

STUDI DAN INVESTIGASI AWAL KONSEP DESAIN REAKTOR GENERASI IV

Zuhair dan Suwoto

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) – BATAN
Kawasan Puspiptek, Gedung No. 80, Serpong – Tangerang 15310
Tel: 021-7560912, Fax: 021-7560913, Email: zuhairbasjmeleh@yahoo.com,
suwoto@batan.go.id

Masuk: 25 Mei 2009

Direvisi: 1 Oktober 2009

Diterima: 27 November 2009

ABSTRAK

STUDI DAN INVESTIGASI AWAL KONSEP DESAIN REAKTOR GENERASI IV. Konsep desain reaktor Generasi IV adalah hasil dari upaya riset teknologi reaktor dan energi nuklir yang melibatkan 10 negara maju dalam Forum Internasional Generasi IV (GIF). Enam konsep desain reaktor kandidat yang potensial untuk diimplementasikan untuk memenuhi kebutuhan energi dunia di masa mendatang adalah GFR, LFR, MSR, SFR, SCWR dan VHTR. Makalah ini membahas studi dan observasi awal desain reaktor Generasi IV dengan melakukan tinjauan komprehensif terhadap deskripsi dan karakteristik desain bahan bakar, tipe pendingin, geometri, komposisi dan spektrum energi neutron serta siklus bahan bakar. Dari deskripsi reaktor Generasi IV dapat dilihat bahwa desain reaktor Generasi IV terdiri dari 2 desain reaktor dengan spektrum neutron termal dan 4 desain reaktor dengan spektrum neutron epitermal/cepat. Ditinjau dari produksi bahan bakar bekas radiotoksik yang tinggi menunjukkan bahwa reaktor dengan spektrum energi neutron cepat tampak kelihatan menjadi desain yang lebih baik. Siklus bahan bakar reaktor cepat dalam kelompok Generasi IV mempunyai kapabilitas desain untuk mendaur-ulang aktinida penuh. Efisiensi setiap desain reaktor yang memperlihatkan performa yang relatif pada isu limbah nuklir sangat bergantung pada konfigurasi final reaktor Generasi IV dan kondisi operasionalnya. Desain-desain reaktor Generasi IV belum secara penuh dikembangkan sehingga spesifikasi detailnya belum dapat diperoleh secara lengkap. Beberapa parameter spesifik yang dirangkum dalam makalah ini sangat bermanfaat untuk pemodelan dalam perspektif yang lebih luas bagi perhitungan teras dan sistem reaktor Generasi IV.

Kata kunci: reaktor Generasi IV, GFR, LFR, MSR, SFR, SCWR, VHTR

ABSTRACT

STUDY AND PRELIMINARY INVESTIGATION ON GENERATION IV REACTOR DESIGN CONCEPTS. Generation IV reactors design concepts are results from research effort of reactor technology and nuclear energy involving 10 developed countries in the Generation IV International Forum (GIF). The six candidate reactor design concepts which are potential to be implemented to fulfill global energy needs in the future are GFR, LFR, MSR, SFR, SCWR and VHTR. This paper discusses study and preliminary observation of Generation IV reactor design concepts through a comprehensive overview on description and characteristics of fuel design, cooling type, geometry, composition and neutron energy spectrum and fuel cycle. Based on the description of Generation IV reactors, it can be seen that Generation IV reactor design concepts consist of 2 reactor design concepts using thermal neutron spectrum and 4 reactor design concepts using epithermal/fast neutron spectrum. Observation on the production of the highly radiotoxic spent fuel indicates that the reactors with harder neutron energy spectra seem to be more suitable designs. The fuel cycle of fast reactor in the Generation IV group has a design capability to run the full actinide recycle. The efficiency of each reactor designs showing the relative performance to the nuclear waste issue depends very much on the final Generation IV reactor configurations and operational conditions. Generation IV reactor designs have not been fully developed yet and therefore their detail specifications are not completely obtained yet. Some specific parameters summarized in this paper are very useful to model in more widely perspective for Generation IV reactor core and system calculations.

Keywords: generation IV reactors, GFR, LFR, MSR, SFR, SCWR, VHTR

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dunia meningkat tajam seiring dengan pertumbuhan penduduk dunia yang akan mencapai dua kali lipat pada pertengahan abad 21. Energi nuklir menjadi energi alternatif yang sangat strategis dan memainkan peranan penting dalam pemenuhan kebutuhan energi dunia masa depan^[1]. Faktor keselamatan melekat (*inherent safety*) dan kompatibilitas menghasilkan energi yang kompetitif menjadi salah satu alasan energi nuklir memiliki potensi yang sangat menjanjikan. Saat ini pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) sedang didesain-ulang secara konseptual guna menemukan sistem yang optimal untuk produksi energi nuklir masa depan. Desain-desain terakhir ini adalah sistem energi nuklir generasi ke empat yang dikenal dengan sebutan reaktor Generasi IV^[2].

Reaktor Generasi IV adalah hasil upaya riset teknologi reaktor dan energi nuklir yang melibatkan 10 negara maju dalam Forum Internasional Generasi IV (GIF, *Generation IV International Forum*). Forum ini meletakkan basis untuk pengembangan sistem energi nuklir masa depan. Reaktor Generasi IV harus mendapatkan lisensi untuk dikonstruksi dan dioperasikan dalam proses biaya-efektif agar supaya kompetitif dengan sumber energi lain. Hal ini merupakan sebuah tantangan karena secara khusus, reaktor-reaktor tersebut harus memenuhi standar tinggi dalam keselamatan nuklir, manajemen limbah dan resistansi proliferasi.

Realisasi siklus bahan bakar nuklir yang resistansi proliferasi dan produksi minimal dari limbah nuklir radiotoksik yang tinggi menjadi isu menarik yang implementasi solusinya masih diperdebatkan. Resistansi proliferasi dan radiotoksitas dari limbah nuklir yang diproduksi adalah salah satu kriteria karakteristik utama yang harus dipertimbangkan selain keselamatan reaktor dan reliabilitas serta proteksi fisik. Sifat-sifat ini karenanya akan memainkan peranan penting dalam evaluasi strategi siklus bahan bakar reaktor Generasi IV.

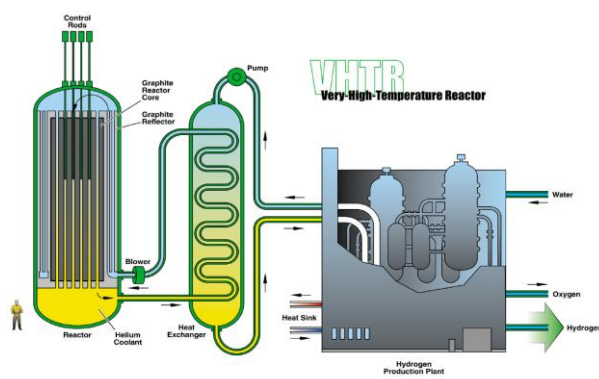
Makalah ini membahas studi dan observasi awal desain reaktor Generasi IV dengan melakukan tinjauan komprehensif terhadap deskripsi dan karakteristik desain bahan bakar, tipe pendingin, geometri, komposisi dan spektrum energi neutron serta siklus bahan bakar. Studi ini merupakan langkah awal untuk memahami dan mengkaji parameter reaktor secara detail dan menyeluruh sebelum pemodelan dalam perspektif yang lebih luas dilakukan untuk perhitungan teras dan sistem reaktor Generasi IV.

2. DESKRIPSI DESAIN REAKTOR GENERASI IV

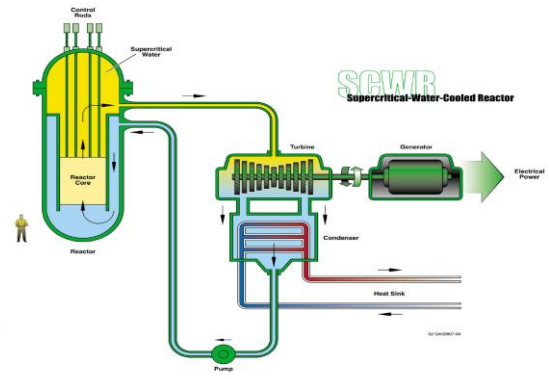
Akhir Desember 2002 GIF telah melakukan *review* berbagai konsep reaktor dan akhirnya memutuskan enam konsep desain reaktor kandidat yang potensial dan layak diimplementasikan untuk memenuhi kebutuhan energi dunia di masa mendatang, yaitu: 1. *Very High Temperature Reactor* (VHTR), 2. *Super-Critical-Water-cooled Reactor* (SCWR), 3. *Molten Salt Reactor* (MSR), 4. *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR), 5. *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR), dan 6. *Lead-cooled Fast Reactor* (LFR).

2.1. Reaktor Temperatur Sangat Tinggi (VHTR)

VHTR adalah sistem energi nuklir termal dengan siklus bahan bakar uranium sekali lewat yang dikarakterisasi oleh operasi reaktor yang selamat dan efisien^[3]. Karakteristik utama tipe reaktor ini adalah potensinya untuk dioperasikan pada temperatur sangat tinggi. Secara ideal VHTR memiliki temperatur *outlet* mendekati 1.000°C. Karakteristik ini penting karena memungkinkan untuk memproduksi hidrogen dan listrik secara simultan. Desain VHTR dengan pendingin gas helium ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem energi nuklir ini berdaya 600 MWth dengan penukar panas menengah yang digunakan untuk mengantarkan panas proses.



Gambar 1. Desain sistem VHTR^[3].



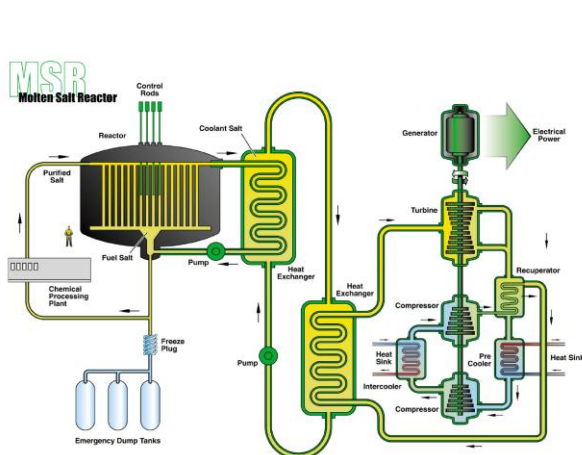
Gambar 2. Desain sistem SCWR^[3].

2.2. Reaktor Berpendingin Air Super Kritis (SCWR)

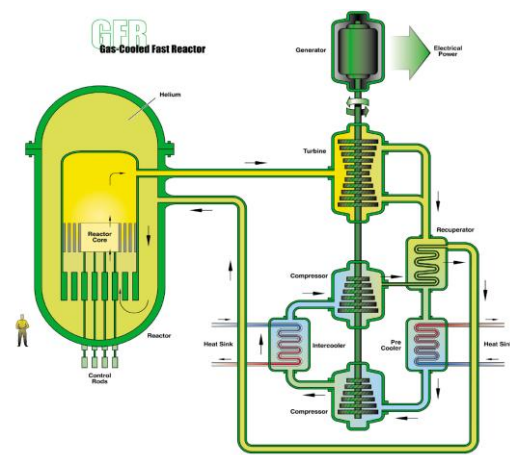
SCWR adalah sistem energi nuklir yang menjanjikan karena efisiensi termalnya bisa mencapai 45%, lebih besar dari efisiensi LWR dewasa ini yang hanya 33%. SCWR secara basis dikategorikan ke dalam LWR yang dioperasikan pada tekanan dan temperatur tinggi dengan daur bahan bakar sekali lewat dan langsung. Desain SCWR ditunjukkan pada Gambar 2.

2.3. Reaktor Garam Cair (MSR)

MSR adalah sistem energi nuklir epitermal/termal yang memanfaatkan bahan bakar cair dan digunakan untuk pembakaran aktinida dan produksi listrik, hidrogen dan bahan bakar fisil. Produk fisil, fertil dan fisi dilarutkan ke dalam garam fluorida cair bertemperatur tinggi dengan titik didih yang sangat tinggi (1.400°C). Bahan bakar garam cair mengalir melalui teras reaktor yang bermoderator grafit. Dalam reaktor, fisi terjadi di dalam bahan bakar cair yang mengalir dan dipanaskan hingga $\sim 700^{\circ}\text{C}$. Bahan bakar kemudian mengalir ke dalam penukar panas utama dan panas ditransfer ke pendingin garam cair sekunder. Desain MSR diperlihatkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Desain sistem MSR^[3].



Gambar 4. Desain sistem GFR^[3].

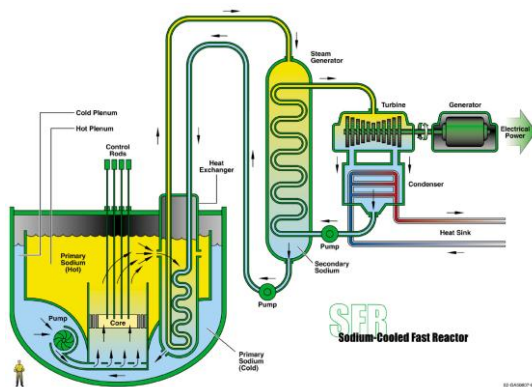
2.4. Reaktor Cepat Berpendingin Gas (GFR)

GFR adalah sistem energi nuklir dengan spektrum neutron cepat^[3]. Karakteristik spektrum neutron yang sangat keras dihasilkan oleh U-238 karena GFR menggunakan

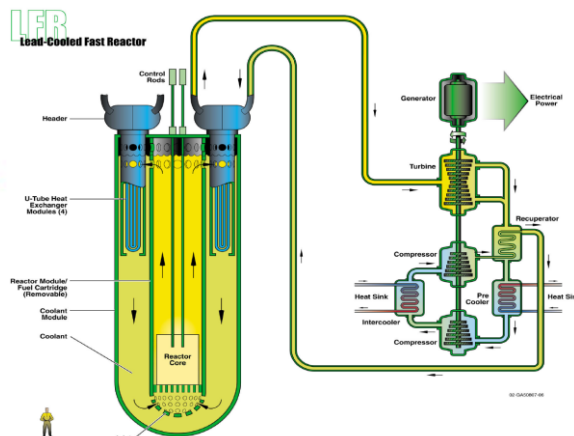
bahan bakar berlapis keramik yang terdispersi dalam matriks bahan bakar. Reaktor ini memiliki potensi dalam memanfaatkan siklus bahan bakar tertutup dengan daur ulang aktinida penuh. Desain GFR diperlihatkan dalam Gambar 4.

2.5. Reaktor Cepat Berpendingin Sodium (SFR)

SFR merupakan sistem energi nuklir dengan spektrum neutron cepat yang potensial dalam memanfaatkan siklus bahan bakar tertutup dengan daur ulang aktinida penuh^[3]. Pendingin SFR adalah sodium, dan temperatur *outlet*-nya diestimasi sebesar 550°C. Bahan bakar SFR berupa paduan logam plutonium atau uranium. SFR memanfaatkan siklus bahan bakar tertutup, sehingga kebanyakan aktinida minor dan trans-uranik tidak akan pernah dikeluarkan dari reaktor dan akan tetap dimanfaatkan selama operasi reaktor. Desain SFR dilukiskan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Desain sistem SFR^[3].



Gambar 6. Desain sistem LFR^[3].

2.6. Reaktor Cepat Berpendingin Timbal Cair (LFR)

LFR adalah tipe terakhir dari empat sistem energi nuklir dengan spektrum neutron energi cepat. LFR juga potensial dalam memanfaatkan siklus bahan bakar tertutup dengan daur ulang aktinida penuh^[3]. Sistem LFR sangat mirip dengan SFR dengan perbedaan utama pada pemilihan pendingin: timbal (Pb) atau timbal-bismuth (Pb-Bi) digunakan untuk LFR sedangkan sodium (Na) dimanfaatkan dalam SFR. Desain LFR diperlihatkan dalam Gambar 6.

3. PEMBAHASAN

3.1. Reaktor Temperatur Sangat Tinggi (VHTR)

VHTR merupakan salah satu kandidat terdepan dari 6 konsep desain reaktor Generasi IV yang modul demonstrasinya diproyeksikan mulai dibangun awal tahun 2016. Program riset dan pengembangan VHTR secara ekstensif paling banyak dikerjakan di berbagai negara karena keatraktifan desain VHTR dan kapabilitasnya untuk aplikasi produksi listrik dan panas proses temperatur tinggi.

Operasi sistem energi nuklir temperatur tinggi mensyaratkan batasan tambahan pada desain VHTR dengan implikasi terbesar pada seleksi material yang optimal. Isu ini secara khusus mempengaruhi desain perangkat partikel dengan material resistansi temperatur tinggi yang esensial untuk mencegah kontaminasi sistem selama operasi reaktor. Untuk alasan inilah partikel bahan bakar berlapis TRISO menjadi tipe bahan bakar nuklir utama yang dipertimbangkan untuk digunakan dalam VHTR.

Kernel bahan bakar berlapis TRISO (Gambar 7) untuk desain teras VHTR prismatik dan komposisinya ditunjukkan pada Tabel 1. Dari Gambar 7 dan Tabel 1 dapat diamati bahwa, partikel bahan bakar berlapis TRISO terdiri dari kernel UCO berdiameter 0,78 mm yang dilapisi oleh lapisan-lapisan material resistansi temperatur tinggi, seperti silikon karbida (SiC) atau zirkonium karbida (ZrC) dan grafit pirolitik (PyC). Struktur dibentuk ke dalam *pebble* atau bola yang siap dimanfaatkan dalam teras *pebble bed* atau kompak bahan bakar yang disusun ke dalam blok prismatik grafit sebagai bahan bakar teras VHTR prismatik. Spesifikasi elemen bakar VHTR yang diinsersikan ke dalam teras disajikan dalam Tabel 2.



Gambar 7. Kernel bahan bakar berlapis^[4].

Tabel 1. Parameter kernel bahan bakar berlapis TRISO^[4].

Parameter	Radius ($\times 10^{-2}$ cm)	Densitas (g/cm ³)	Komposisi Material
Kernel bahan bakar	1,75	10,50	UC ⁵ O ^{1.5}
Penyangga karbon berpori	2,75	1,00	C
Karbon pirolitik dalam	3,10	1,90	C
Silikon karbida	3,45	3,20	SiC
Karbon pirolitik luar	3,85	1,87	C
Diameter total kernel	7,70		

Tabel 2. Parameter elemen bakar VHTR^[4].

Parameter	Besaran
Jarak <i>flat</i> ke <i>flat</i> (cm)	36,0
Tinggi aksial (cm)	79,0
Densitas grafit (g/cm ³)	1,74
Batang bahan bakar	
Jumlah per elemen bakar	210
Radius (cm)	0,6225
Kompak bahan bakar per bahan bakar	15
Fraksi <i>packing</i>	33,50%
Kanal pendingin	
Jumlah per elemen bakar	108
Radius (cm)	0,6225
Komposisi material	He

3.2. Reaktor Berpendingin Air Super Kritis (SCWR)

SCWR dapat dioperasikan dalam spektrum termal atau spektrum cepat^[3]. Bila dioperasikan sebagai reaktor termal dengan daur bahan bakar sekali lewat, maka diadopsi siklus bahan bakar berbasis uranium. Sebagai sistem reaktor cepat, siklus bahan bakar SCWR harus tertutup dengan opsi daur ulang aktinida penuh. Dari 2 opsi SCWR, maka opsi spektrum termal menjadi pilihan yang menonjol di USA, hal ini karena adanya kemiripan antara reaktor air ringan (*light water reactor*, LWR) dengan SCWR termal, dan pengalaman operasional LWR akan membawa SCWR ke tingkat kapasitas dan kualitas yang lebih tinggi.

Dibandingkan LWR, SCWR termal memanfaatkan air ringan untuk pendingin dan moderator dengan perbedaan utama pada tekanan dan temperatur operasi yang lebih tinggi. Tekanan dan temperatur seperti itu dibuat untuk mengkondisikan air ke dalam keadaan super kritis dan mempersembahkan kondisi yang mendukungnya sebagai fluida fase tunggal. Faktor-faktor ini memungkinkan SCWR secara potensial dioperasikan dengan efisiensi tinggi dan mode operasi yang lebih sederhana serta selamat dibandingkan LWR. Model SCWR didasarkan pada SiC/SiC sebagai kelongsong dan air yang spesifikasinya dirangkum dalam Tabel 3.

Air dalam SCWR berada dalam 2 keadaan yang berbeda di teras reaktor. Moderator SCWR adalah air ringan yang mengalir melalui tabung air SiC/SiC. Pendingin sistem adalah air tetapi terpisah dari moderator. Pendingin mengalir dalam kanal di seluruh elemen bakar dan dijaga di atas titik kritis termodinamika air (22,1 MPa, 337°C)^[3]. Temperatur kedua fluida ini bervariasi secara aksial dengan densitas rata-rata sebesar 0,61 g/cm³ dan 0,26 g/cm³ masing-masing untuk moderator dan pendingin.

Tabel 3. Spesifikasi kisi SCWR^[5].

Spesifikasi	Besaran
Tipe kisi	21×21 kisi persegi
<i>Pitch</i> perangkat (mm)	285,0
Ketebalan perangkat (mm)	3,0
Sisi perangkat (mm)	283,0
Celah antar-perangkat	2,0
Tabung air	
Jumlah per perangkat	25
Panjang sisi tabung air (mm)	39,6
Ketebalan dinding air (mm)	0,4
Pin bahan bakar	
Jumlah per perangkat	216
Diameter luar pin bahan bakar (mm)	12,192
Tipe kelongsong	Si-duplex
Ketebalan lapisan SiC monolitik (mm)	1,016
Densitas lapisan SiC monolitik (g/cm ³)	3,1
Ketebalan lapisan SiC berpori	0,4064
Densitas lapisan berpori	2,7
Pelet bahan bakar	
Diameter luar (mm)	9,1872
Tebal celah dingin (µm)	80,0
Komposisi bahan bakar	UO ₂
Panjang bahan bakar aktif (m)	4,27
Densitas bahan bakar (g/cm ³)	10,4215
Pengkayaan U-235	5,0%

3.3. Reaktor Garam Cair (MSR)

MSR memanfaatkan siklus bahan bakar tertutup dengan daur ulang aktinida penuh^[3]. Parameter reaktor diberikan dalam Tabel 4. Sistem MSR adalah unik karena tidak membutuhkan fabrikasi bahan bakar dan yang lebih penting lagi, MSR didesain untuk pembakaran aktinida minor. Aktinida minor dicampurkan ke dalam garam fluorida cair dan kemudian fluida mensirkulasinya ke seluruh teras. Campuran tersebut mengalir melalui kanal-kanal dalam matriks grafit yang menyebabkan moderasi neutron.

Sistem MSR dapat dioperasikan pada tekanan yang relatif rendah dan temperatur tinggi, karena pendinginnya berupa garam cair. Ditinjau dari segi manajemen limbah, desain MSR sangat menarik karena memiliki laju konsumsi aktinida yang bersih. MSR yang dimoderasi grafit memanfaatkan siklus bahan bakar sekali lewat. Pemuatan bahan bakar awal didasarkan pada trans-uranik yang dihasilkan selama operasi LWR.

Tabel 4. Parameter MSR^[6].

Parameter	Besaran
Geometri	Prisma heksagonal
Tinggi (m)	4
<i>Pitch</i> (cm)	30
Moderator	
Komposisi	C
Densitas	2,194
<i>Molten Salt</i>	
Diameter kernel (cm)	7
Densitas (g/cm ³)	3,1855
Bahan bakar trans-uranik	12,87%
Garam NaF-ZrF ₄	87,13%

3.4. Reaktor Cepat Berpendingin Gas (GFR)

GFR dipilih sebagai salah satu sistem energi nuklir Generasi IV karena potensinya yang *excellent* dalam sustainabilitas melalui reduksi volum dan radiotoksitas dari bahan bakarnya sendiri dan bahan bakar bekas lainnya. Potensi lainnya yang dimiliki GFR adalah meningkatkan pemanfaatan orde sumber daya uranium. Ciri utama reaktor ini adalah temperatur operasinya tinggi dimana temperatur *outlet* dimungkinkan mencapai 850°C. Pada umumnya, operasi temperatur tinggi dari sebuah reaktor nuklir akan menghasilkan efisiensi yang relatif tinggi, namun dibutuhkan material yang *advanced* untuk menopang kondisi operasi. Saat ini pin, pelat dan blok prismatic sedang dipertimbangkan sebagai konfigurasi teras.

Dari kompilasi data parameter yang ditabulasikan dalam Tabel 5 dapat dilihat bahwa, desain reaktor memiliki SiC sebagai material matriks. Seleksi ini didasarkan untuk keberlanjutan material pada operasi temperatur tinggi. Konsekuensinya profil fluks diekspektasi lebih lunak daripada yang dipromosikan dalam spesifikasi Generasi IV awal, karena pemuatan karbon dalam teras yang tinggi dan banyaknya hampir setengah dari jumlah total material teras.

Tabel 5. Parameter GFR^[7].

	Parameter	Besaran
Blok bahan bakar		
	Bentuk	Heksagonal
	Tinggi (cm)	10
	Jarak <i>flat</i> ke <i>flat</i>	10
	Jumlah blok bahan bakar per reaktor	990
	Volum bahan bakar + matriks	60%
	Bahan bakar	UC
	Material matriks	SiC
	Rasio bahan bakar / matriks	50%
Komposisi bahan bakar		
	U-235	6,92%
	U-238	93,08%
Pendingin		
	Pendingin	He
	Fraksi volum pendingin	40

3.5. Reaktor Cepat Berpendingin Sodium (SFR)

Sistem reaktor dengan pendingin sodium mencirikan reaktor spektrum neutron cepat dengan daur ulang bahan bakar tertutup. Misi utama SFR adalah manajemen limbah nuklir level tinggi dan khususnya, mengelola plutonium dan aktinida lainnya. Dengan mereduksi biaya modal, maka misi SFR dapat ditingkatkan untuk produksi listrik dengan kapabilitas yang teruji dalam memanfaatkan hampir seluruh energi dari uranium alam.

Model SFR diadopsi dari reaktor LMFBR XVI-2^[8] yang telah memasukkan perangkat secara terperinci ke dalam fraksi isotopik dimana tidak ada pemuatan awal isotop U-235. Teras reaktor terdiri dari beberapa nuklida radiotoksik yang diperoleh dalam bahan bakar nuklir bekas. Temperatur dan densitas daya model SFR masing-masing diatur sebesar 550°C dan 60 W/cm³.

3.6. Reaktor Cepat Berpendingin Timbal Cair (LFR)

Sistem LFR memiliki dua teknik kunci yang menawarkan prospek untuk memenuhi aspek non-proliferasi, sustainabilitas, keselamatan dan reliabilitas serta ekonomis adalah pemanfaatan pendingin timbal (Pb) dan waktu operasi yang sangat panjang. Parameter desain LFR ditunjukkan pada Tabel 6. Pb sendiri tidak berinteraksi dengan udara, air, uap atau karbon dioksida sehingga reaksi eksotermik tidak mungkin terjadi. Titik didihnya yang tinggi (1.740°C) mengeliminasi prospek pendidihan pendingin dengan tekanan ruang. Karakteristik LFR yang dapat melakukan pembiakan diri (*self breeding*) menyebabkan reaktor ini memiliki waktu operasi yang sangat lama, yaitu 15-30 tahun.

Hampir semua reaktor Generasi IV ditujukan untuk memproduksi listrik dan hidrogen kecuali SFR dan SCWR yang hanya digunakan untuk memproduksi listrik. SCWR memanfaatkan uranium dioksida (UO₂) dan VHTR memanfaatkan uranium oksikarbida (UCO) sebagai bahan bakar reaktor. GFR dan LFR masing-masing menggunakan uranium plutonium karbida [(U,Pu)C] dan uranium plutonium nitrida [(U,Pu)N]. MSR sedikit berbeda dengan reaktor Generasi IV lainnya karena menggunakan uranium fluorida (UF) dalam garam sebagai bahan bakar reaktor. SFR memanfaatkan bahan bakar serupa dengan GFR dan LFR namun ditambah campuran uranium plutonium oksida [(U,Pu)O₂, *mixed oxide*, MOX].

Tabel 6. Parameter LFR^[9,10,11].

Parameter	Besaran
Bahan bakar	
Komposisi bahan bakar	UN
Fraksi volum	55%
Densitas yang <i>dismear</i>	0,85%
Pengkayaan U-235	20%
Kelongsong	
Komposisi	EP-823
Fraksi volum	16%
Densitas (g/cm ³)	10,4
Pendingin	
Komposisi	Pb
Fraksi volum	10%
Densitas (g/cm ³)	10,4

Berdasarkan deskripsi di atas, maka dapat dirangkum beberapa parameter spesifik yang berkaitan dengan sistem reaktor Generasi IV seperti ditampilkan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Parameter desain sistem reaktor Generasi IV^[3].

Tipe reaktor	Spektrum neutron	Temperatur (°C)	Bahan bakar	Kelongsong	Pendingin, Moderator
GFR	Cepat	850	MC ^a /SiC	Keramik	Helium
LFR	Cepat	550-800	MN ^b	Keramik Si-Tinggi F-M ^c	Pb-Bi
MSR	Epitermal	700-800	Garam (+UF)	Tidak ada	Gram fluorida
SFR	Cepat	550	U-Pu-Zr/MOX	F-M (HT9 atau ODS ^d)	Sodium
SCWR	Termal/cepat	510-550	UO ₂ /Dispersi MOX	F-M (12 Cr, 9 Cr, dll.)	Air
VHTR	Termal	1.000	TRISO UOC dalam kompak grafit, <i>coating</i> ZrC	<i>Coating</i> ZrC dan grafit di sekelilingnya	Helium

MC^a = (U,Pu) Karbida, MC^b = (U,Pu) Nitrida, F-M^c = *Stainless steel* feritik-martensitik (tipikal 9 hingga 12 % berat Cr),

ODS^d = *Oxide Dispersion-Strengthened Steels* (tipikal feritik-martensitik).

4. KESIMPULAN

Desain reaktor Generasi IV terdiri dari 2 desain reaktor dengan spektrum neutron termal dan 4 desain reaktor dengan spektrum neutron epitermal/cepat. Ditinjau dari produksi bahan bakar bekas bersifat radiotoksik yang tinggi, reaktor dengan spektrum energi neutron cepat tampak menjadi desain yang lebih baik.

Siklus bahan bakar reaktor cepat dalam kelompok Generasi IV mempunyai kapabilitas desain untuk mendaur-ulang aktinida penuh. Efisiensi setiap desain reaktor yang memperlihatkan performa yang relatif pada isu limbah nuklir sangat bergantung pada konfigurasi final reaktor Generasi IV dan kondisi operasionalnya.

Desain-desain reaktor Generasi IV secara penuh belum dikembangkan sehingga spesifikasi detailnya belum dapat diperoleh secara lengkap. Namun beberapa parameter spesifik yang dirangkum dalam makalah ini sangat bermanfaat untuk pemodelan dalam perspektif yang lebih luas bagi perhitungan teras dan sistem reaktor Generasi IV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. DEUTSCH and E. MONIZ, "The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study", Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [2] _____, "Advanced Fuel Cycle Initiative: The Future Path for Advanced Spent Fuel Treatment and Transmutation Research", HR-107-258, Office of Nuclear Energy, Science and Technology DOE, January, 2003.
- [3] _____, "Report to Nuclear Energy Research Advisory Committee, Washington: Technical Roadmap Report", United States Subcommittee on Generation IV Technology Planning on A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, 2003.
- [4] J.W. STERBENTZ, *et al.*, "Reactor Physics Parametric and Depletion Studies in Support of TRISO Particle Fuel Specification for the Next Generation Nuclear Plant", INEEL/EXT-04-2530, September, 2004.
- [5] P.E. MAC DONALD, *et al.*, "Feasibility Study of Supercritical Light Water Cooled Reactors for Electric Power Production: 12-th Quarterly and Final Report", INEEL/EXT-04-2530, 2001.
- [6] E. RODRIGUEZ-VIEITEZ, *et al.*, "Transmutation Capability of Once-Through Critical or Sub-Critical Molten-Salt Reactors", Proceedings of the Seventh Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Jeju, Republic of Korea, October, 2002.
- [7] M. DRISCOLL, *et al.*, "Engineering and Physics Optimization of Breed and Burn Fast Reactor Systems: Final Report", MIT-GFR-035, September, 2005.
- [8] H. OIGAWA, *et al.*, "Experiments and Analyses on Sodium Void Reactivity Worth in Uranium-Free Fast Reactor at FCA", Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 39, No. 7, p. 729-735, July, 2002.
- [9] _____, "Generation IV Nuclear Energy Systems Ten-Year Program Plan", Office of Advanced Nuclear Research, DOE Office of Nuclear Energy, Science and Technology, Volume 1, March, 2005.
- [10] J.J. SIENNICKI, *et al.*, "SSTAR Lead-Cooled, Small Modular Fast Reactor for Deployment at Remote Sites – System Thermal Hydraulic Development", Proceedings of the ICAAP'05, Seoul, Republic of Korea, May, 2005.
- [11] P. HEJZLAR, *et al.*, "Actinide Burning in a Lead-Bismuth-Cooled Critical Fast Reactor with Economic Electricity Generation", Proceedings of the Seventh Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Jeju, Republic of Korea, October, 2002.