

ANALISIS KOMPARASI HTGR TIPE PRISMATIK DAN PEBBLE BED

Siti Alimah, Erlan Dewita, Sudi Ariyanto

Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN) – BATAN
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, 12710
Phone/ Fax : (021) 5204243, E-mail : alimahs@batan.go.id

Diterima	Diterima dalam bentuk revisi	Disetujui
07 Februari 2014	10 April 2014	05 Mei 2014

ABSTRAK

ANALISIS KOMPARASI HTGR TIPE PRISMATIK DAN PEBBLE BED. Telah dilakukan analisis komparasi High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) tipe prismatik dan pebble bed. HTGR adalah salah satu kandidat untuk pembangkit listrik masa depan dan aplikasi panas untuk industri. Fitur desain HTGR saat ini, bermoderator grafit, teras berpendingin helium dan partikel bahan bakar berlapis TRISO yang didispersikan dalam matriks grafit. Masing-masing tipe teras HTGR tersebut masing-masing mempunyai kelebihan. Studi ini bertujuan membandingkan HTGR prismatik dan pebble bed sebagai alternatif PLTN di Indonesia. Metodologi yang digunakan adalah kajian literatur dan analisis dengan membuat nilai bobot berdasar aspek strategi nasional dan tekno ekonomi. Aspek strategi nasional meliputi tujuan PLTN dibangun, rating daya pembangkit dan ketersediaan teknologi fabrikasi elemen bakar. Aspek tekno-ekonomi meliputi keselamatan umum, teknologi teruji, kinerja pembangkit, kemudahan produksi elemen bakar, umur desain, interval siklus pengisian bahan bakar, efisiensi thermal, penyederhanaan, kemudahan operasi dan perawatan serta proteksi fisik. Hasil analisis menunjukkan bahwa HTGR pebble bed dan prismatik, masing-masing mempunyai nilai terbobot 4,546 dan 3,823 dari nilai tertinggi 5 sehingga HTGR pebble bed memiliki nilai lebih unggul dibanding HTGR prismatik.

Kata kunci : HTGR, prismatik, pebble bed, pembobotan

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF HTGR TYPE PRISMATIC AND PEBBLE BED. Analysis comparative of High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) type prismatic and pebble bed has been carried out. HTGR is one of candidates for future electricity plant and industrial process heat applications. Current HTGR design features graphite moderated, helium cooled cores and TRISO coated fuel particles dispersed in a graphite matrix. Each type of HTGR cores has certain advantage. The purpose of this study is to compare of HTGR type prismatic and pebble bed as NPP alternative in Indonesia. The used methodology was literature assessment and analysis by making the weighting factor based on aspects of national strategic and techno-economic. National strategic aspects cover the purpose of NPP is constructed, rating power plant and availability of fuel element fabrication technology. Techno-economic aspects includes general safety, proven technology, plant performance, fuel element productability, design life, refueling cycle, thermal efficiency, simplicity, operability and maintability, also physical protection. The results of the analysis show HTGR type pebble bed and prismatic, each has weighted point 4.546 and 3.823 of 5 as the highest, so HTGR pebble bed superior than HTGR prismatic.

Keywords: HTGR, prismatic, pebble bed, weighting

1. PENDAHULUAN

Dalam UU No. 30 Tahun 2007 tentang energi, nuklir merupakan salah satu sumber energi baru, dan dalam Perpres No. 5 Tahun 2006, serta UU No. 17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2005 – 2025 (RPJP), energi nuklir merupakan salah satu alternatif dalam pemenuhan energi nasional. Hal tersebut, memberi peluang untuk memanfaatkan PLTN di Indonesia, untuk diversifikasi energi, guna mendukung keamanan pasokan energi yang aman, bersih dan berkelanjutan.

Opsi berbagai tipe PLTN perlu dipelajari, sehingga dapat ditentukan PLTN yang layak dibangun di Indonesia. Salah satu tipe PLTN yang saat ini sedang dikembangkan di dunia adalah HTGR (*High Temperature Gas Cooled Reactor*). HTGR merupakan reaktor dengan temperatur keluaran lebih tinggi dari pada teknologi reaktor air ringan (LWR). Teknologi ini selain menghasilkan listrik, dapat diaplikasikan untuk memasok panas proses di fasilitas industri seperti industri amoniak, pupuk, peningkatan pengambilan minyak (*EOR/Enhanced Oil Recovery*), pencairan/gasifikasi batubara, produksi aluminium, pembuatan baja dan produksi hidrogen. Reaktor ini merupakan reaktor skala SMR (*Small Medium Reactor*)/reaktor skala kecil menengah, yang mempunyai fitur keselamatan melekat dan sistem keselamatan teknis pasif, sehingga mempunyai tingkat keselamatan dan keandalan yang lebih baik.

Reaktor HTGR mempunyai densitas daya rendah ($4-6,6\text{W/cm}^3$)^[1] dan kapasitas panas dari struktur grafit besar, panas peluruhan dalam elemen bakar dapat dipindahkan ke bagian luar bejana tekan dengan konduksi panas dan radiasi, sehingga temperatur bahan bakar tidak mencapai batasan temperatur desain bahan bakar. Perubahan proses kehilangan pendingin menjadi kecelakaan parah membutuhkan waktu yang lama, karena memerlukan waktu sehari-hari bahan bakar mencapai temperatur maksimum (1600°C). Sementara itu, HTGR menggunakan teras reaktor dari grafit yang mempunyai titik leleh 3697°C . Oleh karena itu, kecelakaan seperti pelelehan teras di LWR tidak akan terjadi, sehingga pelepasan besar dari produk fisi radioaktif juga tidak akan terjadi selama kecelakaan parah.

Burn-up bahan bakar dapat mencapai $90,000\text{MWhari/tonU}$ ^[2], sehingga sisa bahan fisil dalam bahan bakar bekas sangat kurang dan tidak memenuhi syarat untuk digunakan sebagai senjata nuklir. Daur bahan bakar HTGR yang diadopsi saat ini adalah daur *once-through* (sekali lewat), tidak ada olah ulang bahan bakar bekas. Material hasil fisi akan tetap tertahan dalam elemen bakar selama struktur elemen bakar terproteksi secara fisik. Reaktor dilindungi bangunan reaktor dengan beton yang sangat tebal, sehingga merupakan pelindung yang sangat kuat terhadap serangan sabotase. Oleh karena adanya berbagai kelebihan tersebut, maka HTGR merupakan alternatif pembangkit energi yang menarik, sehingga perlu dipertimbangkan sebagai PLTN di Indonesia.

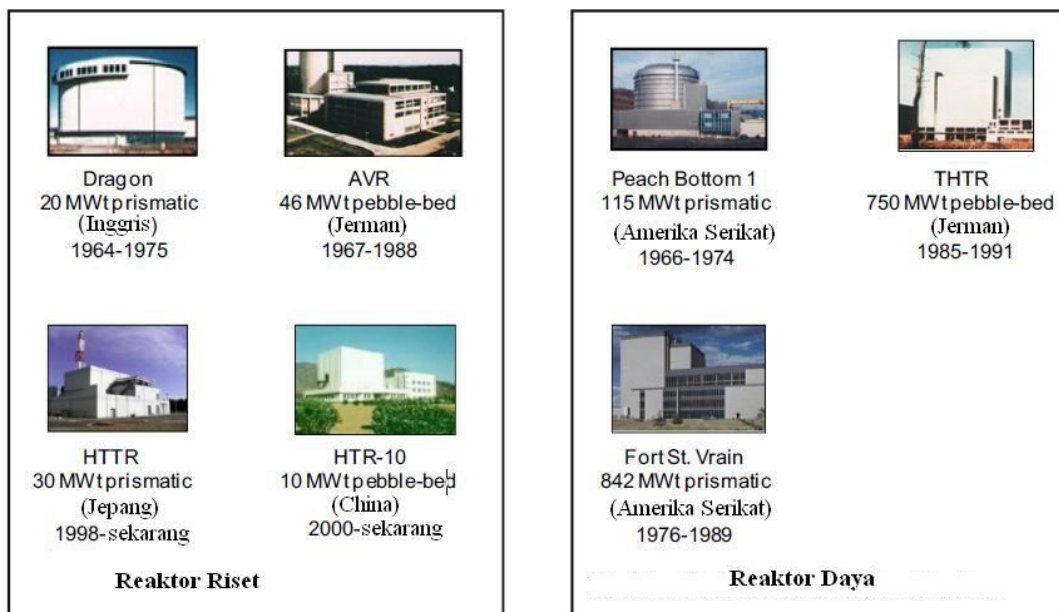
Desain teras HTGR memiliki dua tipe yaitu prismatik dan *pebble bed*. Dalam tipe prismatik, sejumlah partikel TRISO terdispersi dalam elemen bakar silindris, dimasukkan ke dalam blok grafit berbentuk heksagonal. Sedangkan dalam tipe *pebble bed*, partikel TRISO dengan jumlah tertentu didispersikan ke dalam bahan bakar *pebble* berbentuk bola. Makalah ini mengkaji teknologi PLTN HTGR *pebble bed* dan prismatik, yang masing-masing mempunyai kelebihan tersendiri. Tujuan dari penulisan makalah ini adalah membandingkan HTGR *pebble bed* dan prismatik, dan selanjutnya dianalisis dengan membuat nilai bobot berdasar aspek strategi nasional dan tekno ekonomi. Hasil studi diharapkan dapat menjadi masukan dalam mempertimbangkan teknologi PLTN yang dapat diaplikasikan di Indonesia.

2. METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam analisis HTGR adalah membandingkan HTGR *pebble bed* dan prismatic, dengan membuat pembobotan berbagai parameter. Aspek yang dipertimbangkan dalam pembobotan adalah aspek strategi nasional dan tekno ekonomi. Pembobotan dibuat berdasar penilaian yang dibatasi dari 1 sampai 5 dan persentase bobot dengan batasan 1 sampai 10. Dari analisis dengan pembobotan ini, jumlah nilai terbobot yang lebih tinggi dianggap memiliki nilai lebih sebagai alternatif PLTN di Indonesia.

3. HTGR PRISMATIK DAN PEBBLE BED

Dalam Gambar 1 terlihat 7 instalasi HTGR di dunia yang telah dibangun dan dioperasikan, dan pertama kali dioperasikan tahun 1964 di Inggris. HTGR pertama adalah reaktor riset Dragon 20 MWt di Inggris. Setelah reaktor Dragon, 2 reaktor daya rendah dikonstruksi yaitu : 115 MWt *Peach Bottom Unit 1* di Amerika Serikat dan 46 MWt AVR (*Arbeitsgemeinschaft Versuchs Reactor*) di Jerman. Selanjutnya diikuti dengan konstruksi 2 instalasi, yaitu : instalasi 842 MWt Fort St. Vrain (FSV) di Amerika Serikat, dan 750 MWt THTR (*Thorium Hoch Temperature Reactor*) di Jerman. Dua reaktor riset juga telah dikonstruksi dan berhasil dioperasikan, yaitu : 30 MW(t) HTTR (*High Temperature Test Reactor*) di Jepang dan 10 MW(t) HTR-10 (*High Temperature Reactor-10*) di China. Selama konstruksi berbagai HTGR tersebut, desain bejana reaktor mengalami perubahan dari baja karbon (*carbon steel*) menjadi bejana reaktor beton bertekanan (*Prestressed Concrete Reactor Vessels/PCR/V*) dan akhirnya menggunakan paduan logam mutakhir dalam desain terakhir, seperti terlihat dalam Tabel 1.



Gambar 1. Beberapa Instalasi Reaktor Riset dan Daya Tipe HTGR di Dunia^[9].

Dari berbagai HTGR yang telah dibangun dan dioperasikan seperti terlihat dalam Tabel 1, terlihat dua tipe teras HTGR yaitu *pebble-bed* digunakan di AVR, HTR-10, THTR dan

prismatik digunakan di *Peach Bottom*, FSV, HTTR, Dragon. Namun, hanya dua HTGR yang dioperasikan di Asia yaitu HTTR di Jepang dan HTR-10 di Cina.

Tabel 1. Spesifikasi HTGR Yang Telah Dibangun di Beberapa Negara di Dunia^[3]

Reaktor	<i>Peach Bottom 1</i>	Fort St. Vrain	THTR	Dragon	AVR	HTTR	HTR-10
Daya (MWt)	115	842	750	20	46	30	10
Densitas daya (MW/m ³)	8,3	6,3	6	14	2,6	2,5	2
Pendingin primer	He	He	He	He	He	He	He
Pendingin Sekunder	Uap	Uap	Uap	Uap	Uap	He/air bertekanan	Uap
Tekanan Pendingin Primer, (Mpa)	2,5	4,8	4	2	1,1	4	3
Laju Alir Pendingin Primer (kg/detik)	60*	110	51,2	9,62	13	10,2-12,4	3,2-4,3
Temperatur Masuk Reaktor, (°C)	327	404	250	350	275	395	250
Temperatur Keluar Reaktor, (°C)	700-726	777	750	750	950	850/950	700
Material RPV	<i>Carbon Steel</i>	PCRV dengan liner	PCRV	<i>Carbon Steel</i>	<i>Steel</i> dan bangunan beton	2-1/4Cr-1Mo <i>Steel</i>	Cr-Mn-Si <i>Steel</i>
Bahan bakar	(U-Th)C ₂ BISO	UO ₂ & ThO ₂ -UO ₂ TRISO	(U-Th)O ₂ BISO	(U,Th,Pu)O ₂ TRISO	(U-Th)O ₂ BISO	UO ₂ TRISO	UO ₂ TRISO
Temperatur maksimal bahan bakar, (°C)	~1000	1260	1350	~1000	1350	~1250	-
Jenis struktur teras	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit
Jenis elemen bakar	Prismatik	Prismatik	<i>Pebble bed</i>	Prismatik	<i>Pebble bed</i>	Prismatik	<i>Pebble bed</i>
Pengkayaan (% berat)	93	93	93	3,5	93	6	17
Ukuran Sirkulator (kWe)	1417	3954	2300	75	220	dua@260, satu@190	165
Jumlah sirkulator	2	4	6	6	2	3	1

Keterangan : *Total laju alir 2 loop

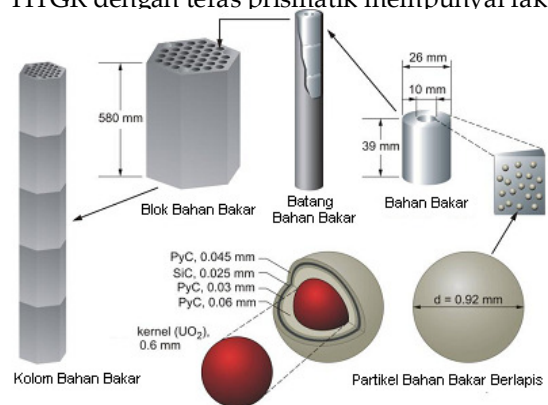
PCRV : *Prestressed Concrete Reactor Vessel*

HTGR prismatik atau *pebble bed* menggunakan partikel bahan bakar berlapis TRISO. Masing-masing partikel mengandung kernel bahan bakar bola dari material dapat belah atau dapat biak, yang biasanya dapat dalam bentuk uranium dioksida (UO₂), uranium thorium

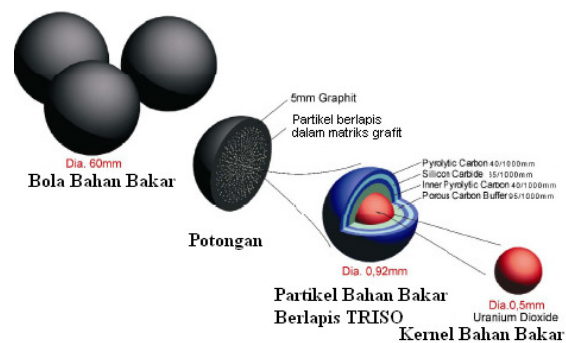
oksida (U,Th)O₂ atau plutonium oksida (PuO₂)^[4]. Kernel bahan bakar dilapisi dengan lapisan berpori pyrocarbon (PyC), *inner dense* PyC (IPyC), silikon karbida (SiC) dan *outer dense* PyC (OPyC). Pelapis tersebut mampu menjaga integritas dan menahan produk fisi pada temperatur yang lebih tinggi daripada selama operasi normal dan kondisi kecelakaan terpostulasi. Basis desain temperatur maksimum bahan bakar adalah 1600°C.

Selain menjaga produk fisi agar tidak terlepas dari integritas bahan bakar, pelapis juga berfungsi mempertahankan bahan bakar dan produk fisi berada di bawah temperatur 1600°C serta mencegah pelepasan radiasi yang signifikan ke lingkungan. Pada PLTN tipe HTGR, mulai terjadi kegagalan bahan bakar pada temperatur 2000°C^[5]. Oleh karena itu, kemungkinan kerusakan bahan bakar sangat rendah (< 10⁻⁶ operasi reaktor tahun)^[5] dan pelepasan produk fisi mempunyai risiko pada level yang jauh lebih rendah dari pada PLTN tipe LWR (*Light Water Reactor*).

Bahan bakar prismatic terdiri dari blok yang besar dengan pola teratur dan lobang-lobang pendingin. Partikel bahan bakar berlapis dimasukkan dalam bahan bakar kompak silindris, seperti terlihat dalam Gambar 2, yang kemudian dimasukkan dalam blok grafit berbentuk heksagonal. Pada desain Amerika Serikat, lobang-lobang pada blok bahan bakar, selain terdapat bahan bakar juga terdapat saluran pendingin dan lokasi untuk *absorber* serta material kendali. Sedang pada desain Jepang, pendingin mengalir melalui *annular gap* di antara lobang dan permukaan bagian dalam lobang^[6]. Siklus pengisian bahan bakar sekitar 18 bulan. HTGR dengan teras prismatic mempunyai faktor ketersediaan sekitar 85%, umur desain 20 -30



Gambar 2. Bahan Bakar Prismatic^[1].



Gambar 3. Bahan Bakar Pebble Bed^[9].

Bahan bakar *pebble* (bola) terdiri dari partikel bahan bakar berlapis yang kompak, dalam suatu *shell* berbentuk bola, seperti terlihat dalam Gambar 3. Di dalam reaktor jenis *pebble bed*, pendingin helium mengalir melalui rongga-rongga kosong yang berada di antara bahan bakar *pebble* dan melalui reflektor grafit. Dalam setiap bahan bakar *pebble* terdapat sekitar 10⁴ partikel berlapis berdiameter 0,92 mm yang terdispersi uniform dalam matriks grafit untuk membentuk zona bahan bakar berdiameter 5 cm yang dilapisi *shell* grafit berketebalan 0,5 cm, dan setiap hari sekitar 350 bahan bakar dikeluarkan^[7]. Konsep *pebble bed* ini dikembangkan di Jerman, Rusia, Cina dan Afrika Selatan. Teras HTGR *pebble-bed* dimuati ribuan bahan bakar *pebble* yang jumlahnya tergantung pada level daya dan desain reaktor yang dispesifikasikan. HTGR dengan teras *pebble-bed* mempunyai faktor ketersediaan sekitar 90%-92%^[8], umur desain 48-60 tahun dan efisiensi thermal 34,4%- 45%.

Desain teras berbahan bakar prismatik atau *pebble bed* secara umum terdiri dari komponen, yaitu :

- Struktur teras grafit
- Bejana tekan reaktor paduan baja
- Sirkulator helium
- Sistem pemurnian helium
- Batang kendali dan penggerakannya
- IHX (*Intermediate Heat Exchanger*)

Perbedaan antara teras prismatik dan *pebble bed* diperlihatkan dalam Tabel 2, mode pengisian bahan bakar dalam teras *pebble bed* kontinu dari puncak ke dasar teras, dan setelah melalui teras masing-masing, *pebble* diuji integritasnya dan akumulasi *burn-up*nya, kemudian dipindahkan dari teras. Jika *pebble* dipindahkan dari teras, *pebble* baru ditambahkan dari puncak teras. Teras berbahan bakar prismatik membutuhkan reaktivitas berlebih, fraksi *packing* partikel relatif tinggi untuk mendapatkan panjang siklus operasi yang diinginkan, serta membutuhkan *shutdown* reaktor untuk pengisian bahan bakar.

Tabel 2. Perbandingan Konfigurasi Teras Prismatik dan Pebble Bed^[10]

Jenis Bahan Bakar	Prismatik	Pebble Bed
Desain	Bahan bakar kompak di dalam blok heksagonal yang besar	Bahan bakar bola
Mode Pengisian Bahan Bakar	Mode <i>batch</i> , mengganti blok yang lama	Kontinu dan <i>online</i>
Fluks/Penghasil Daya	Pengkayaan bervariasi dalam arah radial dan aksial	Pengkayaan uniform
Integritas Struktur	Distorsi bervariasi karena perbedaan temperatur dan <i>fluence</i> . <i>Stress thermal</i> tinggi	Distorsi rendah dan <i>stress thermal</i> rendah
Penanganan Bahan Bakar	Penggantian dalam arah radial/axial	Kontinu (memasukkan dari atas dan mengeluarkan dari bawah)

Adapun kelebihan dari masing-masing reaktor yang menggunakan teras dengan bahan bakar prismatik dan *pebble bed* adalah sebagai berikut :

Kelebihan Teras Pebble Bed Dibanding Prismatik^[11] :

1. Tidak perlu memadamkan reaktor ketika pengisian bahan bakar karena dapat dilakukan pengisian secara *online* dan kontinu. Pemadaman reaktor diperlukan ketika reflektor diganti. Sedangkan pada teras prismatik diperlukan pemadaman reaktor saat pengisian bahan bakar.
2. Lebih aman terhadap efek amoeba (pergerakan kernel bahan bakar akibat gradient temperatur dapat menyebabkan kerusakan struktur kelongsong bahan bakar). Pada desain prismatik, gradien temperatur lebih tinggi sehingga lebih rentan pada efek amoeba.
3. Lebih mudah diproduksi sehingga menghemat biaya produksi. Konstruksi blok prismatik, memerlukan blok bahan bakar komposit yang berbeda untuk mengkompensasi reaktivitas berlebih, mengintroduksi racun dapat bakar dan memvariasi pengkayaan teras.
4. Karena pengisian bahan bakar kontinu dengan *multiple pass* yang melalui teras, maka masing-masing *pebble* mencapai batas *burn-up* yang disyaratkan sebelum dipisahkan dari siklus bahan bakar teras.

5. Reaktivitas berlebih sangat kecil dibanding desain blok prisma yang memerlukan racun dapat bakar untuk kompensasinya.
6. *Hot spot* dari reaktor terbagi dalam beberapa elemen bakar karena teras dinamik, namun dalam teras prisma, rakitan bahan bakar mempunyai paparan yang lebih lama.

Kelebihan Teras Prisma Dibanding *Pebble Bed*^[11]:

1. Integritas struktur teras prisma lebih tahan terhadap kejadian yang tidak dikehendaki, sedangkan pergerakan bertahap dari matrik bahan bakar dapat terjadi dalam desain teras *pebble* dinamik, terutama pada kejadian gempa bumi.
2. Temperatur dan aliran helium lebih mudah diprediksi dalam teras prisma.
3. Mempunyai batang kendali yang dimasukkan dalam area bahan bakar, sehingga memungkinkan fleksibilitas kendali.
4. Teras *pebble bed* memerlukan daya pompa yang lebih besar untuk aliran pendingin helium yang melewati teras, akibat dari *pressure drop* yang lebih besar.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

HTGR adalah salah satu jenis reaktor skala SMR (*Small Medium Reactor*/reaktor daya kecil menengah), yang mempunyai sistem keselamatan berlapis dengan konsep sistem penghalang ganda (dari pelapis bahan bakar sampai struktur beton pelindung reaktor), dan ditunjang dengan sistem keselamatan pasif dan melekat. Sistem keselamatan melekat berupa *Passive Reactor Cavity Cooling System/PRCCS* dan (*Radiation and Conduction to Structure and Earth/RCSE*)^[12]. Sedangkan sistem keselamatan pasif merupakan sistem yang terdiri dari seluruh komponen-komponen pasif, yang tidak memerlukan input eksternal untuk mengoperasikannya. Dengan penggunaan sistem keselamatan pasif maka akan meningkatkan kemudahan konstruksi, operasi dan perawatan sistem, serta mengurangi tindakan operator. Karakteristik lain dari PLTN HTGR adalah sistem modular.

Seperti telah disebutkan, terdapat dua jenis desain teras HTGR yaitu *pebble bed* dan prisma. Aspek-aspek yang menjadi pertimbangan dalam analisis desain teras HTGR *pebble bed* dan prisma meliputi :

Aspek Strategi Nasional

1. Tujuan PLTN Dibangun

Seleksi tipe reaktor bervariasi tergantung pada tujuan konstruksi PLTN, yang dalam hal ini PLTN tersebut digunakan selain untuk pembangkit listrik, panasnya juga dimanfaatkan untuk industri.

2. Rating Daya Pembangkit

Permintaan energi listrik mengalami pertumbuhan, PLTN kapasitas lebih tinggi merupakan opsi yang lebih diutamakan. Pada umumnya, penggunaan daya yang relatif lebih besar akan menguntungkan secara ekonomi. Namun dalam penggunaan daya yang besar, pertimbangan juga harus diberikan untuk penambahan jaringan listrik dan pelanggan baru, untuk menjaga kinerja dan kualitas sebagai akibat integrasi unit PLTN yang besar.

3. Ketersediaan Teknologi Fabrikasi Elemen Bakar

Seleksi tipe reaktor lebih memilih teknologi reaktor yang mempunyai teknologi fabrikasi elemen bakar di dunia dengan ketersediaan yang tinggi.

Aspek Tekno Ekonomi

1. **Keselamatan Umum**

Pengukuran tipe keselamatan ini meliputi frekuensi bahaya teras.

2. **Keterujian Teknologi**

Sesuai Peraturan Pemerintah No. 2 Tahun 2014, pembangunan PLTN harus memenuhi kriteria semua struktur, sistem dan komponen yang penting untuk keselamatan dalam reaktor nuklir telah teruji dalam lingkungan yang relevan atau sesuai dengan kondisi operasi, dan diterapkan dalam purwarupa.

3. **Kinerja Pembangkit**

Parameter kinerja di sini meliputi faktor ketersediaan pembangkit.

4. **Kemudahan Produksi Elemen Bakar**

Kemudahan produksi elemen bakar berkaitan dengan penghematan biaya produksi.

5. **Umur Desain**

Kandidat teknologi reaktor yang mempunyai umur desain yang cukup panjang lebih diutamakan.

6. **Interval Siklus Pengisian Bahan Bakar**

Interval siklus pengisian bahan bakar adalah salah satu faktor utama yang mempengaruhi ekonomi pembangkit, dan siklus pengisian bahan bakar yang lebih lama akan lebih menguntungkan.

7. **Efisiensi termal**

Efisiensi termal yang lebih tinggi dapat dikatakan ekonomi pembangkit lebih baik.

8. **Penyederhanaan dan Modularisasi**

Pertimbangan desain utama pada penyederhaaan meliputi utilisasi minimum sejumlah sistem dan komponen dalam aktivitas pembangkit, pengurangan sejumlah komponen seperti pengurangan pipa dan katup, pompa, kabel dan lain-lain, juga termasuk kemudahan konstruksi.

9. **Kemudahan Operasi dan Perawatan**

Aspek penting dalam kemudahan operasi dan perawatan meliputi penggunaan teknologi modern digital untuk monitoring dan kontrol, respon pembangkit terhadap kondisi darurat serta pengalaman operasi dan perawatan.

10. **Proteksi Fisik**

Proteksi fisik terhadap fenomena alam seperti gempa bumi, tornado, badai, banjir dan tsunami. Serta proteksi terhadap kejadian akibat ulah manusia.

Berbagai parameter yang telah diuraikan tersebut, kemudian dibuat definisi penilaian dengan batasan nilai 1 sampai 5, seperti terlihat dalam Tabel 3. Selanjutnya dilakukan penilaian dengan pembobotan untuk menganalisis teknologi HTGR (Tabel 5). Dari hasil analisis ini, maka teknologi yang memiliki total nilai lebih tinggi, dianggap lebih unggul.

Tabel 3. Tabel Definisi Penilaian

No.	Parameter	Batasan Nilai	
		1	5
1.	Tujuan PLTN dibangun	Listrik	Listrik dan berbagai pemanfaatan panas untuk industri
2.	Rating daya	Kecil	Besar
3.	Ketersediaan teknologi fabrikasi elemen bakar di dunia	Rendah	Tinggi
4.	Frekuensi bahaya teras	Terdapat frekwensi bahaya teras	Reaktor bebas kecelakaan pelelehan teras
5.	Keterujian teknologi	Belum teruji	Telah teruji
6.	Faktor ketersediaan pembangkit	70%	>90%
7.	Kemudahan produksi elemen bakar	Sangat Sukar	Mudah
8.	Umur desain	20 tahun	60 tahun
9.	Interval siklus pengisian bahan bakar	Setiap hari ada yang diganti	24 bulan
10.	Efisiensi termal	30%	50%
11.	Penyederhanaan	Konvensional	Modular
12.	Penggunaan teknologi modern digital untuk monitoring dan kontrol keselamatan kondisi normal dan darurat.	Sistem keselamatan melekat dan sistem keselamatan aktif	Sistem keselamatan melekat dan sistem keselamatan pasif
13.	Proteksi fisik terhadap fenomena alam.	Tidak tahan terhadap gempa bumi	Lebih tahan terhadap gempa bumi

Untuk membuat pembobotan, terlebih dahulu dibuat persentase bobot dengan membuat tingkat kepentingan dengan batasan 1 sampai dengan 10. Persentase bobot dapat dilihat dalam Tabel 4.

Tabel 4. Persentase Bobot

No.	Parameter	Tingkat Kepentingan	Persentase Bobot (%)
1.	Tujuan PLTN dibangun	2	2,9
2.	Rating daya	2	2,9
3.	Ketersediaan teknologi fabrikasi elemen bakar di dunia	8	11,8
4.	Frekuensi bahaya teras dan kerusakan sungkup	7	10,3
5.	Keterujian teknologi	10	14,7
6.	Faktor ketersediaan pembangkit	8	11,8
7.	Kemudahan produksi elemen bakar	6	8,8
8.	Umur desain	4	5,9
9.	Interval siklus pengisian bahan bakar	3	4,4
10.	Efisiensi termal	5	7,4
11.	Penyederhanaan	3	4,4
12.	Penggunaan teknologi modern digital untuk monitoring dan kontrol keselamatan kondisi normal dan darurat.	3	4,4
13.	Proteksi fisik terhadap fenomena alam.	7	10,3
Total nilai bobot		68	100

Tabel 5. Pembobotan Teknologi HTGR

No.	Parameter	Persentase Bobot (%)	Nilai		Jumlah Nilai Terbobot	
			<i>Pebble Bed</i>	Prismatik	<i>Pebble Bed</i>	Prismatik
1.	Tujuan PLTN dibangun	2,9	5	5	0,145	0,145
2.	Rating daya	2,9	1	1	0,029	0,029
3.	Ketersediaan teknologi fabrikasi elemen bakar di dunia	11,8	5	3	0,590	0,354
4.	Frekuensi bahaya teras dan kerusakan sungkup	10,3	5	5	0,515	0,515
5.	Keterujian teknologi	14,7	5	5	0,735	0,735
6.	Faktor ketersediaan pembangkit	11,8	5	3	0,590	0,354
7.	Kemudahan produksi elemen bakar	8,8	5	2	0,440	0,176
8.	Umur desain	5,9	4	2	0,236	0,118
9.	Interval siklus pengisian bahan bakar	4,4	1	5	0,044	0,220
10.	Efisiensi termal	7,4	5	3	0,370	0,222
11.	Penyederhanaan	4,4	5	5	0,220	0,220
12.	Penggunaan teknologi modern digital untuk monitoring dan kontrol keselamatan kondisi normal dan darurat.	4,4	5	5	0,220	0,220
13.	Proteksi fisik terhadap fenomena alam.	10,3	4	5	0,412	0,515
Total nilai bobot		100			4,546	3,823

Terlihat dalam Tabel 5, HTGR dengan teras *pebble bed* mempunyai jumlah nilai terbobot 4,546 yang lebih besar dibanding prismatik yaitu 3,823. Kalau dari jumlah nilai, teknologi *pebble bed* lebih unggul dibanding prismatik.

5. KESIMPULAN

HTGR merupakan opsi pembangkit listrik yang menarik, karena selain menghasilkan listrik, juga menghasilkan panas temperatur tinggi yang dapat dimanfaatkan di industri. Teknologi PLTN HTGR mempunyai sistem keselamatan berlapis dengan konsep sistem penghalang ganda serta sistem keselamatan melekat dan sistem keselamatan pasif. Ada dua desain teras HTGR, yaitu *pebble bed* dan prismatik, yang dari hasil analisis teknologi berdasar aspek strategi nasional dan tekno-ekonomi, HTGR dengan teras *pebble bed* lebih unggul dibanding prismatik dengan nilai terbobot 4,546.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. ORTENSI, J., "Prismatic Core Neutronics Design and Fuel Cycle", IAEA Course on High Temperature Gas Cooled Reactor Technology Tsinghua University, Beijing, October 22-26, 2012.
- [2]. SANDELL., L, "A Review of Radionuclide Release From HTGR Cores During Normal Operation, Final Report", Electric Power Research Institute, February, 2004.
- [3]. BECK, J.M. and PINCOCK, L.F., "High Temperature Gas-Cooled Reactors Lessons Learned Applicable to the Next Generation Nuclear Plant", Prepared for the U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy, USA, 2011.
- [4]. ZUHAIR dan SUWOTO, "Studi Perhitungan Reaktor HTR *Pebble-Bed* dengan Berbagai Opsi Desain Matriks Bahan Bakar", Prosiding Seminar Nasional Ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Surakarta, 17 Oktober 2009.

- [5]. GOUGAR, H.D., et.all, "Advanced Core Design and Fuel Management for Pebble-Bed Reactors, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, October 2004.
- [6]. KARL VERFONDERN, et.all, "Coated Particle Fuel for High Temperature Gas Cooled Reactors", Nuclear Engineering And Technology, Vol.39 No.5 October 2007.
- [7]. KADAK, A. C., "High Temperature Gas Reactors", Massachusetts Institute of Technology, Kadak Associates, web.mit.edu/pebble-bed/Presentation/HTGR.pdf, diakses Oktober 2013.
- [8]. TSINGHUA UNIVERSITY, "High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble-Bed Module", Status report 96-HTGR-Pebble-Bed Module (HTR-PM), International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2011.
- [9]. ARKAL SHENOY, "History and Evolution of the HTGR", Modul 2A, HTGR Technology Course for The Nuclear Regulatory Commission, May 2010.
- [10]. DULERA, I.A. , et all., "Options For Design of 600 MW(Th) Indian High Temperature Reactor for Hydrogen Production", Reactor Engineering Division, Bhabha Atomic Research Centre, 2007.
- [11]. TOLLIT, B.S., "Coupled Neutronic Thermal Fluid Dynamic Modelling of a Very High Temperature Reactor", Submitted in Part Fullment of The Requirements for The Degree of Doctor of Philosophy in Computational Physics of Imperial College London and the Diploma of Imperial College London, 2010.
- [12]. PIPING SUPRIATNA, "Analisis Komparasi Sistem Keselamatan Reaktor BWR Fukushima dan RGTT200k Akibat Gempa Bumi Dan Tsunami", Prosiding Seminar Nasional ke-17 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Yogyakarta, Oktober 2011.
- [13]. SULAIMAN, S.A., "Preliminary Nuclear Power Reactor Technology Qualitative Assessment for Malaysia", Journal of Nuclear and Related Technologies, Vol. 7, No. 2, December 2010.