

KAJIAN PERKEMBANGAN PLTN GENERASI IV

Yohanes Dwi Anggoro, Dharu Dewi, Nurlaila, Arief Tris Yuliyanto

Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN), BATAN

Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan 12710

Telp./Fax.: 021-5204243, E-mail: yohanes.anggoro@batan.go.id

ABSTRAK

STATUS TERKINI PERKEMBANGAN PLTN GENERASI IV. Saat ini perkembangan teknologi PLTN telah mencapai tahap penelitian dan pengembangan PLTN Generasi IV (sistem reaktor maju) yang merupakan pengembangan inovatif dari PLTN generasi sebelumnya. Terdapat enam tipe reaktor daya Generasi IV, yaitu: Very High Temperature Reactor (VHTR), Sodium-cooled Fast Reactor (SFR), Gas-cooled Fast Reactor (GFR), Lead-cooled Fast Reactor (LFR), Molten Salt Reactor (MSR), dan Super Critical Water-cooled Reactor (SCWR). Tujuan studi adalah untuk mengetahui sejauh mana perkembangan PLTN Generasi IV yang telah dilakukan oleh tiga belas negara yang tergabung dalam Gen IV International Forum (GIF). Metode yang digunakan adalah kajian pustaka dan mengacu pada berbagai studi terkait status terkini perkembangan penelitian dan pengembangan PLTN Generasi IV. Hasil kajian menunjukkan bahwa sistem dan teknologi PLTN Generasi IV menawarkan kemajuan yang signifikan dalam hal keberlanjutan, keandalan dan keselamatan, ekonomi, pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik. Selain itu, berdasarkan pengalaman penelitian dan pengembangan dapat diperkirakan PLTN tipe SFR dapat dimanfaatkan secara optimal pada tahun 2015, sedangkan PLTN tipe VHTR pada tahun 2020, PLTN tipe GFR, LFR, MSR, dan SCWR masing-masing pada tahun 2025. Pemanfaatan PLTN Generasi IV dikatakan optimal apabila PLTN tersebut sudah memenuhi tujuan PLTN Generasi IV, diantaranya mampu menghasilkan energi berkelanjutan, dan mempromosikan ketersediaan jangka panjang bahan bakar nuklir, mampu meminimalkan limbah nuklir dan mengurangi beban pengelolaan jangka panjang, memiliki keunggulan dalam bidang keselamatan dan keandalan dibanding PLTN generasi sebelumnya, dan teknologi VHTR mempunyai prospek yang baik digunakan di Indonesia.

Kata kunci : status, perkembangan, PLTN, Generasi IV.

ABSTRACT

CURRENT STATUS OF NPP GENERATION IV. Today development of nuclear technology has reached the stage of research and development of Generation IV nuclear power plants (advanced reactor systems) which is an innovative development from the previous generation of nuclear power plants. There are six types of power generation IV reactors, namely: Very High Temperature Reactor (VHTR), Sodium-cooled Fast Reactor (SFR), Gas-cooled Fast Reactor (GFR), Lead-cooled Fast Reactor (LFR), Molten Salt Reactor (MSR), and Super Critical Water-cooled Reactor (SCWR). The purpose of this study is to know the development of Generation IV nuclear power plants that have been done by the thirteen countries that are members of the Gen IV International Forum (GIF). The method used is review study and refers to various studies related to the current status of research and development of generation IV nuclear power. The result of this study showed that the systems and technology on Generation IV nuclear power plants offer significant advances in sustainability, safety and reliability, economics, and proliferation resistance and physical protection. In addition, based on the research and development experience is estimated that: SFR can be used optimally in 2015, VHTR in 2020, while NPP types GFR, LFR, MSR, and SCWR in 2025. Utilization of NPP generation IV said to be optimal if fulfill the goal of NPP generation IV, such as: capable to generate energy sustainably and promote long-term availability of nuclear fuel, minimize nuclear waste and reduce the long term stewardship burden, has an advantage in the field of safety and reliability compared to the previous generation of NPP and VHTR technology have a good prospects in Indonesia

Keywords: status, development, nuclear power plants (NPP), Generation IV.

1. PENDAHULUAN

Untuk mengatasi permasalahan pemenuhan kebutuhan energi di dunia di masa datang, peran PLTN dipandang sebagai pilihan energi alternatif, PLTN mempunyai keunggulan dibandingkan dengan pembangkit energi lainnya yang ada pada saat ini. Data terkini menurut *International Atomic Energy Association* (IAEA) terdapat sejumlah 437 unit reaktor daya (PLTN) yang beroperasi di 30 negara dengan total kapasitas terpasang sebesar 373.209 MWe^[1]. Dewasa ini, penelitian dan pengembangan terhadap reaktor terus dilakukan untuk mendapatkan reaktor generasi maju yang inovatif dengan keselamatan tinggi, menggantikan generasi yang ada sekarang ini (Gen III/ Gen III+). Hingga saat ini, perkembangan teknologi PLTN tersebut telah mencapai tahap penelitian dan pengembangan PLTN Generasi IV (sistem reaktor maju) yang merupakan pengembangan inovatif dari PLTN generasi sebelumnya.

Terkait dengan aspek perkembangan dan keselamatan reaktor nuklir, pada makalah sebelumnya telah dibahas mengenai manajemen keselamatan PLTN paska kecelakaan fukushima daiichi unit 1-4, manajemen budaya keselamatan di bidang pemeliharaan PLTN, penerapan reaktor SMART di Indonesia, evaluasi keselamatan PLTN BWR dengan studi kasus di Jepang, dan komparasi OPR-1000 dan APR-1400 dari aspek teknologi dan keselamatan^[2,3,4]. Oleh karena itu dari beberapa studi tersebut perlu adanya studi lanjutan mengenai status terkini perkembangan PLTN Generasi IV yang diharapkan lebih unggul dari generasi sebelumnya.

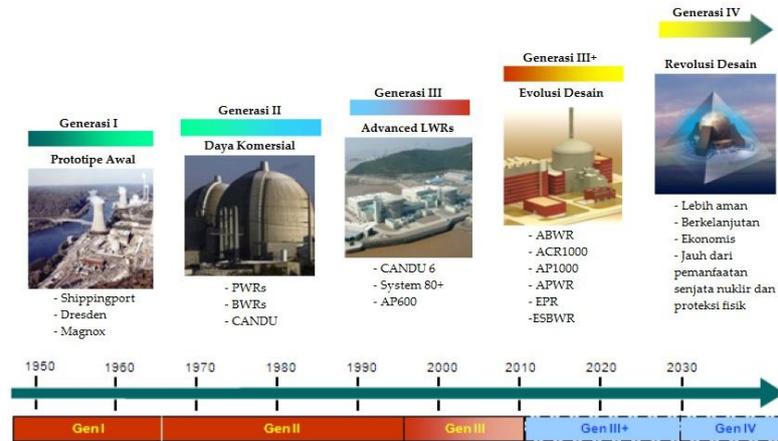
Terdapat tiga belas negara yang tergabung dalam *Generation IV International Forum* (GIF) yaitu: Argentina, Brazil, Kanada, China, Euratom (Komunitas Energi Atom Eropa), Perancis, Jepang, Korea Selatan, Rusia, Afrika Selatan, Swiss, Inggris dan Amerika Serikat, telah mengevaluasi dan mengkaji sekitar 100 konsep jenis reaktor yang mungkin cocok untuk diterapkan pada Sistem Energi Nuklir Generasi ke IV (Reaktor Gen IV). Namun pada akhir Desember 2002, telah diputuskan 6 jenis kandidat reaktor yang potensial dan layak untuk dibangun pada tahun 2030, yaitu: *Very High Temperature Reactor* (VHTR), *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR), *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR), *Lead-cooled Fast Reactor* (LFR), *Molten Salt Reactor* (MSR), dan *Super Critical Water-cooled Reactor* (SCWR).

Tujuan dan manfaat studi adalah untuk mengetahui sejauh mana perkembangan PLTN Generasi IV yang telah dilakukan oleh tiga belas negara yang tergabung dalam *Generation IV International Forum* (GIF), sehingga dapat diketahui oleh masyarakat luas. Pada studi ini hanya akan membahas status perkembangan PLTN Generasi IV secara umum, perbandingan dari aspek keberlanjutan, keselamatan dan kehandalan, ekonomi, dan proteksi fisik, dan prospek penggunaan VHTR di Indonesia. Metode yang digunakan dalam kajian ini adalah studi pustaka melalui kajian komprehensif dengan mengacu pada berbagai studi terkait yang difokuskan pada status terkini perkembangan penelitian dan pengembangan PLTN Generasi IV.

2. SISTEM ENERGI NUKLIR GENERASI IV

Dengan mempertimbangkan peningkatan kebutuhan energi di dunia dan peningkatan kesadaran tentang pemanasan global, serta isu perubahan iklim dan pembangunan berkelanjutan, maka energi nuklir akan berpotensi untuk memenuhi kebutuhan energi global di masa depan. Perkembangan teknologi PLTN akan berkembang seperti terlihat evolusi PLTN pada Gambar 1. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa perkembangan teknologi PLTN dibagi menjadi 4 generasi, yaitu^[5]: (i) Generasi pertama, merupakan prototipe awal dan merupakan realisasi PLTN pertama (tahun 1950-1970). (ii) Generasi kedua, merupakan teknologi PLTN yang sedang beroperasi saat ini (tahun 1970-2030). (iii) Generasi ketiga, merupakan perbaikan dari teknologi reaktor generasi kedua

(tahun 2000 dan seterusnya). (iv) Generasi keempat, merupakan sistem reaktor maju (2030 dan seterusnya).



Gambar 1. Evolusi PLTN^[5].

Sebagai persiapan pengembangan teknologi PLTN Generasi IV, beberapa negara yang tergabung di dalam *Generation IV International Forum* (GIF) telah menetapkan tujuan dari sistem energi nuklir Generasi IV, seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Tujuan Sistem Energi Nuklir Generasi IV^[6]

No	Aspek	Tujuan
1	Keberlanjutan (<i>Sustainability</i>)	<ul style="list-style-type: none"> a. menyediakan pembangkit energi berkelanjutan untuk memberikan udara yang bersih dan meningkatkan ketersediaan jangka panjang sistem dan penggunaan bahan bakar secara efektif untuk produksi energi di seluruh dunia. b. meminimalkan pengelolaan limbah nuklir jangka pendek maupun jangka panjang, sehingga dapat meningkatkan perlindungan bagi kesehatan masyarakat dan lingkungan.
2	Ekonomi (<i>Economics</i>)	<ul style="list-style-type: none"> a. memiliki keuntungan dalam hal biaya operasional dibanding dengan sumber energi lainnya. b. memiliki tingkat risiko keuangan yang kompetitif dengan pembangkit lainnya.
3	Keselamatan dan Keandalan (<i>Safety and Reliability</i>).	<ul style="list-style-type: none"> a. memiliki keunggulan dalam bidang keamanan dan keandalan. b. memiliki kemungkinan tingkat kerusakan inti reaktor yang sangat rendah. c. mengurangi kebutuhan untuk penanganan darurat di luar lokasi.
4	Pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik (<i>Proliferation Resistance and Physical Protection</i>)	<ul style="list-style-type: none"> a. meningkatkan jaminan bahwa PLTN lebih aman terhadap pencurian bahan senjata nuklir, dan memberikan peningkatan perlindungan fisik terhadap aksi terorisme.

Pada Tabel 1 menunjukkan bahwa terdapat delapan tujuan sistem energi nuklir Generasi IV yang diklasifikasikan dalam empat aspek, yaitu: keberlanjutan, ekonomi, keselamatan dan keandalan, serta pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik. Fokus tujuan aspek keberlanjutan adalah pemanfaatan bahan bakar dan pengelolaan

limbah, fokus tujuan ekonomi adalah biaya operasional pembangkit yang kompetitif seperti biaya produksi energi dan risiko keuangan, fokus tujuan aspek keselamatan adalah operasi yang aman dan handal, dan fokus tujuan aspek pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik adalah pengendalian dan pengamanan bahan nuklir serta fasilitas nuklir.

3. KONSEP DASAR PLTN GENERASI IV

Terdapat enam jenis konsep sistem reaktor yang telah dipilih dalam *Generation IV International Forum* (GIF) dan diklasifikasikan berdasarkan jenis pendingin dan spektrum reaktor yang digunakan. Beberapa parameter penting dan data karakteristik reaktor Generasi IV disajikan dalam Tabel 2. Pada tabel tersebut terdapat parameter dan spesifikasi teknis secara umum untuk ke-enam jenis konsep sistem reaktor Generasi IV.

Tabel 2. Parameter Dan Karakteristik Teras Reaktor Generasi IV^[7]

Parameter	GFR	LFR	SFR	VHTR	SCWR	MSR
Daya (MWth)	1500-3000	125-3000	400-4000	600	4000	2500
Densitas daya, kW/l	100	100	300	4-8	70	20
Pengkayaan (%)	16 (Pu)	15 (Pu)	16 (Pu)	8	6.3	3.3
Daya spesifik (kW/kg HM)	38	30	80	100	30	30
Bahan bakar	UC-SiC (U-TRU) Carbide, nitride, oxide	U-Zr atau UN (U-TRU) Nitride	U-Zr atau UO ₂ (U-TRU) Oxide, metal alloy	Triso particles (UO ₂ , UC _{0.5} O _{1.5})	UO ₂	UF ₆ dalam larutan garam
Pendingin primer (Tout, °C)	He (600-850)	Pb-Bi (500-550)	Na (510-550)	He (1000)	H ₂ O super kritis (450-500)	Molten Flouride Salt
Moderator	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada	Carbon/grafit	H ₂ O	Carbon/grafit
Spektrum Neutron	Cepat	Cepat	Cepat	Termal	Termal	Termal/epitermal
Tekanan kerja	Tinggi	Rendah	Rendah	Tinggi	Sangat Tinggi	Rendah
Siklus bahan bakar	Tertutup	Tertutup (regional)	Tertutup	Terbuka	Terbuka	Tertutup
Keluaran	Listrik dan produksi hidrogen	Listrik dan produksi hidrogen	Listrik	Listrik dan produksi hidrogen	Listrik	Listrik dan produksi hidrogen

Keterangan:

GFR = *Gas-cooled Fast Reactor*

LFR = *Lead-cooled Fast Reactor*

SFR = *Sodium-cooled Fast Reactor*

VHTR = *Very High Temperature Reactor*

SCWR = *Super Critical Water-cooled Reactor*

MSR = *Molten Salt Reactor*

3.1. GFR (*Gas-cooled Fast Reactor*) – Reaktor Cepat Berpendingin Gas

GFR merupakan reaktor cepat dengan menggunakan gas helium sebagai pendingin dan siklus bahan bakar tertutup. Suhu keluaran yang tinggi dari pendingin berpotensi

digunakan untuk memproduksi listrik, hidrogen, atau panas dengan efisiensi tinggi. Beberapa jenis bahan bakar memiliki potensi untuk dapat dioperasikan pada suhu yang sangat tinggi dan memiliki retensi yang sangat baik terhadap produk fisi yaitu bahan bakar keramik komposit, partikel bahan bakar maju, atau elemen keramik-dengan lapisan senyawa aktinida^[8].

GFR menggunakan turbin helium siklus langsung (*direct-cycle helium turbine*) untuk memproduksi listrik, atau dapat juga menggunakan panas untuk proses produksi hidrogen secara termokimia. Melalui kombinasi dari spektrum cepat dan daur ulang penuh aktinida, GFR meminimalkan produksi limbah radioaktif yang berumur panjang. Spektrum cepat GFR juga memungkinkan untuk menggunakan bahan fisil dan fertil yang tersedia sehingga jauh lebih efisien daripada reaktor gas spektrum termal dengan sekali daur bahan bakar. Sistem GFR dirancang untuk menghasilkan listrik dan produk energi lainnya, termasuk hidrogen dan air minum.

3.2. LFR (*Lead-cooled Fast Reactor*) – Reaktor Cepat Berpendingin Logam Cair

LFR merupakan reaktor dengan spektrum neutron cepat dan menggunakan siklus bahan bakar tertutup untuk konversi uranium (*fertile*) dan pengelolaan aktinida yang lebih efektif. Sistem pendingin LFR menggunakan logam cair Pb atau Pb-Bi. Penggunaan *nitride* sebagai bahan bakar menjadikan ciri khas LFR dapat melakukan pembiakan diri (*self breeding*), sehingga membuat reaktor ini mempunyai waktu operasi yang sangat lama, yaitu 15-30 tahun. Kegiatan penelitian dan pengembangan fisika reaktor pada jenis reaktor LFR berfokus pada masalah data nuklir yang terkait dengan *aktinida transuranik* (TRU), Pb dan Bi serta transisi spektrum pada tepi teras serta ekspansi dan koefisien reaktivitas balik. Sistem LFR ini dirancang untuk menghasilkan listrik dan produk energi lainnya, termasuk hidrogen dan air minum.

3.3. SFR (*Sodium-cooled Fast Reactor*) – Reaktor Cepat Berpendingin Sodium

SFR hampir sama dengan LFR yang merupakan reaktor dengan sistem spektrum neutron cepat dan menggunakan siklus bahan bakar tertutup untuk konversi uranium (*fertile*) dan pengelolaan aktinida. Fokus utama kegiatan penelitian dan pengembangan adalah pada teknologi daur ulang, ekonomi dari sistem secara keseluruhan, dan jaminan sistem keselamatan pasif. Berbeda dengan sistem GFR dan LFR, sistem SFR tersebut dirancang hanya untuk menghasilkan listrik.

3.4. VHTR (*Very High Temperature Reactor*) – Reaktor Temperatur Sangat Tinggi

VHTR merupakan jenis reaktor termal berpendingin gas helium yang dapat memproduksi panas hingga 1000°C. Dengan temperatur keluaran yang tinggi tersebut reaktor jenis VHTR sangat cocok untuk meningkatkan efisiensi dari sistem konversi energi untuk sistem produksi hidrogen menggunakan proses termokimia. Reaktor VHTR menggunakan bahan bakar partikel TRISO dengan kernel UO₂ (*uranium dioksida*) atau UC₀ (*uranium oksikarbida*) yang dilapisi oleh coating SiC atau ZrC. Grafit digunakan sebagai bahan moderator.

Kegiatan penelitian dan pengembangan VHTR terfokus pada bahan bakar partikel berlapis tiga (TRISO) dengan heterogenitas ganda (*double heterogeneous*) dan batang bahan bakar berbentuk silinder di dalam blok grafit atau bahan bakar berbentuk *pebble*, penanganan terhadap kemungkinan resonansi yang sangat berbeda dari bentuk dan tipe geometri konvensional serta pemodelan transportasi produk fisi di dalam sistem pendingin reaktor. Reaktor jenis VHTR menggunakan turbin gas dengan siklus langsung atau dikopel langsung dengan sistem produksi hidrogen. Sama seperti GFR dan LFR, sistem VHTR juga dirancang untuk memproduksi listrik dan produk energi lainnya, termasuk hidrogen dan air minum.

3.5. SCWR (*Super Critical Water-cooled Reactor*) – Reaktor Berpendingin Air Superkritis

Sistem SCWR memiliki dua opsi siklus bahan bakar: yang pertama adalah siklus terbuka dengan reaktor spektrum neutron termal, yang kedua adalah siklus tertutup dengan reaktor spektrum neutron cepat dengan daur ulang aktinida. Kedua opsi tersebut menggunakan suhu tinggi, tekanan tinggi. Reaktor berpendingin air yang beroperasi di atas titik kritis termodinamika air (22,1 MPa, 374 °C) untuk mencapai efisiensi termal mendekati 44%.

Jenis reaktor SCWR menggunakan air sebagai moderatornya. Air (H₂O) yang digunakan adalah air yang berada dalam fase superkritis pada tekanan tinggi (25 MPa). Jenis bahan bakar SCWR adalah UO₂ dengan bahan kelongsong dari *stainless steel*. Perangkat bahan bakar mempunyai kolom tempat air yang sangat luas untuk menjaga dan mengkompensasi moderasi air yang mempunyai densitas sangat rendah pada daerah superkritis. Sama seperti SFR, sistem SCWR tersebut dirancang hanya untuk memproduksi listrik

3.6. MSR (*Molten Salt Reactor*) – Reaktor Garam Cair

MSR merupakan jenis reaktor yang memiliki sistem epitermal menjadi spektrum neutron termal dan siklus bahan bakar tertutup. Dalam sistem MSR, bahan bakar yang digunakan adalah campuran cairan sodium, zirkonium, dan uranium flourida. Bahan bakar berupa lelehan garam mengalir melalui saluran inti grafit dan menghasilkan spektrum termal. Panas yang dihasilkan ditransfer ke sistem pendingin sekunder melalui penukar panas tingkat menengah, dan kemudian melalui penukar panas lain untuk sistem konversi daya. Susunan struktur teras reaktor MSR terdiri dari grafit yang digunakan untuk membuat bahan bakar aliran lelehan garam. Sistem MSR ini dirancang untuk menghasilkan listrik dan memproduksi hidrogen.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Status Terkini Perkembangan PLTN Generasi IV

Sistem dan teknologi pada PLTN Generasi IV menawarkan kemajuan yang signifikan dalam aspek keberlanjutan, keandalan dan keselamatan, ekonomi, dan pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik. Beberapa terminologi desain reaktor maju adalah sebagai berikut: (i) Desain maju (*advanced design*), merupakan perbaikan dan penyempurnaan dari desain yang sudah ada (Generasi III/III+), (ii) Desain evolusioner, merupakan perbaikan desain melalui modifikasi sederhana yang berfokus pada pengembangan keterbuktian desain dan minimasi resiko teknologi, dan (iii) Desain inovatif, merupakan perbaikan desain melalui perubahan konsep yang radikal baik dalam pendekatan desain maupun konfigurasi.

Belajar dari pengalaman penggunaan PLTN generasi sebelumnya, terdapat beberapa aspek yang perlu ditingkatkan, seperti: kepastian ketersediaan bahan bakar dalam jangka waktu panjang, peningkatan kemudahan operasi dan pemeliharaan PLTN, peningkatan efisiensi biaya pembangkitan listrik, dan peningkatan aspek keselamatan. Sehingga arah pengembangan PLTN Generasi IV adalah untuk memenuhi tuntutan tersebut. Beberapa negara maju yang memiliki kontribusi langsung terhadap kegiatan penelitian dan pengembangan sistem energi nuklir Generasi IV, masing-masing memiliki tugas dan tanggung jawab untuk melakukan kegiatan sesuai dengan kesepakatan yang telah diambil bersama, seperti ditunjukkan Tabel 3.

Tabel 3. Kontribusi Negara-Negara yang Tergabung Dalam GIF (Generation IV Forum)^[8]

Jenis reaktor/ Negara	Kanada	Eurotom	Perancis	Jepang	Korea Selatan	Swiss	U.S.A	Cina	Afrika Selatan	Rusia
VHTR	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
GFR		√	√	√		√				
SFR		√	√	√	√		√	√		√
SCWR	√	√		√						√
LFR		√		√						√
MSR		√	√							

Hasil penelitian dan pengembangan reaktor Generasi IV yang dilakukan di beberapa negara hingga saat ini menunjukkan bahwa pemanfaatan reaktor Generasi IV tersebut selain digunakan sebagai pembangkitan energi listrik, juga mempunyai beberapa manfaat seperti terlihat pada Tabel 4 berikut:

Tabel 4. Pemanfaatan reaktor Generasi IV

No	Pemanfaatan Reaktor Generasi IV	Status Perkembangan
1	Pembangkitan energi listrik	Teknologi sudah dikembangkan
2	Pemanfaatan non listrik	
	a. Desalinasi	Teknologi sudah dikembangkan
	b. Produksi Hidrogen	Tahap penelitian dan pengembangan
	- Proses termokimia I-S	Dikembangkan oleh JAERI, Jepang
	- Proses <i>hybrid</i> termokimia-elektrolisis	Dikembangkan oleh <i>Westing House, AS</i>
	- Proses UT-3	Dikembangkan oleh <i>Tokyo University, Jepang</i>

Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan GFR, diketahui bahwa GFR memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut: (i) GFR merupakan reaktor spektrum neutron cepat, pendingin reaktor menggunakan gas helium dan menggunakan siklus bahan bakar tertutup dengan konversi uranium dan pengelolaan aktinida yang lebih efektif, (ii) Perawatan dan pengelolaan limbah bahan bakar secara *on-site* untuk memudahkan transportasi bahan nuklir, (iii) Turbin helium menggunakan *direct cycle system* untuk menghasilkan listrik secara efektif, dan (iv) Suhu keluaran (*outlet*) yang tinggi digunakan untuk produksi hidrogen dengan cara dekomposisi termokimia air. Kegiatan penelitian dan pengembangan GFR saat ini berfokus pada aspek bahan bakar dan teknologi daur ulang bahan bakar. Teknologi GFR diperkirakan siap digunakan secara komersial pada tahun 2025.

Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan LFR, diketahui bahwa LFR memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut: (i) LFR merupakan reaktor spektrum neutron cepat, pendingin reaktor menggunakan *bismuth mixed liquid metal*, dan menggunakan siklus bahan bakar tertutup dengan konversi Uranium dan pengelolaan aktinida yang lebih efektif, (ii) Terdapat empat pilihan sistem pendingin reaktor, yaitu: pendingin reaktor dengan baterai jenis Pb-Bi, pendingin reaktor dengan modul jenis Pb-Bi, pendingin reaktor dengan modul jenis Pb, dan pendingin reaktor dengan baterai jenis Pb. (iii) *Cassete core* dan modul reaktor *replaceable* mengadopsi dari baterai jenis reaktor untuk menyederhanakan metode pengisian bahan bakar. Kegiatan penelitian dan pengembangan LFR saat ini berfokus pada bahan bakar, bahan dan pengendalian korosi. Teknologi LFR diperkirakan siap digunakan secara komersial pada tahun 2025.

Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan SFR, diketahui bahwa SFR memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut: (i) SFR merupakan reaktor spektrum neutron cepat,

dan menggunakan siklus bahan bakar tertutup dengan konversi Uranium dan pengelolaan aktinida yang lebih efektif, (ii) Terdapat dua jenis bahan bakar yang digunakan, yaitu: reaktor daya menengah (150~500MWe) menggunakan bahan bakar U-Pu-MA *metal alloy*, sedangkan reaktor daya besar (500~1500 MWe) menggunakan bahan bakar U-Pu *oxide*. Kegiatan penelitian dan pengembangan SFR saat ini berfokus pada teknologi daur ulang bahan bakar. Teknologi SFR diperkirakan siap digunakan secara komersial pada tahun 2015.

Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan VHTR, diketahui bahwa VHTR memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut: (i) VHTR merupakan reaktor spektrum neutron termal, pendingin reaktor menggunakan gas helium dengan *once-through uranium cycle*, (ii) Bahan bakar bisa berbentuk blok maupun *pebble*, dan (iii) Memiliki kemampuan untuk memenuhi kebutuhan kogenerasi. Kegiatan penelitian dan pengembangan VHTR saat ini berfokus pada bahan dan pelapis bahan bakar Zr-C. Teknologi VHTR diperkirakan siap digunakan secara komersial pada tahun 2020.

Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan SCWR, diketahui bahwa SCWR memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut: (i) SCWR merupakan reaktor spektrum neutron termal sekaligus spektrum reaktor cepat, (ii) SCWR beroperasi diatas titik kritis air (22,1 MPa; 374 °C), dan (iii) Terdapat dua pilihan sistem bahan bakar, yaitu: SCWR sebagai reaktor spektrum neutron termal menggunakan *once-through uranium cycle* dan SCWR sebagai reaktor spektrum neutron cepat menggunakan siklus bahan bakar tertutup. Kegiatan penelitian dan pengembangan saat ini berfokus pada bahan/material. Teknologi SCWR diperkirakan siap digunakan secara komersial pada tahun 2025

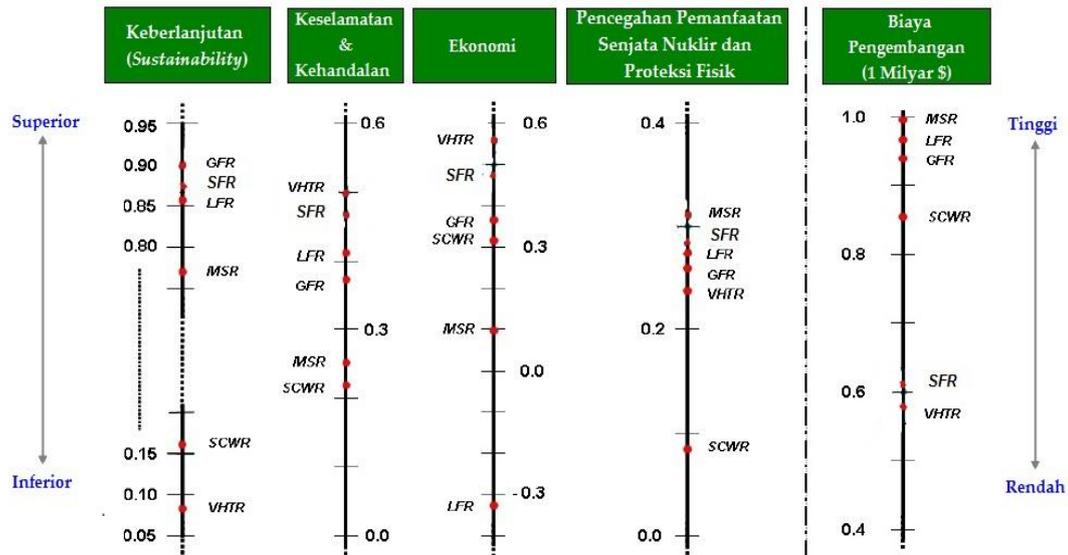
Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan MSR, diketahui bahwa MSR memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut: (i) MSR merupakan reaktor spektrum *epithermal ke thermal*, dan menggunakan siklus bahan bakar tertutup dengan konversi Uranium dan pengelolaan aktinida yang lebih efektif, dan (ii) Bahan bakar yang digunakan merupakan sirkulasi bahan bakar garam cair, cairan yang merupakan campuran natrium fluorida zirkonium dan uranium. Kegiatan penelitian dan pengembangan saat ini berfokus pada bahan bakar dan teknologi daur ulang bahan bakar. Teknologi MSR diperkirakan siap digunakan secara komersial pada tahun 2025.

4.2. Perbandingan PLTN Generasi IV

Hasil penelitian dan pengembangan Sistem Energi Nuklir Generasi IV sampai dengan saat ini terlihat beberapa kelebihan dan kekurangan dari masing-masing reaktor maju tersebut, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Secara umum apabila ditinjau dari aspek keberlanjutan, GFR memiliki peringkat teratas dari aspek keselamatan dan kehandalan, VHTR merupakan yang terbaik dari aspek ekonomi, VHTR juga dinilai paling unggul, dan MSR memiliki peringkat teratas dibanding dengan yang lainnya dari aspek pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik.

Sistem GFR memiliki peringkat teratas dalam aspek keberlanjutan karena memiliki sifat siklus bahan bakar tertutup dan kinerja yang sangat baik dalam hal pengelolaan aktinida. Selain itu secara umum GFR juga dinilai memiliki peringkat yang baik dalam aspek yang lain (keselamatan dan kehandalan; ekonomi; pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik) dibanding dengan sistem energi nuklir Generasi IV yang lainnya.

Sistem LFR dinilai baik dalam aspek keberlanjutan karena memiliki sifat siklus bahan bakar tertutup, baik dalam aspek pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan perlindungan fisik karena inti reaktor LFR memiliki umur panjang, dan baik dalam aspek keselamatan dan kehandalan karena LFR dilengkapi dengan *relatively inert coolant*. Namun dinilai kurang baik dalam aspek ekonomi karena tingginya biaya pengembangan sistem LFR.



Gambar 2. Evaluasi Sistem Generasi IV Terhadap Tujuan Reaktor Generasi IV^[5].

Sistem SFR memiliki nilai atau peringkat yang sangat baik di berbagai aspek (keberlanjutan, keselamatan dan kehandalan; ekonomi; pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik) jika dibandingkan dengan sistem energi nuklir Generasi IV yang lainnya. Begitu juga dengan biaya pengembangan SFR yang dianggap rendah.

Sistem VHTR memiliki peringkat teratas dalam aspek ekonomi karena efisiensi produksi hidrogen yang tinggi, dan juga unggul dalam aspek keselamatan dan kehandalan karena sistem keselamatan yang melekat di sistem bahan bakar dan sistem reaktor. Begitu halnya dalam hal biaya pengembangan VHTR yang dinilai memiliki biaya yang sangat rendah jika dibanding dengan sistem energi nuklir Generasi IV yang lainnya. Namun sistem VHTR dinilai memiliki kelemahan dalam aspek keberlanjutan karena memiliki sifat siklus bahan bakar terbuka.

Sistem SCWR dinilai baik dalam aspek ekonomi karena memiliki efisiensi termal yang tinggi, namun dinilai kurang baik dalam aspek lainnya aspek (keberlanjutan, keselamatan dan kehandalan; pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik). Akan tetapi jika opsi spektrum neutron cepat dapat dikembangkan, sistem SCWR juga mempunyai potensi untuk meningkatkan tingkat keberlanjutan.

Sistem MSR memiliki peringkat teratas dalam aspek pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik, dinilai baik dalam aspek keberlanjutan karena memiliki sifat siklus bahan bakar tertutup dan kinerja yang sangat baik dalam pengelolaan limbah. Sistem MSR juga dinilai baik dalam aspek ekonomi dan keberlanjutan. Selain itu tingginya biaya pembangkitan disebabkan karena banyaknya jumlah subsistem komponen pada SFR.

4.3. Prospek Penggunaan PLTN VHTR di Indonesia

Berdasarkan pada status perkembangan PLTN Generasi IV dan perbandingan PLTN Generasi IV diatas, maka besar kemungkinan teknologi Generasi IV yang tepat digunakan di Indonesia adalah teknologi VHTR karena memiliki keunggulan di aspek ekonomi, keselamatan dan kehandalan, serta biaya pengembangan yang relatif lebih rendah dibanding dengan lainnya. VHTR merupakan salah satu reaktor Generasi IV yang desainnya merupakan turunan dari HTGR (*High Temperature Gas-Cooled Reactor*). Afrika Selatan dan China merupakan negara yang memiliki ambisi kuat untuk menjadi negara pertama di dunia yang akan mewujudkan desain VHTR. Reaktor jenis VHTR yang dikembangkan Afrika Selatan yang dikenal dengan nama PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*)

yang menurut rencana akan segera diwujudkan telah mengalami kendala pendanaan, sehingga pembangunan PBMR dibatalkan. Berbeda dengan China yang telah memulai pembangunan reaktor jenis VHTR yang dikenal dengan nama HTR-PM (*High Temperature Reactor Pebble-bed Module*) dan rencana akan selesai pada tahun 2014, dan dilanjutkan dengan komisioning dan pengoperasian reaktor. Saat ini BATAN telah mulai melakukan pengembangan desain konseptual Reaktor Gas Temperatur Tinggi (RGTT) yang merupakan desain reaktor maju dan mengacu pada desain reaktor Generasi IV jenis VHTR. Kegiatan penelitian dan pengembangan ini dimulai pada tahun 2010 dan pada tahun 2014 diharapkan telah dapat diselesaikan desain konseptual reaktor daya maju untuk kogenerasi.

Salah satu keunggulan reaktor jenis VHTR adalah kemampuannya untuk dikopel antara sistem konversi energi dengan konfigurasi sistem kogenerasi. Selain itu VHTR telah dikenal sebagai kandidat Generasi IV yang paling menjanjikan karena keselamatan melekat dan efisien, resistansi proliferasi serta bahan bakar bekasnya yang dapat meminimisasi proses daur ulang. Beberapa kelebihan tersebut berasal dari desain bahan bakar unik kernel uranium oksikarbida (UCO) yang sangat kecil berdiameter 0,78 mm dengan lapisan ganda piro karbon (PyC), silikon karbida (SiC) dan penyangga karbon berpori dalam kisi matriks grafit.

Konsep desain teras VHTR memiliki dua tipe, yaitu tipe prisma dan tipe *pebble bed*, dimana keduanya menggunakan bahan bakar TRISO (*TRistructural-ISotropic*) yang terdiri dari beberapa partikel bahan bakar berlapis. Partikel bahan bakar berlapis VHTR dikomposisi oleh kernel UCO ($UC^{0.5}O^{1.5}$) berpengkayaan U^{235} 10,36% yang dilapisi oleh lapisan *porous carbon buffer* (C), *inner pyrolytic carbon* (IPyC), silikon karbida (SiC) dan *outer pyrolytic carbon* (OPyC). Setiap lapisan partikel TRISO tersebut memiliki fungsi spesifik dalam unjuk kerja bahan bakar, salah satu diantaranya adalah mencegah terjadinya kebocoran produk fisi dalam bentuk gas maupun metalik dan menjaga integritas struktur selama kondisi normal maupun kecelakaan. Partikel berlapis tersebar dalam matriks grafit dan terdistribusi secara acak dalam sel kompak bahan bakar untuk desain prisma dan sel bola bahan bakar untuk desain *pebble bed*. Prototipe VHTR diperkirakan muncul pada tahun 2015, hal ini merupakan pencapaian yang sangat baik dan disebabkan oleh karakteristik VHTR yang sangat baik seperti temperatur pendingin outlet teras reaktor 1.000°C, keselamatan pasif melekat dan keluaran daya total yang konsisten sesuai dengan yang diharapkan.

5. KESIMPULAN

Pemanfaatan sistem energi nuklir Generasi IV dikatakan optimal apabila PLTN tersebut sudah memenuhi tujuan sistem energi nuklir Generasi IV yaitu dapat meningkatkan kemajuan yang signifikan dalam aspek keberlanjutan, keselamatan dan kehandalan, ekonomi, dan pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik. Terdapat 6 tipe reaktor daya di dalam sistem energi nuklir Generasi IV, yaitu: *Very High Temperature Reactor* (VHTR), *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR), *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR), *Lead-cooled Fast Reactor* (LFR), *Molten Salt Reactor* (MSR), dan *Super Critical Water-cooled Reactor* (SCWR).

Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan yang dilakukan oleh tiga belas negara yang tergabung dalam *Gen IV International Forum* (GIF) diperkirakan bahwa: PLTN tipe SFR dapat dimanfaatkan secara optimal pada tahun 2015, PLTN tipe VHTR dapat dimanfaatkan secara optimal pada tahun 2020, sedangkan PLTN tipe GFR, LFR, MSR, dan SCWR dapat dimanfaatkan secara optimal pada tahun 2025. Hingga saat ini, peringkat teratas dari aspek keberlanjutan adalah teknologi GFR, dari aspek keselamatan dan kehandalan serta keekonomiannya adalah teknologi VHTR, dari aspek pencegahan

pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik adalah teknologi MSR. Sedangkan teknologi dengan biaya pengembangan sistem energi nuklir Generasi IV yang paling tinggi adalah sistem MSR, dan paling rendah adalah sistem VHTR.

Berdasarkan beberapa studi yang penulis lakukan, teknologi VHTR mempunyai prospek dapat digunakan di Indonesia karena alasan ekonomi, keselamatan dan kehandalan, serta biaya pengembangan yang dapat disesuaikan dengan kondisi Indonesia saat ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. June Mellawati, M.Si dan Ir. Erlan Dewita, M.Eng yang memberikan bimbingan penulisan makalah, dan kepada Ir. Sriyana, MT yang memberikan masukan terhadap isi keseluruhan makalah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IAEA. "The Database on Nuclear Power Reactors", <http://www.iaea.org/PRIS/>, diakses tanggal 29 April 2013.
- [2]. LUMBANRAJA, S M., RIYANTI, A P. dan ANGGORO, Y D., "Manajemen Keselamatan PLTN Paska Kecelakaan Fukushima Daiichi Unit 1-4", *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* Volume 13 No. 2 Hal. 122-130, ISSN. 1410-9816, Jakarta, 2011.
- [3]. ANGGORO, Y D. dan LUMBANRAJA, S M., "Budaya Keselamatan di Bidang Pemeliharaan PLTN", *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV* Hal. 95-103, ISSN. 1979-1208, Jakarta, 2011.
- [4]. ANGGORO, Y D., LUMBANRAJA, S M., RIYANTI, A P., "Kajian Penerapan Reaktor SMART di Indonesia", *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir V* Hal. 58-67, ISSN. 1975-1208, Jakarta, 2012.
- [5]. HAHN, D., "Next Generation Nuclear Reactors 1: Status of SFR Technology Development", *KOICA-KAERI-IAEA Interregional Training Course on Nuclear Energy Policy, Planning and Project Management*, Korea, 2012.
- [6]. U.S DOE., "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", *United States Departement Of Energy – Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum*, United States of America, Desember, 2002.
- [7]. SUWOTO dan ZUHAIR. "Studi dan Observasi Awal Kebutuhan Data Nuklir untuk Reaktor Generasi IV (Gen-IV)", *SIMETRI, Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*, Volume 1 No.1(B), Jakarta, 2012.
- [8]. MONTI, S., "Overview of the International Initiatives for the Development of Innovative (GENIV) Fast Reactors", *IAEA Education and Training Seminar on Fast Reactor Science and Technology*, Argentina, 2012.