

## STUDI REAKTOR TEMPERATUR TINGGI PBMR

Sahala M. Lumbanraja\*)

### ABSTRAK

**STUDI REAKTOR TEMPERATUR TINGGI PBMR.** Perkembangan teknologi dan prospek reaktor temperatur tinggi PBMR perlu dikaji di Indonesia. Konsep PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) dikembangkan berdasarkan teknologi reaktor temperatur tinggi oleh ESKOM Afrika Selatan. Kekhususan teknologi ini adalah penggunaan pendingin gas helium dan moderator grafit. Pada *pebble bed*, bahan bakar U-235 diperkaya antara 8-10%, terdiri dari lapisan partikel dengan dua lapisan karbon dan satu lapisan silikon karbida. Desain PBMR didasarkan pada prinsip-prinsip operasi dan perbaikan yang sangat sederhana, keselamatan tinggi, waktu pembangunan relatif pendek, biaya investasi kecil, biaya pembangkitan sangat kompetitif, unjuk kerja tinggi (faktor ketersediaan tinggi), dan mudah disesuaikan dengan infrastruktur yang ada.

Kata Kunci : PBMR, *pebble bed*, silikon karbida

### ABSTRACT

**ASSESSMENT OF HIGH TEMPERATURE REACTOR PBMR.** This paper describes development of technology and prospect of high temperature reactor PBMR in Indonesia. PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) concept builds on the high temperature gas cooled reactor technology developed by ESKOM South Africa. Typical of this technology is the use of a helium coolant and a graphite moderator. In the pebble bed, the fuel uranium dioxide enriched in U-235 to 8-10 percent, consists of particles coated with two layers of carbon and one of silicon carbide. The design of PBMR is based on enhancement through implementation of inherent safety and passive system, short construction time, small investment cost, competitive generating cost, high performance (high availability) and easily suited to the infrastructures.

### I. PENDAHULUAN

Mayoritas kebutuhan energi dunia disuplai dari energi fosil, hal ini mengakibatkan pencemaran lingkungan semakin tinggi. Oleh karena itu, masalah pencemaran lingkungan dan kebutuhan energi harus diatasi secara bijak. Salah satu solusi yang tepat untuk mendukung pasokan energi berkelanjutan dan juga mengurangi dampak pencemaran lingkungan akibat penggunaan energi fosil di masa datang adalah energi nuklir. Untuk melaksanakan peran tersebut dengan sukses, teknologi energi nuklir harus dapat memenuhi syarat-syarat yang diajukan oleh negara-negara pengguna.

PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) merupakan reaktor nuklir generasi maju berdaya kecil (100-110 MWe), berpendingin gas yang dikembangkan oleh Eskom Afrika Selatan bersama dengan Siemens & ABB Jerman. Teknologi reaktor ini bersumber dari teknologi reaktor temperatur tinggi THTR (*Thorium High Temperature Reactor*) 300

---

\*) Bidang Manajemen Persiapan PLTN-PPEN

MWe yang pernah dioperasikan di Jerman[1]. Status penyelesaiannya saat ini adalah tahap *basic design* dan konstruksi awal pada pertengahan 2005[2]

PBMR merupakan reaktor generasi ke III plus dengan konfigurasi dan performa sistemnya cukup menonjol, yaitu desain modular, waktu hidup panjang (40 tahun), biaya operasi dan perawatan kecil, penggunaan bahan bakar secara *on-line*, margin keselamatan tinggi, waktu pembangunan relatif pendek, biaya investasi kecil dan biaya pembangkitan kompetitif. Selain untuk pembangkit listrik, reaktor ini juga dapat digunakan untuk desalinasi air laut. Sistem keselamatan yang digunakan adalah sistem keselamatan pasif dan inherent[2,3].

Pada makalah ini akan dibahas gambaran umum teras dan sistem reaktor, sistem keselamatan, dan prospek PBMR sebagai salah satu alternatif sistem energi untuk mensuplai kebutuhan energi listrik di masa datang, sehingga kita dapat mengikuti dan memahami perkembangan teknologi PLTN daya kecil sistem modul.

## II. KONSEP DESAIN

Konsep dasar teknologi reaktor temperatur tinggi berpendingin gas saat ini bersumber dari teknologi reaktor temperatur tinggi yang dikembangkan oleh Jerman Barat dan Amerika Serikat pada tahun 1960-an. Setelah beberapa tahun dalam kevakuman, konsep reaktor ini mulai dihidupkan kembali oleh beberapa negara, karena jenis reaktor ini mempunyai beberapa keuntungan, seperti efisiensi tinggi (mencapai 50%). Tabel 1 memperlihatkan reaktor-reaktor temperatur tinggi yang telah dan sedang dikembangkan oleh beberapa negara. Keunikan dari teknologi ini adalah digunakannya gas helium sebagai pendingin dan grafit sebagai moderator.

Tabel 1. Reaktor temperatur tinggi dengan status terakhirnya[1].

Nama Reaktor	Keterangan
AVR	Reaktor <i>pebble bed</i> experimental 15 MWe, beroperasi selama 21 tahun di Jerman (1967 – 1988)
THTR	Reaktor <i>pebble bed</i> 300 MWe dengan turbin uap, beroperasi selama 5 tahun di Jerman (1985 – 1989)
Fort St Vrain	HTGR 330 MWe, beroperasi selama 14 tahun di Amerika Serikat (1976 – 1989)
HTTR	HTGR 30 MWth Jepang, mencapai kritikalitas tahun 1998
HTR-10	HTGR 10 MWth Cina, mencapai kritikalitas tahun 2000
HTR-Modul	Reaktor <i>pebble bed modular</i> 100 MWe yang didesain oleh Siemen/Interatom Jerman, mendapat lisensi tahun 1989 dan tidak jadi dibangun.
HTR-100	Reaktor <i>pebble bed modular</i> 100 MWe yang didesain oleh HRB/BBC Jerman, tidak ada data kegiatan desain.
GT-MHR	HTGR 300 MWe (kerjasama antara Amerika Serikat dengan Rusia), status saat ini dalam tahap <i>basic design</i> , diharapkan konstruksi awal 2006 dan beroperasi 2010 di Rusia.

PBMR merupakan PLTN maju generasi baru berdaya kecil, desain modular, efisiensi tinggi, waktu pembangunan relatif pendek. Reaktor ini dirancang untuk pembangkit listrik maupun desalinasi. Sistem keselamatan yang digunakan adalah sistem keselamatan pasif dan inherent. Reaktor ini didasarkan pada teknologi reaktor temperatur tinggi THTR dengan beberapa perubahan, seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perubahan teknologi pada PBMR[1,4]

	THTR Jerman	PBMR Afrika Selatan
Daya	300 MWe	100 – 110 MWe
Diameter Teras	5 m	3,7 m
Bejana Tekan	Beton	Baja
Sistem Keselamatan	Aktif	Pasif
Bahan Bakar	BISO ( <i>bi-coated</i> )	TRISO ( <i>tri-coated</i> )

Sistem daya utama PBMR terdiri dari 2 bagian utama, yaitu teras reaktor (energi termal dibangkitkan oleh reaksi nuklir) dan unit konversi daya (energi termal dikonversi menjadi energi mekanik dan kemudian menjadi energi listrik).

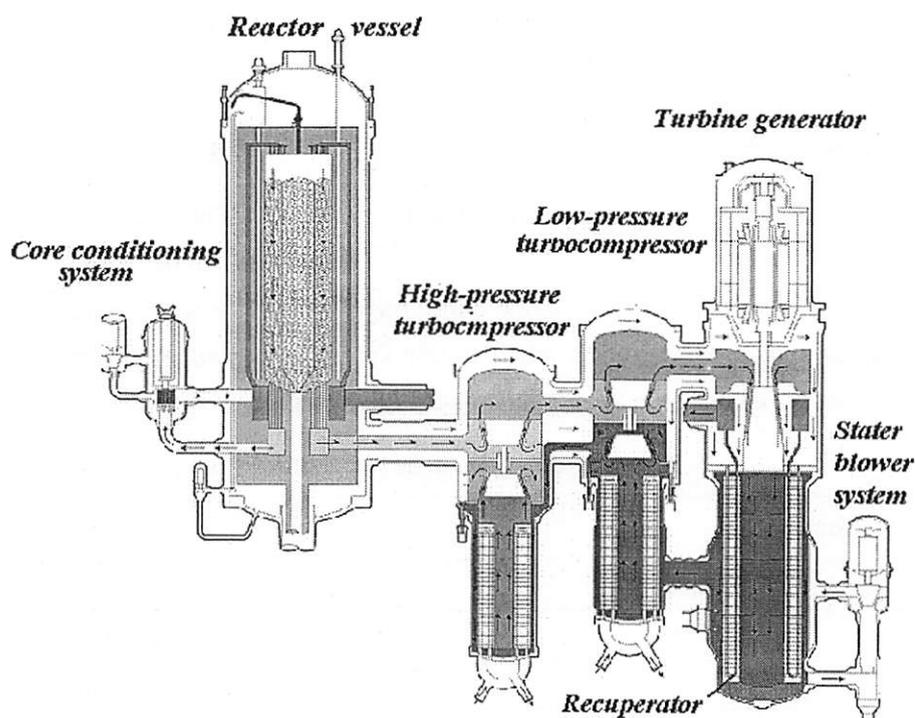
Tabel 3. Karakteristik desain PBMR[1,5]

Nama Reaktor	PBMR	
Perancang	ESKOM	
Tipe	Berpendingin Gas	
Daya	230 MWth/110 MWe	
Tekanan operasi	± 8,4 MPa	
Teras reaktor	tinggi	9 m
	diameter	3,7 m
Ukuran bejana reaktor	25 x 7,3 m	
Tipe bahan bakar	UO <sub>2</sub> atau MOx	
Pengkayaan bahan bakar	8-10 %	
Frekwensi pergantian bahan bakar	On-line	
Konversi daya	Turbin gas He	
Temperatur masuk teras (core inlet temperature)	± 500 °C	
Temperatur keluar teras (core outlet temperature)	± 900 °C	

Reaktor ini terdiri dari bejana tekan (*pressure vessel*) berdiameter 7,3 m dan tinggi 25 meter terbuat dari baja, kemudian dikungkung dengan bangunan beton yang

tingginya 48 m, dan setengah dari tinggi bangunan berada di bawah tanah. Bejana tekan dilapisi dengan lapisan grafit. Lapisan grafit ini berfungsi sebagai reflektor terluar untuk neutron yang dibangkitkan oleh reaksi nuklir dan juga berfungsi sebagai medium transfer panas pasif. Karakteristik desain PBMR ditunjukkan pada Tabel 3.

Teras PBMR berdiameter 3,7 m dan tinggi 9 m. Teras terdiri dari 2 zona, zona terdalam berisi kira-kira 150.000 bola grafit yang berfungsi sebagai moderator neutron, dan zona terluar (*annulus*) berisi kira-kira 380.000 bola bahan bakar. PBMR berbahan bakar  $UO_2$  yang diperkaya hingga 8 – 10%, dan berbentuk bola dengan diameter 60 mm, terdiri dari *coated particle* yang terbuat dari karbon dan SiC (*silicon carbide*), serta dibungkus dengan matrik karbon[1].



Gambar 1. Desain Pebble Bed[2].

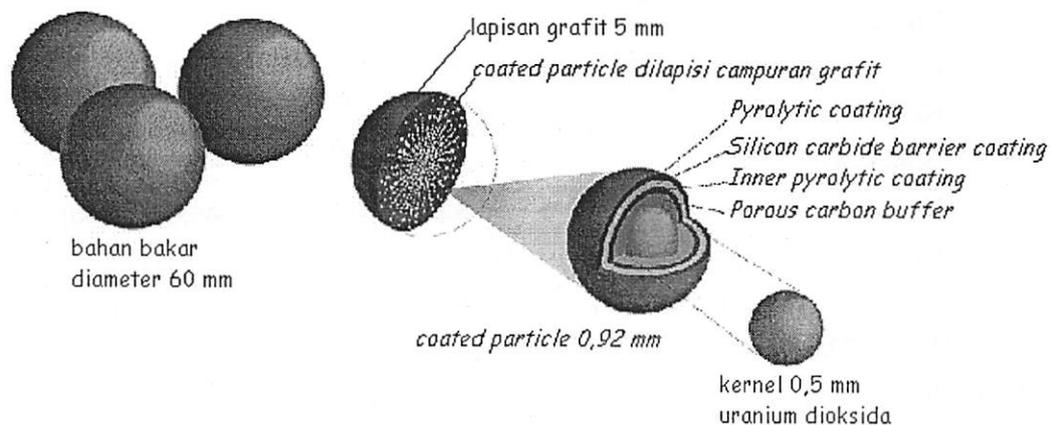
Gas He digunakan juga sebagai fluida kerja dalam unit konversi daya, karena PBMR menggunakan siklus langsung (*direct cycle*) yang didasarkan pada siklus Brayton termondinamik (turbin gas)[3]. Gas He masuk ke reaktor dengan temperatur kira-kira  $500^{\circ}C$  dan tekanan kira-kira 8,4 MPa, dan bergerak ke bawah antara bola bahan bakar panas. Gas menyerap panas dari bahan bakar dari hasil reaksi nuklir. Temperatur gas saat meninggalkan reaktor kira-kira  $900^{\circ}C$ , masuk ke turbin tekanan tinggi yang akan menggerakkan kompresor tekanan tinggi, selanjutnya masuk ke turbin tekanan rendah. Gambar 1 menunjukkan tampang lintang aliran fluida dalam reaktor.

### III. KONSEP KESELAMATAN

PBMR didasarkan pada desain sederhana, dengan sistem keselamatan pasif yang tidak membutuhkan intervensi manusia, dan juga menggunakan keselamatan *inherent*[5]. Keselamatan *inherent* dijamin berfungsi dengan baik pada PBMR dengan melakukan rekayasa maju pada bahan bakar, moderator, material struktur, pendingin, kerapatan daya, dan bejana tekan[1,4].

Umumnya, kecelakaan nuklir disebabkan daya sisa (*residual power*) yang dihasilkan oleh bahan bakar setelah terjadi reaksi berantai. Pada reaktor nuklir konvensional, pelepasan panas (*heat removal*) dicapai dengan sistem pendinginan aktif dan mengandalkan keberadaan fluida (air) untuk transfer panas. Potensi kegagalan sistem ini cukup besar, sehingga diperlukan pengamanan tambahan.

Bahan bakar yang digunakan adalah *TRISO* (*Triple-coated Isotropic*) *coated particle*. Partikel-partikel bahan bakar (fuel kernel) dilapisi dengan *silicon carbide*, seperti terlihat pada Gambar 2. Keuntungan dari bahan bakar *coated particle* adalah dapat mencegah pelepasan radioaktif (mengungkung produk fisi) dari dalam kernel bahan bakar, dan dapat mempertahankan koefisien temperaturnya tetap berharga negatif. Dalam keadaan operasi normal, efek ini akan menstabilkan reaksi nuklir secara otomatis. Misalnya, pada saat aliran pendingin utama hilang, temperatur bahan bakar akan meningkat drastis sehingga pelepasan panas (*heat removal*) tidak mencukupi.



Gambar 2. Tampang lintang bahan bakar *Pebble Bed*[2,6]

Reaktor ini menggunakan grafit sebagai moderator, karena grafit masih stabil pada temperatur  $2800^{\circ}\text{C}$ , jauh lebih tinggi daripada temperatur maksimum  $1200^{\circ}\text{C}$  pada operasi normal. Grafit mempunyai konduktivitas panas sangat baik, dan dapat menahan panas hingga  $1600^{\circ}\text{C}$  selama terjadi kehilangan pendinginan paksa dalam teras (*depressurized Loss of Forced Cooling*).

Pendingin yang digunakan adalah gas He, yang mana gas ini merupakan gas inert (tidak bereaksi dengan material grafit atau komponen-komponen teras yang

terbuat dari metal), tidak mudah terbakar dan kemungkinan menjadi radioaktif sangat kecil karenaampang lintang absorpsi neutronnya sangat kecil, dan merupakan fluida yang sangat efektif [1,2,3].

Teras reaktor PBMR mempunyai kerapatan daya sangat kecil bila dibandingkan dengan reaktor lain ( $\pm 1/30$  dari kerapatan daya PWR)[1]. Teras mempunyai transfer panas amat baik, ini menjamin bahwa temperatur maksimum yang dapat dicapai tidak melebihi 1600°C selama terjadi kehilangan pendinginan paksa dalam teras.

#### IV. PROSPEK REAKTOR PBMR

Umumnya, biaya pembangkitan pembangkit listrik daya kecil lebih tinggi dibandingkan dengan pembangkit listrik daya besar. Hal ini disebabkan dana yang dikeluarkan untuk penelitian, rekayasa, studi kelayakan, dan lain-lain hampir sama besar. Demikian halnya dengan PLTN daya kecil sistem modul bila hanya dibangun dengan modul tunggal. Reaktor PBMR merupakan reaktor sistem modul yang didesain dengan berbagai kelebihan sehingga dapat berkompetisi dengan pembangkit daya besar jika dibangun sebanyak  $n$  modul. Faktor-faktor utama yang dapat mengurangi biaya total pada desain PBMR[1,3,7] :

- Desain sederhana dengan jumlah komponen sedikit
- Umur reaktor panjang (40 tahun)
- Biaya operasi dan perawatan (*operation & maintenance*) kecil
- Waktu konstruksi pendek (kurang dari 2 tahun)
- Faktor ketersediaan (*availability factor*) tinggi (95%)
- Resiko investasi kecil
- Limbah lebih sedikit
- Mudah disesuaikan dengan penawaran & permintaan (*supply & demand*)
- Mudah disesuaikan dengan infrastruktur yang ada (biaya transmisi kecil)

Dari hasil studi yang dilakukan oleh ESKOM, biaya modal untuk satu modul sebesar US\$ 1300/kWe dan biaya pembangkitan kira-kira US\$ 3/kWh. Biaya modal akan berkurang menjadi US\$ 1004/kWe bila dibangun 10 modul dalam satu lokasi dan biaya pembangkitan kira-kira US\$ 2,63/kWh. Biaya pembangkitan untuk reaktor PBMR lebih ekonomis dibandingkan dengan biaya pembangkitan reaktor AP-600 dan AP-1000 untuk jumlah daya yang sama, seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Sedangkan Tabel 5 menunjukkan beberapa perbandingan biaya pembangkitan untuk proyeksi tahun 2005 – 2010, dengan asumsi sebagai berikut *discount rate* 5%, waktu hidup 30 tahun dan *load factor* 75%.

Tabel 4. Biaya Pembangkitan AP-600, AP-1000 , PBMR dan perinciannya[5].

	AP-600 2 x 600	AP-1000 1 x 1090	PBMR 10x 110
Capital	2,6 ¢US /kWh	1,8 ¢US /kWh	1,7 ¢US /kWh
O & M	0,8 ¢US /kWh	0,55 ¢US /kWh	0,3 ¢US /kWh
Bahan Bakar	0,6 ¢US /kWh	0,6 ¢US /kWh	0,47 ¢US /kWh
Decommisioning	0,1 ¢US /kWh	0,1 ¢US /kWh	0,1 ¢US /kWh
Total	4,1 ¢US /kWh	3,05 ¢US /kWh	2,63 ¢US /kWh

Tabel 5. Proyeksi biaya pembangkitan tahun 2005-2010 beberapa negara [8]

	Nuklir (¢US/kWh)	Batubara (¢US/kWh)	Gas (¢US/kWh)
Perancis	3,22	4,64	4,74
Rusia	2,69	4,63	3,54
Jepang	5,75	5,58	7,91
Korea	3,07	3,44	4,25
Spain	4,10	4,22	4,79
Amerika Serikat	3,33	2,48	2,71
Kanada	2,96	2,96	3,00
Cina	3,08	3,18	-

## V. PEMBAHASAN

Desain PBMR dikembangkan berdasarkan prinsip-prinsip operasi dan perbaikan yang sangat sederhana, keselamatan tinggi, mudah diinspeksi, waktu pembangunan relatif pendek, faktor ketersediaan sangat tinggi dan biaya investasi kecil.

PBMR merupakan reaktor sistem modul, yang daya total dapat ditingkatkan hingga 1000 MWe dengan membangun 10 modul dan hanya menggunakan sebuah ruang kendali. Pembangunan modul berikut dapat disesuaikan dengan kondisi dan permintaan pasar pengguna, sehingga resiko pembiayaan dapat ditekan sekecil mungkin. Daya pembangkitan yang kecil (100 – 110 MWe) akan dengan mudah disesuaikan dengan infrastruktur yang ada, sehingga biaya untuk transmisi menjadi lebih kecil.

Sistem modularisasi, standarisasi dan produksi massal dari komponen-komponen yang sejenis untuk sejumlah modul berkontribusi mengurangi total biaya dibandingkan dengan hanya mengoperasikan modul tunggal. Dari pengalaman pembangunan PLTN di Perancis dan Korea Selatan menyimpulkan bahwa standarisasi pembangunan akan dapat mengurangi biaya pembangkitan. Biaya pembangkitan untuk PLTN pertama umumnya lebih besar 15 – 55% daripada PLTN berikutnya, tergantung jenis dan lokasinya. Di Perancis, biaya pembangkitan akan berkurang rata-rata 10% bila dibangun 8 unit PLTN sejenis. Sementara di Korea Selatan, biaya pembangkitan (*generation cost*) akan berkurang di atas 15% bila dibangun 6 PLTN sejenis[9].

Faktor-faktor yang mempengaruhi pengurangan biaya dan resiko proyek adalah waktu konstruksi yang pendek akan mengurangi biaya tenaga kerja, biaya membayar bunga modal, dan lain-lain. Faktor ketersediaan tinggi (90 - 95%) akan meningkatkan pendapatan (*revenue*). Berdasarkan studi yang telah dilakukan oleh ESKOM Afrika Selatan biaya modal yang dibutuhkan \$US 1.300/kWe untuk modul tunggal dan US\$ 1004/kWe bila dibangun 10 modul dalam satu lokasi, dengan demikian biaya modal akan berkurang kira-kira \$US 300/kWe.

Dari segi teknologi dan biaya pembangkitan yang ditawarkan, PBMR sangat kompetitif bila dibandingkan dengan jenis-jenis pembangkit lainnya, teknologi reaktor ini mempunyai beberapa kelemahan, yaitu:

- pengalaman operasi reaktor jenis temperatur tinggi yang sangat minim
- sumber daya manusia untuk operasi dan perbaikan masih minim
- PBMR merupakan rancangan pertama pihak ESKOM akan mengurangi kepercayaan pengguna terutama negara yang belum pernah mengoperasikan reaktor nuklir untuk pembangkit listrik.
- perusahaan ESKOM belum berpengalaman dalam pengoperasian reaktor temperatur tinggi (PBMR)

Kelemahan pada teknologi yang banyak dikhawatirkan selama ini telah dapat diatasi dengan menggunakan *magnetic coil* di sekitar gagang pemutar (*rotating shaft*) sehingga kontak langsung tidak terjadi saat rotasi berlangsung. *Magnetic bearing* ini juga dilengkapi dengan sensor untuk menentukan lokasi pemutar dan microprocessor untuk menyesuaikan arus yang mengalir ke *electromagnetic coil*[10,11].

Faktor-faktor ini merupakan hambatan yang sangat menonjol untuk memilih PBMR untuk dibangun di suatu negara.

Ditinjau dari segi biaya pembangkitan, kondisi wilayah Indosensia yang terdiri dari pulau-pulau, dan populasi penduduk yang kurang merata, maka PBMR cukup cocok dibangun di Indonesia, tetapi masih perlu dicermati dan dikaji lebih mendalam baik segi teknologi maupun ekonominya.

## VI. KESIMPULAN

PBMR merupakan reaktor sistem modul yang didesain dengan berbagai kelebihan sehingga dapat berkompetisi dengan pembangkit daya besar jika dibangun sebanyak  $n$  modul (*NOAK, n-th of a kind*). Kondisi wilayah Indonesia yang terdiri dari pulau-pulau dengan populasi penduduk tidak merata khususnya di daerah-daerah tertentu, keterbatasan sumber pendanaan pemerintah untuk membangun pembangkit daya besar beserta jaringannya (interkoneksi), dan sistem transportasi yang kurang memadai untuk mendukung kelancaran suplai bahan bakar pembangkit daya berbahan bakar fosil akan membuka peluang pendayagunaan PBMR untuk mensuplai kebutuhan energi Indonesia di masa datang. Pembangunan PBMR berikutnya dapat dengan mudah disesuaikan dengan permintaan pasar. Perkembangan teknologi PBMR ini masih perlu dikaji dan dicermati lebih mendalam sebelum kita menentukan pilihan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. "Bacground to the PBMR",  
[http://www.pbmr.co.za/2\\_about\\_the\\_pbmr/2\\_8bacground\\_to\\_the\\_pbmr.htm](http://www.pbmr.co.za/2_about_the_pbmr/2_8bacground_to_the_pbmr.htm)
2. Jenny Weil, "Pebble Bed Design Returns",  
<http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/nov01/nreact.html#sb1>
3. "PBMR Detailed Feasibility Report", Public Version, September 2001.  
<http://www.ner.org.za/publications/erj/oct2000.pdf>
4. PBMR Predecessors", [http://www.pbmr.com/FAQs/pbmr\\_predecessors.htm](http://www.pbmr.com/FAQs/pbmr_predecessors.htm)
5. Institute for Public Policy of Rice University, "New Energy Technologies: A Policy Framework for Micro-Nuclear Technology",  
[http://www.rice.edu/projects/baker/Pubs/workingpapers/2001\\_nuclear/](http://www.rice.edu/projects/baker/Pubs/workingpapers/2001_nuclear/)
6. "What is the Pebble Bed Modular Reactor?", <http://www.ist.co.za/industrial/pbmr.asp>
7. EHUD GREENSPAN, NEIL BROWN, "Small Innovative Reactor Designs – Useful Attributes and Status of Technology",  
[http://www.rice.edu/projects/baker/Pubs/workingpapers/2001\\_nuclear/greenspan\\_brown.html](http://www.rice.edu/projects/baker/Pubs/workingpapers/2001_nuclear/greenspan_brown.html)
8. The Economics of Nuclear Power, July 2001, <http://www.uic.com.au/nip08.htm>
9. PETER WILMER, EVELYNE BERTEL;" Nuclear Power: a Competitive Option?" ,  
<http://www.world-nuclear.org/sym/1999/wilmer.htm>
10. Adams Engines: Concepts and Design Principles,  
<http://www.atomicengines.com/engines.html>
11. Future Pebble Bed Reactor Technology,  
[www.eskom.co.za/nuclear\\_energy/pebble\\_bed/pebble\\_bed.html](http://www.eskom.co.za/nuclear_energy/pebble_bed/pebble_bed.html)
12. <http://www.world-nuclear.org/sym/2003/pdf/matzie.pdf>
13. [http://pubs.acs.org/subscribe/journals/esthag-w/2006/jan/tech/cs\\_nuclearpower.html](http://pubs.acs.org/subscribe/journals/esthag-w/2006/jan/tech/cs_nuclearpower.html)