, “Thorium Based Nuclear Reactors,” pp. Department of Physics, University of Surrey, September 2008.
- [13] S. S. Hecker, “Plutonium and its alloys: from atoms to microstructure,” p. Los Alamos Science. 26: 331, 2000.
- [14] J. Emsley, “Uranium”. *Nature's Building Blocks: An A to Z Guide to the Elements.*, Oxford: Oxford University Press. , pp. hlm. 476–482. ISBN 978-0-19-850340-8, 2001.
- [15] S. Djati H, “Aplikasi Reaktor Nuklir Temperatur Tinggi Pada Produksi Hidrogen dari. Air Proses Hibrida Siklus Belerang. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV,” p. Pusat Pengembangan Energi Nuklir Badan Tenaga Nuklir Nasion, 2010 .
- [16] IAEA, “TECDOC – 119,” vol. Current Status and Future Development of Modular High Temperature Reactor).
- [17] S. Zaki, “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)*, 2007.
- [18] V. G. a. W. J. R. Snell, “The CANDU Product to Meet Customer and Regulator Requirements Now and in The Future,” Vol. %1 dari %2Pacific Basin Nuclear Conference Proceeding, p.p. 1445-1453, 1998.
- [19] A. E. Waltar, “Fast Spectrum Reactors, (,” *New York: Springer*, 2012.
- [20] R. A. o. Engineering, “ Future Ship Powering Option: Exploring Alternative Methods of Ship Propulsion.,” *UK: Royal Academy of Engineering*, 2013.
- [21] P. R. K. a. R. B. B. M. W. Rosenthal, “Molten-Salt Reactors – History, Status, and Potential,” pp. Nuclear Applications and Technology, vol. 8.2, pp. 107–117, 1970.
- [22] D. LeBlanc, “A New Look at Molten Salt Reactors,” vol. Presentation to Canadian Nuclear Safety Commission, 2012.
- [23] D. A. C. a. D. L. Moses, *Fort Saint Vrain Gas Cooled Reactor Operation Experie*, Vol. %1 dari %2nce, Oak Ridge National Laboratory, NUREG/CR-6839, ORNL/TM2003/223, 2004.
- [24] S. Kidd, “Thorium fuel has risks,” pp. Nature, 460(7257), 850, 2009.
- [25] N. Husna, “Potential of thorium fuel cycle to reduce nuclear waste,” Vol. %1 dari %2Warsaw, Poland., pp. In Proceedings of the International Conference on Nuclear Energy for New Europe (pp. 245-252). , 1998.
- [26] G. Duderstadt dan L. J. Hamilton, , vol. Nuclear Reactor Analysis. John Wiley & Sons, no. ISBN: 978-0471223634., 1976.
- [27] R. J. M. (Ed.) Konings, “ Nuclear Fuel Cycle Science and Engineering.,” *Woodhead Publishing.*, 2012.
- [28] S. Kidd, “Nuclear Fission: A practical source of energy,” *Nature Physics*, 5(3), 162-167., 2009.
- [29] P. F. Zweifel, “Nuclear fission and its applications,” *Journal of Applied Physics*, 44(6), 2791-2799, 1973.
- [30] C. C. R., dan ., P. A. Rebers, ““Introduction to Nuclear Reactor Theory”. Wiley-VCH.,” (1991)..
- [31] W. N. Association, “Nuclear Power Reactors. Diakses dari: World Nuclear Association,” 2012.
- [32] C. Forsberg dan P. Peterson, “The Thorium Fuel Cycle: Why it Matters. Elsevier.,” 2013.
- [33] T. Kamei dan A. Hakami, “Analysis of 1 GWe operational data over one year.,” *Journal of Nuclear Engineering*, 35(4), 512-520., 2010.
- [34] P. P. Wilson, J. R. Smith dan M. L. Brown, “Safety considerations in non-fissile isotopes for nuclear weapons production,” *International Journal of Nuclear Security*, 12(2), 245-259., 2008.
- [35] C. Cothorn dan P. Rebers, “Introduction to Nuclear Reactor Theory. Wiley-VCH.,” 1991.