

STUDI INTERAKSI NEUTRONIK DAN HIDROLIKA TERMAL PADA REAKTOR AIR BERAT LANJUT DENGAN KONSEP MODERATOR GANDA (HWR-DM)

Andang Widi Harto

Staf pengajar pada Program Studi Teknik Nuklir, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

Muslim

Guru besar pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Gadjah Mada

Ferhat Aziz

Staf Peneliti pada Pusat Pengembangan Sistem Reaktor Maju, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Serpong

Arif Nurcahya

Mahasiswa S-1 pada Program Studi Teknik Nuklir, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

ABSTRAK

Rancangan reaktor nuklir PHWR-CANDU yang ada sekarang memiliki beberapa keunggulan antara lain : aspek keselamatan tinggi karena menggunakan bahan bakar dengan reaktivitas lebih rendah dengan digunakannya U-oksida alam, pemisahan D₂O sebagai moderator dan pendingin serta ekonomi neutron yang tinggi. Manfaatnya adalah diperolehnya perilaku ekskursi daya dengan periode panjang, moderator dingin yang dapat berfungsi sebagai penerima kalor untuk waktu yang cukup lama dan keluwesan dalam pemilihan jenis-jenis bahan bakar nuklir yang digunakan. Problem umpan balik positif PHWR-CANDU ini dicoba diatasi dengan menggunakan "konsep moderator ganda", yaitu konsep yang menggunakan sistem moderator utama yang ada di luar pipa calandria dan sistem moderator anulus yang ada pada ruang anulus. Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa desain ini tidak hanya dapat mencapai umpan balik daya lokal yang negatif, tetapi juga menjanjikan penyederhanaan dalam sistem pengaturan daya dengan kemungkinan menghilangkan peran batang-batang pengatur dan juga peningkatan aspek keselamatan dengan menambah kemungkinan dapat diterapkannya lebih dari satu sistem shutdown pasif. Pendidihan moderator anulus dapat digunakan untuk mengatur daya reaktor dan sekaligus juga untuk mengkompensasi munculnya reaktivitas lebih dari teras reaktor.

Kata kunci : PHWR-Candu, konsep moderator ganda

ABSTRACT

The existing CANDU-PHWR reactor has notable advantages over other types of reactors such as are, better safety performance because of the low excess reactivity by the use of natural U oxide, separated use of D₂O as a moderator and as a coolant, and better neutron economy. The result is the long period power excursion behavior, cool moderator that can act as a long term heat sink, and the flexibility in fuel choice option. The problem of positive feedback in the CANDU design is to be overcome by the use of the so called "dual moderator concept", in which two moderator systems are used, i.e. a main moderator system outside the calandria tube and an annular moderator system inside the annular space. Results of various calculations show that this configuration can achieve not only a negative local power feedback but also promises a greater simplicity in the power regulating system by the possibility of eliminating the use of adjuster rods and incorporating one or more passive shutdown systems. The boiling of annular moderator can also be used as a power regulating system as well as a core excess reactivity compensation system.

Keywords : PHWR-CANDU, dual moderator concept

PENDAHULUAN

Reaktor Nuklir CANDU (*Canadian Deuterium Uranium*) dirancang oleh AECL (*Atomic*

Energy of Canada Limited). Desain reaktor yang terkenal dengan pemanfaatan bahan bakar uranium alam ini memiliki kelebihan dan kekurangan dibanding dengan desain PLTN lainnya.

Keunggulan Desain Reaktor Nuklir CANDU

Desain reaktor CANDU yang ada sekarang memiliki berbagai keunggulan, antara lain :

1. menggunakan moderator D₂O dan bahan bakar uranium alam oksida;
2. menggunakan konsep "on power refueling";
3. memiliki daya spesifik relatif lebih rendah;
4. menggunakan moderator yang terpisah dari pendingin dan dapat dioperasikan pada suhu dan tekanan rendah (Bereznai, 1998);
5. moderator dapat berfungsi sebagai pembuang kalor (*heat sink*) dalam kasus LOCA untuk waktu yang cukup lama (Snell dan Webb, 1998);
6. batang kendali disisipkan pada moderator dingin dan bertekanan rendah;
7. fleksibel dalam penggunaan bahan bakar seperti : uranium alam, bahan bakar bekas BWR dan PWR, uranium berpengayaan rendah, MOX dan campuran uranium berpengayaan rendah dengan torium (Hedges dan Yu, 1998).

Rancangan reaktor CANDU sekarang memiliki dua sistem *shutdown* aktif (Bereznai, 1998). Sistem *shutdown* pertama menggunakan batang penyerap neutron sedangkan sistem *shutdown* kedua menggunakan sistem peninjeksi larutan penyerap neutron (Gd-nitrat) dalam D₂O ke moderator. Dengan demikian persyaratan *redundancy* (sistem berlapis) terpenuhi.

Kekurangan Desain PHWR-CANDU

Kekurangan desain CANDU ialah memiliki umpan balik positif, sistem *shutdown* aktif dan efisiensi termal rendah. Akibat pemisahan pendingin dan moderator, pendidihan pendingin akan mengeraskan spektrum neutron cepat pada saluran bahan bakar. Hal ini akan mengurangi serapan resonansi dan menambah fisi cepat sehingga meningkatkan laju reaksi fisi dan daya. Dengan mengupayakan tercapainya umpan balik daya yang negatif, faktor keselamatan yang lebih baik dapat diperoleh serta sistem kendali yang lebih sederhana dapat digunakan.

Kedua sistem *shutdown* yang telah diuraikan di atas masih menggunakan sistem aktif walaupun telah memenuhi syarat redundansi. Sistem aktif adalah masih berpeluang kegagalan.

Kelemahan ketiga desain reaktor CANDU sekarang adalah efisiensi termalnya rendah. Hal ini karena desain tersebut menggunakan pendingin air berat bertekanan yang suhunya harus dibatasi

berdasarkan tekanan yang mampu ditoleransi oleh sistem pendingin primernya.

Pemecahan Masalah

Kesulitan-kesulitan ini akan diatasi dengan konsep **moderator ganda**. Gagasan utama konsep ini adalah untuk membuat pendidihan moderator secara parsial pada saluran bahan bakar yang mengalami pemanasan berlebih dan menjaga pendidihan tetap berada pada tempat tersebut. Lebih jauh, pendidihan parsial ini dapat diatur untuk mengatur daya reaktor, memperoleh keseragaman distribusi daya secara radial, serta mengkompensasi daya lebih teras.

LATAR BELAKANG TEORETIS

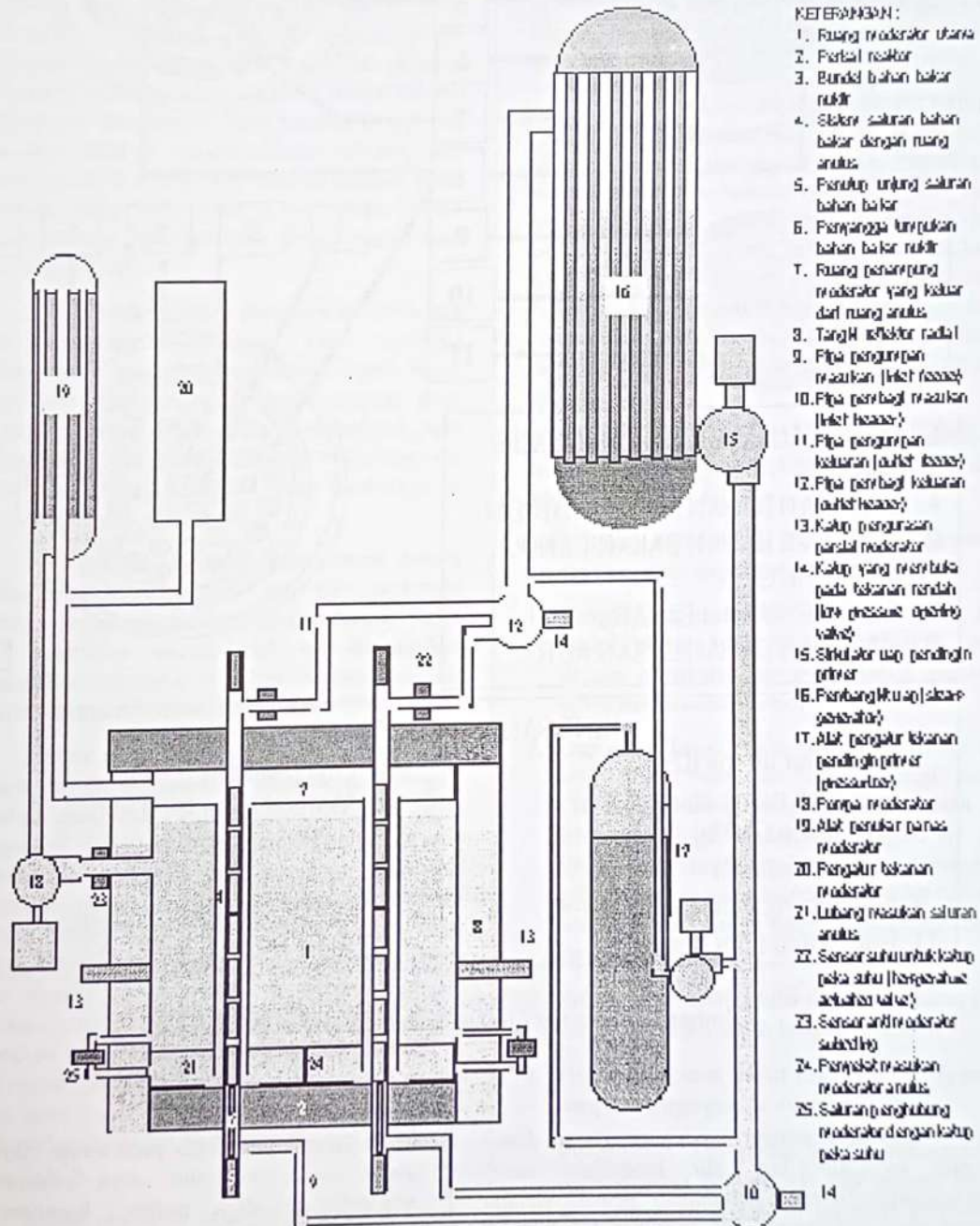
Konsep HWR lanjut yang dipelajari di sini memungkinkan penggunaan beberapa sistem *shutdown* pasif, ekonomi neutron yang lebih tinggi (karena tidak lagi menggunakan batang pengatur), penyederhanaan prosedur pengaturan daya serta kondisi agar moderator tetap mampu menjadi pelepas kalor saat kecelakaan. Gambar 1 menunjukkan skema reaktor dengan konsep moderator ganda sedangkan Gambar 2 menunjukkan tampang lintang reaktor dan salah satu saluran bahan bakarnya dibandingkan dengan saluran bahan bakar reaktor CANDU sekarang.

Pada konsep moderator ganda ini, diameter pipa calandria diperbesar sementara diameter pipa tekan dan jarak kisi antara saluran bahan bakar yang berdekatan dipertahankan sama dengan pada rancangan reaktor CANDU sekarang. Hasilnya adalah peningkatan volume ruang anulus serta pengurangan volume moderator utama. Pada ujung masukan saluran bahan bakar, dibuat lubang-lubang yang diatur ukurannya pada pipa calandria, sehingga D₂O dari ruang moderator utama dapat memasuki ruang anulus dan berfungsi sebagai moderator anulus. Reaktor juga dirancang untuk penggunaan D₂O sebagai reflektor neutron yang ditempatkan pada tangki reflektor radial. Reaktor hanya dapat mencapai kondisi kritis jika ruang moderator utama, ruang anulus dan tangki reflektor radial terisi D₂O. Selanjutnya, tingkat penguapan moderator anulus dapat diatur untuk mengatur kriticalitas reaktor.

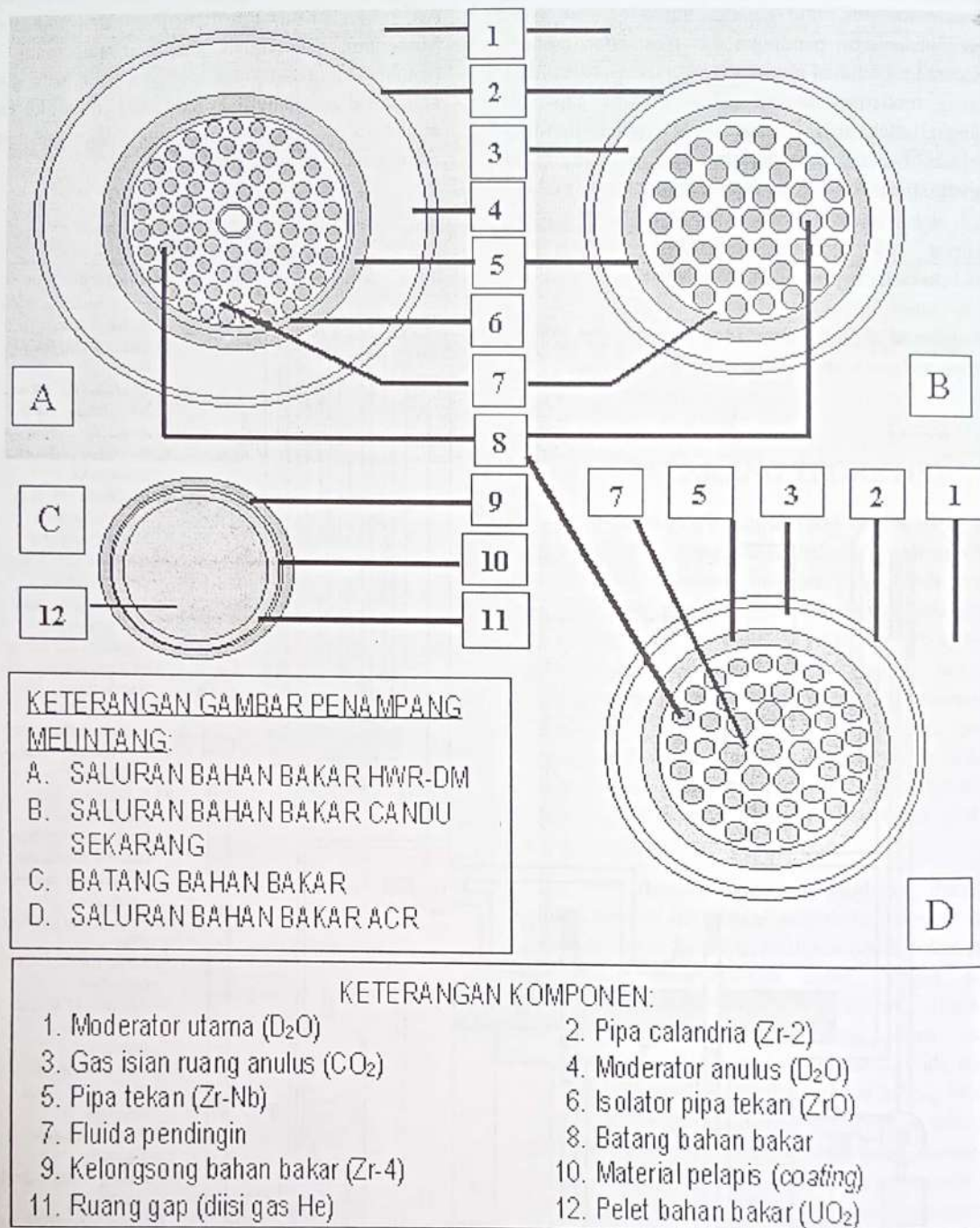
Sejumlah kecil kalor tetapi cukup akan dipindahkan dari pendingin ke moderator anulus melalui dinding pipa tekan. Jumlah kalor ini harus cukup, jumlah kalor yang terlalu besar akan meningkatkan tekanan sistem moderator, sementara jumlah kalor yang terlalu kecil membuat konsep ini kurang efektif.

Bagian dalam pipa tekan dilapisi dengan isolator keramik untuk mencegah perpindahan panas berlebihan dari pendingin ke moderator anulus. Secara keseluruhan moderator akan bersirkulasi dari ruang moderator utama dalam kondisi cair sub dingin, memasuki ruang anulus pada tiap-tiap saluran bahan bakar melalui lubang-lubang pada ujung pipa calandria kemudian keluar melalui

lubang-lubang pada ujung keluaran pipa calandria dalam kondisi dua fase (cair jenuh dan uap jenuh). Moderator selanjutnya dialirkan ke suatu alat penukar kalor sehingga menjadi cair sub dingin kembali dan selanjutnya dialirkan kembali ke ruang moderator utama. Sirkulasi ini dilakukan dengan menggunakan pompa moderator.



Gambar 1. Skema Reaktor HWR lanjut dengan Konsep Moderator Ganda



Gambar 2. Tampang Lintang Teras Reaktor HWR Lanjut.

Kapasitas pompa moderator dapat diatur untuk mengatur laju alir moderator untuk mendapatkan derajat pendidihan sesuai. Derajat pendidihan pada setiap saluran bahan bakar dapat ditentukan untuk mencapai distribusi pembangkitan daya yang lebih merata dengan menentukan ukuran lubang-lubang masukan pipa calandria untuk setiap saluran bahan bakar.

Derajat pendidihan pada semua saluran dapat diatur untuk mengatur daya reaktor. Untuk meningkatkan daya reaktor, kapasitas pompa moderator ditingkatkan. Hal ini akan mengurangi tingkat pendidihan moderator dalam ruang anulus sehingga reaktor menjadi superkritis dan dayanya naik. Kenaikan daya ini akan menambah derajat pendidihan sehingga akan mengurangi derajat

superkritis sampai tercapai kesetimbangan ($k = 1$) pada suatu tingkat daya yang lebih tinggi. Hal yang sebaliknya dilakukan untuk menurunkan daya reaktor. Maka, batang pengatur dapat dihilangkan, sehingga mengurangi serapan neutron dan meningkatkan ekonomi neutron.

Dalam kasus pemanasan berlebih pada suatu saluran bahan bakar, peningkatan suhu pendingin pada saluran itu akan meningkatkan transfer kalor ke moderator pada ruang anulus dari saluran yang bersangkutan sehingga derajat pendidihannya meningkat. Peningkatan derajat pendidihan ini akan mengurangi kemampuan moderasi di sekitar saluran itu sehingga menurunkan fluks neutron termal dan juga daya lokal di sekitar saluran tersebut. Jika pemanasan lebih terjadi pada seluruh reaktor, maka fenomena yang sama akan terjadi pada seluruh reaktor. Dengan demikian, akan dicapai umpan balik daya yang negatif.

Lebih lanjut, sistem pemompaan moderator dapat dirancang sedemikian rupa sehingga kemampuan pemompaan maksimum hanya dapat mengkritiskan reaktor pada suatu tingkat daya tertentu (misalnya 110 % daya nominalnya) pada kondisi bahan bakar baru. Dengan demikian daya tak terkendali melampaui tingkat yang disebutkan di atas dapat dicegah.

Selanjutnya, kegagalan pada sistem pompa moderator akan mereduksi laju alir moderator sehingga terjadi pendidihan dengan derajat tinggi pada moderator anulus. Hal ini menurunkan kemampuan moderasi sehingga reaktor menjadi subkritis dan akan padam (*shutdown*).

Sistem moderator dirancang untuk memiliki kemampuan *thermosyphoning* yaitu mengalir dengan sirkulasi alam ketika pompa mati, sehingga dapat mengambil kalor peluruhan setelah reaktor di-*shutdown* (dimatikan). Akan tetapi laju alir moderator akibat *thermosyphoning* ini hanya mampu mengkritiskan reaktor pada tingkat daya rendah. Kondisi kritis pada tingkat daya tinggi hanya dapat dicapai dengan pompa moderator. Dengan demikian, sistem pemompaan moderator dapat digunakan sebagai sistem *shutdown* yang pertama, yang dapat beroperasi secara pasif dengan suatu saklar daya listrik sistem pemompaan yang dipicu untuk padam (*off*) oleh penurunan tekanan pendingin akibat LOCA.

Sistem *shutdown* kedua menggunakan katup pelepas tekanan pada pengatur tekanan moderator. Jika derajat pendidihan moderator amat tinggi (menandakan teras dalam kondisi sangat

overheating), tekanan moderator akan naik. Katup pelepas tekanan akan membuka sehingga jumlah moderator akan berkurang dan reaktor menjadi subkritis.

Sistem *shutdown* ini menggantikan sistem *shutdown* aktif yang menggunakan batang penyerap neutron yang terdapat pada desain CANDU sekarang. Sistem *shutdown* kedua dan ketiga yang relatif sederhana ini dapat menggantikan sistem *shutdown* aktif yang bekerja berdasarkan injeksi larutan penyerap neutron pada reaktor CANDU sekarang.

Potensi ekskursi daya pada desain ini adalah jika terjadi moderator *overcooling*. Kondisi bisa timbul akibat kenaikan beban pendinginan moderator. Hal ini sebenarnya sulit terjadi, karena kegagalan sistem pendinginan moderator justru menimbulkan *overheating*. Tetapi jika terjadi, hal ini diatasi dengan sistem anti moderator *overcooling*. Sistem ini bekerja pasif dengan menggunakan saklar bimetal yang akan *switch off* pompa moderator jika suhu masukan moderator turun di bawah level tertentu.

Data-data spesifikasi desain HWR-DM dibandingkan dengan CANDU 6 dan ACR dapat dilihat pada Tabel 1.

Pada konsep ini, dipergunakan pendingin berupa uap panas lanjut dengan alasan :

1. Dengan uap panas lanjut, umpan balik daya positif akibat void dapat dihilangkan, sebab dengan pemakaian uap panas lanjut, pendingin selalu dalam kondisi void.
2. Uap panas lanjut dapat dioperasikan pada suhu lebih tinggi daripada suhu operasi reaktor CANDU sekarang, tetapi dengan tekanan jauh lebih rendah dibandingkan dengan air pada tekanan superkritis untuk mencapai peningkatan suhu yang sama. Dengan diperoleh efisiensi konversi lebih tinggi tanpa penambahan berarti dari tebal pipa tekan.
3. Sifat-sifat termodinamika dan perpindahan panas uap panas lanjut sudah banyak diketahui.
4. Harga uap panas lanjut (air, H₂O) lebih rendah daripada harga gas He maupun D₂O.
5. Penggunaan uap panas lanjut memungkinkan digunakannya pembangkit uap dengan tekanan sisi primer lebih rendah daripada tekanan sisi sekunder, sehingga pada kebocoran pipa, yang terjadi bukan lolosnya pendingin primer yang ke sisi sekunder, tetapi sebaliknya.

Tabel I. Data-data desain reaktor HWR-DM, CANDU-6 dan ACR.

Komponen reaktor		HWR-DM	ACR	CANDU-6
Teras reaktor keseluruhan	Daya termal (MWth)	1187	2100	2151
	Daya listrik keluaran netto (MWe)	470	700	630
	Efisiensi termal (%)	39,5	33,3	32,0
	Diameter aktif (m)	6,3	4,6	6,6
	Panjang aktif (m)	5,0	6,0	6,0
	Jumlah saluran bahan bakar	344	380	380
	Jarak kisi saluran bahan bakar (cm)	30	21	30
	Susunan kisi saluran bahan bakar	persegi	persegi	persegi
	Tebal reflektor radial (m)	1,0	0,5	0,5
	Material reflektor radial	D ₂ O	D ₂ O	D ₂ O
	Burn up rerata (MW hari / ton U)	16000	24000	8000
	Kebutuhan U-alam (ton/GW tahun)	119,5	159,8	145,6
Batang bahan bakar	Material pelet bahan bakar	UO ₂	UO ₂	UO ₂
	Diameter pelet bahan bakar (mm)	7,50	9,0 (A); 10,8 (B)	10,82
	Material kelongsong (<i>sheath</i>)	Zr-4	Zr-4	Zr-4
	Tebal kelongsong (mm)	0,4	0,38	0,38
	Tebal ruang gap (mm)	0,1	0,1	0,1
	Pengkayaan U ²³⁵ awal (%)	1,20	2,00	0,71
	Kandungan U ²³⁵ keluar reaktor (%)	0,20	0,23	0,23
	Kandungan Pu fisil keluar (%)	0,32	0,27	0,27
Bundel bahan bakar	Jumlah batang per bundel	72 +1 tie rod	43 (35A+8B)	37
	Diameter luar bundel (mm)	102,5	102,5	102,5
	Panjang bundel (mm)	495,0	495,0	495,0
Saluran bahan bakar	Diameter dalam (mm)	103,4	103,4	103,4
	Tebal isolator pipa tekan (mm)	4,15	-	-
	Material isolator pipa tekan	ZrO	-	-
	Tebal pipa tekan (mm)	4,80	4,16	4,16
	Material pipa tekan	Zr-Nb	Zr-Nb	Zr-Nb
	Tebal ruang anulus (mm)	29,0	10	10
	Material pengisi ruang anulus	D ₂ O	CO ₂	CO ₂
	Material pipa calandria	Zr-2	Zr-2	Zr-2
	Tebal pipa calandria (mm)	2,0	2,0	2,0
	Jumlah bundel per saluran	10	12	12
	Orientasi saluran bahan bakar	Vertikal	Horizontal	Horizontal
Pendingin	Material	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O
	Kondisi operasi	superheat	subcooled	subcooled
	Suhu pada header masukan (°C)	387,0	266,5	266,5
	Suhu pada header keluaran (°C)	522,8	325,0	310,0
	Tekanan header masukan (bar)	135,0	117,0	117,0
	Tekanan header keluaran (bar)	123,0	100,0	100,0
	Laju alir massa per saluran (kg/det)	7,10	24,0	24,0
Moderator	Material	D ₂ O	D ₂ O	D ₂ O
	Suhu masuk ke calandria (°C)	121,5 (cair)	43,3 (cair)	43,3 (cair)
	Suhu keluar dari calandria (°C)	134,3 (2 fasa)	71,0 (cair)	71,0 (cair)
	Tekanan masukan (bar)	3,60	atmosferik	atmosferik
	Tekanan keluaran (bar)	3,40	atmosferik	atmosferik

HASIL DAN PEMBAHASAN

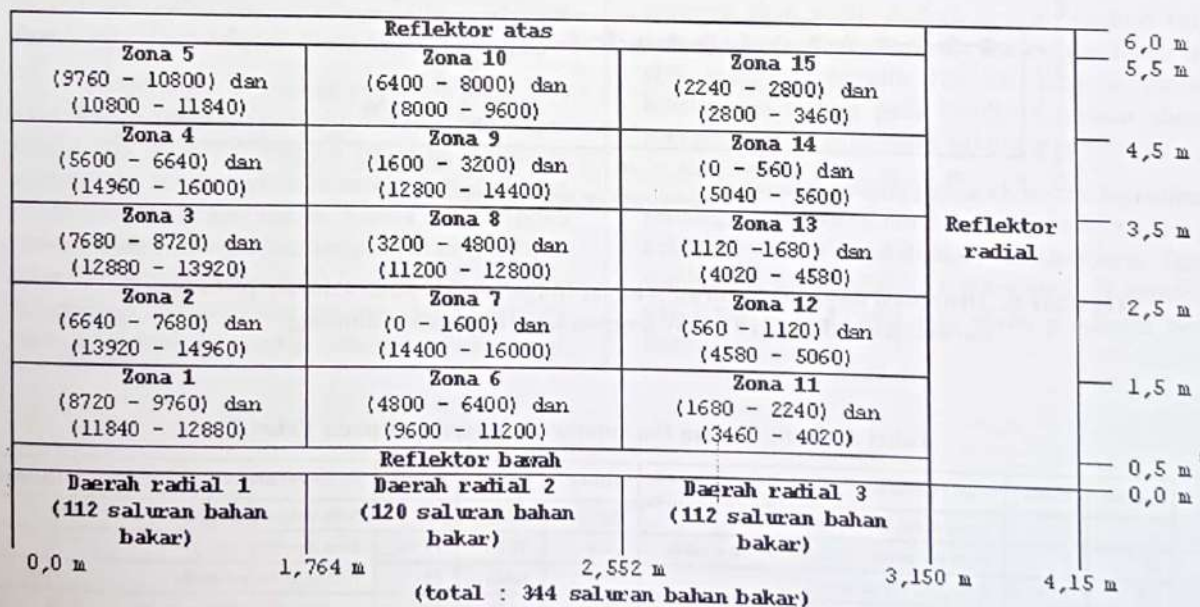
Kondisi Operasi Normal

Dengan peningkatan ekonomi neutron akibat dihilangkannya batang pengatur, dimungkinkan untuk mengoperasikan teras reaktor dengan discharge bahan bakar (*spent fuel*) menjadi berkadungan U^{235} sangat rendah. Perhitungan neutronik dengan program DUALMOD sub program CRITICAL menunjukkan bahwa reaktor dapat mencapai *burn up* 16000 MWd/ton U dengan pengkayaan awal 1,2 % pada teras setimbang. Sub program CRITICAL telah diverifikasi dengan program SRAC dan berselisih 5 % dalam perhitungan kritikalitas. Nilai *burn up* tersebut mencapai dua kali *burn up* CANDU sekarang (8000 MWd/ton U). Dengan kenaikan *burn up* ini, disamping penghematan bahan bakar, maka kandungan aktinida dan hasil fisi berumur paruh panjang sangat rendah. Maka, desain ini diharapkan akan memenuhi persyaratan non proliferasi serta menghasilkan limbah bahan bakar nuklir yang lebih bersih.

Pada desain ini, pengisian bahan bakar hanya dari satu sisi, yaitu sisi atas teras, teras dibagi menjadi 3 daerah radial, dan masing-masing daerah dibagi menjadi 5 zona aksial. Bahan bakar diisikan pada daerah radial 2 dan 3. Bahan bakar pada daerah

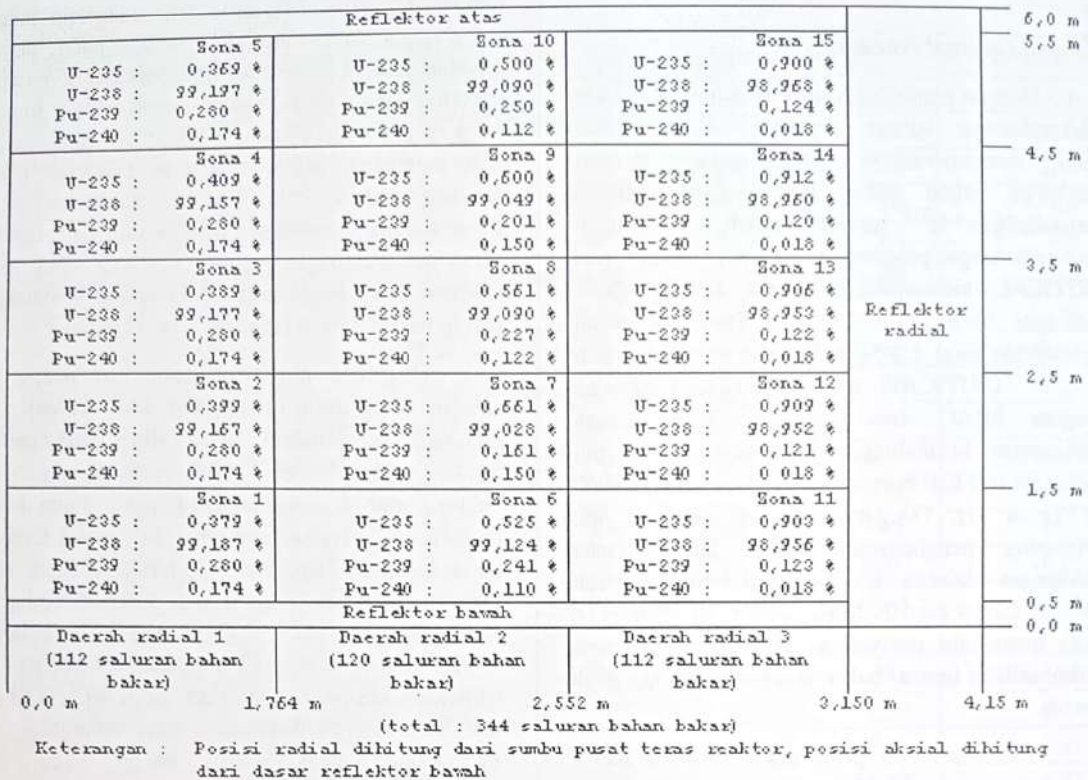
2 akan tetap pada daerah tersebut hingga *burn up* maksimal (16000 MWd/ton U), sedangkan bahan bakar pada daerah radial 3 berada pada daerah tersebut sampai kurang lebih mencapai 1/3 *burn up* maksimal dan dipindahkan ke daerah radial 1 hingga *burn up* maksimal (16000 MWd/ton U). Pada setiap kali pengisian, selalu dilakukan penataan ulang susunan bahan bakar secara aksial sehingga diperoleh pembangkitan panas aksial yang hampir seragam. Pembagian zona reaktor, serta peta susunan bakar berdasarkan *burn up* dan kandungan isotop terdapat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Distribusi radial pembangkitan panas per saluran untuk daya 1187 MWth (460 MWe) pada kondisi racun setimbang dapat dilihat pada Gambar 5. Dari gambar ini, terlihat bahwa distribusi tersebut cukup merata. Kondisi saluran terpanas dapat dilihat pada Tabel 3. Nama variabel pada Tabel 3 terdapat pada Tabel 2. Dari Tabel 3, terlihat bahwa suhu maksimum bahan bakar adalah 1389 °C (dibawah titik leleh, yaitu 2845 °C (Weisman, 1977, halaman 450)), suhu maksimum kelongsong adalah 614 °C (dibawah suhu perubahan fasa, yaitu 862 °C (Tong dan Weisman, 1970, halaman 67)) sedangkan suhu maksimum kontak antara bahan bakar dan kelongsong adalah 633 °C (di bawah suhu awal interaksi yaitu 675 °C (Tong dan Weisman, 1970, halaman 68)).

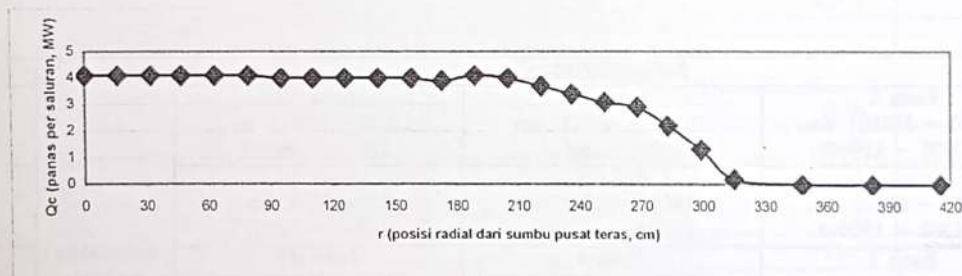


Keterangan : Posisi radial dihitung dari sumbu pusat teras reaktor
 Posisi aksial dihitung dari dasar reflektor bawah

Gambar 3. Peta susunan bahan bakar berdasarkan *burn up* (MWhari / ton U) pada teras reaktor.



Gambar 4. Peta komposisi (fraksi mol) isotop bahan bakar pada teras reaktor.



Gambar 5. Distribusi daya per saluran sebagai fungsi posisi radial saluran, pada operasi normal pada daya 1187 MW dengan kondisi racun setimbang.

Tabel 2. Daftar nama Parameter yang terdapat pada Tabel 3.

Simbol	Kolom	Nama Parameter	Satuan	Simbol	Kolom	Nama Parameter	Satuan
z	1	Posisi aksial dari masukan	cm	TIP	16	Suhu isolator pipa tekan	°C
Q'''	2	Daya per satuan volume bahan bakar nuklir	kW/l	TPT	17	Suhu pipa tekan	°C
TF	3-9	Suhu pelet bahan bakar	°C	HAM	18	Entalpi moderator anulus	kJ/kg
TS	10	Suhu kelongsong bahan bakar	°C	xAM	19	Kualitas uap moderator anulus	%
HC	11	Entalpi fluida pendingin	kJ/kg	AAM	20	Fraksi volume uap moderator anulus	%
XC	12	Kualitas (fraksi massa) uap pendingin	%	TAM	21	Suhu moderator anulus	°C
AC	13	Fraksi volume uap pendingin	%	Rho	22	Densitas moderator anulus	kg m ⁻³
TC	14	Suhu fluida pendingin	°C	TIC	23	Suhu pipa calandria	°C
Rho	15	Densitas fluida pendingin	kg m ⁻³	TCT	24	Suhu pipa calandria	°C

Tabel 3. Kondisi operasi saluran terpanas pada operasi normal pada daya 1187 MW dengan kondisi racun setimbang berdasarkan perhitungan dengan sub program ALLCHAN.

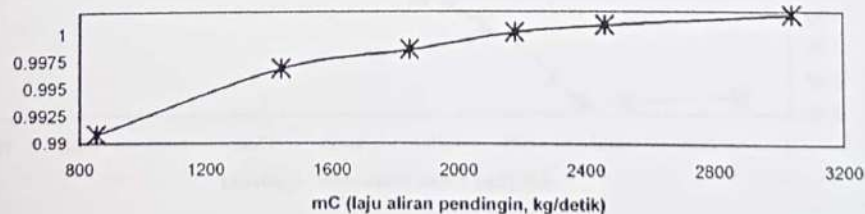
		Time (second) : 60.0000	
Radial position (none) index	:	11	Inner none radius from axes (m) : 1.7325
Outer none radius from axes (m)	:	1.8900	coolant flow rate (kg/s) : 7.2458
annular moderator flow rate(kg/s)	:	2.6691	inlet coolant pressure (bar) : 135.0000
outlet coolant pressure (bar)	:	117.5000	inlet moderator pressure (bar) : 2.6000
outlet moderator pressure (bar)	:	3.1000	inlet moderator temperature (°C) : 121.5061
average main mod.temperature (°C)	:	126.0272	T&W gas temperature (°C) : 565.2749
main moderator density (kg/m³)	:	954.5918	heat generated by all fuel (MW) : 4197.0470
heat generated in moderator (MW)	:	104.3262	heat of frict. and expansion (MW) : 122.9034
heat absorbed by coolant (MW)	:	3721.3553	heat absorbed by ann. mod. (MW) : 256.0735
heat absorbed by main mod. (MW)	:	102.4663	heat absorbed by moderator (MW) : 261.0404
Error of heat balance calc. (MW)	:	342.5654	inlet an.mod. enthalpi (kJ/kg) : 536.5776
ρ cm			
q kW/l			
600	0	565	565
582	0	566	566
567	0	567	567
550	0	567	567
525	42	623	643
500	88	682	728
475	135	745	813
450	182	809	915
425	230	873	1012
400	275	932	1107
375	317	988	1196
350	353	1034	1273
325	384	1069	1334
300	407	1091	1374
275	420	1096	1383
250	423	1083	1377
225	415	1051	1335
200	394	1009	1273
175	360	927	1157
150	313	827	1024
125	252	724	874
100	180	626	716
75	95	501	543
50	0	383	383
25	0	384	384
17	0	384	384
0	0	387	387

Pengaruh Pengurangan Laju Aliran Pendingin Terhadap K Pada Daya Normal

Pengurangan laju aliran pendingin pada daya tetap akan meningkatkan entalpi dan suhu pendingin, suhu bahan bakar dan transfer panas ke moderator anulus yang selanjutnya akan meningkatkan derajat pendidihan moderator anulus. Semua hal ini secara sinergis akan meningkatkan tampang lintang serapan neutron epitermal (resonansi) dengan efek Doppler, mengurangi efek moderasi dan menggeser spektrum neutron termal ke energi neutron lebih tinggi,

sehingga akan meningkatkan serapan neutron epitermal, menurunkan kekritisan reaktor dan memberi efek reaktifitas negatif. Hal ini akan menjamin keselamatan reaktor pada kondisi sumbatan aliran atau penurunan kemampuan sirkulator pendingin.

Hasil perhitungan pengaruh variasi laju aliran pendingin pada daya normal (1187 MW) terhadap kekritisan reaktor dapat dilihat pada Gambar 6. Dari gambar ini, terlihat bahwa reaktor menjadi semakin sub kritis ($k < 1$) jika laju aliran pendingin berkurang.



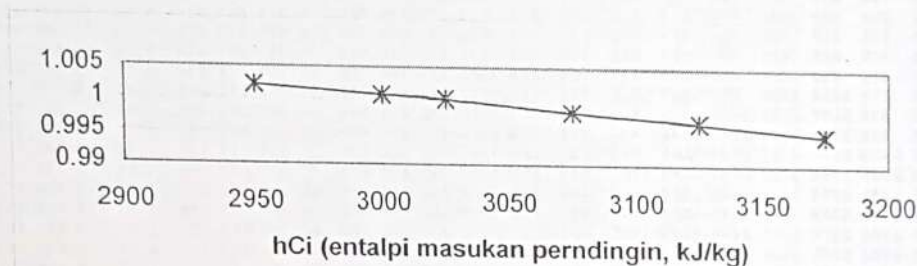
Gambar 6. Hubungan kekritisan reaktor terhadap laju aliran pendingin pada daya normal (1187 MW) dengan racun setimbang.

Pengaruh Kenaikan Entalpi Masukan Pendingin Terhadap Kekritisitan

Kenaikan entalpi masukan pendingin pada laju aliran dan daya tetap akan meningkatkan suhu pendingin, suhu bahan bakar dan transfer panas ke moderator anulus yang selanjutnya akan meningkatkan derajat pendidihan moderator anulus. Seperti pada uraian sebelumnya, hal ini akan meningkatkan serapan neutron epitermal, menurunkan kekritisitan reaktor dan memberi efek reaktifitas negatif. Hal ini akan menjamin keselamatan reaktor pada kondisi gangguan pada sistem pengambilan panas, misalnya

gangguan pada generator uap yang menyebabkan kemampuan pengambilan panas dari teras reaktor berkurang.

Hasil perhitungan pengaruh variasi entalpi masukan pendingin pada daya normal (1187 MW) terhadap kekritisitan reaktor dapat dilihat pada Gambar 7. Dari gambar ini, terlihat bahwa reaktor menjadi semakin sub kritis ($k < 1$) jika entalpi masukan pendingin meningkat. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa reaktor memiliki umpan balik daya negatif.



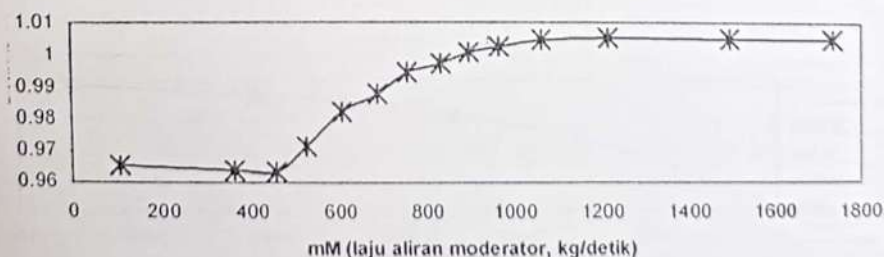
Gambar 7. Hubungan kekritisitan reaktor terhadap entalpi masukan pendingin pada daya normal (1187 MW) dengan racun setimbang.

Pengaruh Pengurangan Laju Aliran Moderator Terhadap Kekritisitan

Penurunan laju aliran moderator akan meningkatkan derajat pendidihan moderator anulus. Peningkatan pendidihan moderator akan mengurangi efek moderasi dan menggeser spektrum neutron termal ke energi neutron lebih tinggi (epitermal). Hal ini akan menurunkan kekritisitan reaktor dan memberi efek reaktifitas negatif. Peningkatan pendidihan moderator anulus karena penurunan aliran moderator dengan laju transfer panas tetap ternyata lebih efektif

daripada peningkatan pendidihan yang disebabkan oleh peningkatan suhu pendingin dengan laju alir moderator. Dengan demikian, efek umpan balik daya negatif cukup besar.

Hasil perhitungan pengaruh variasi laju aliran moderator pada daya normal (1187 MW) dapat dilihat Gambar 8. Dari gambar ini, terlihat bahwa reaktor menjadi semakin sub kritis ($k < 1$) jika laju aliran moderator berkurang. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa dalam hal ini, reaktor memiliki umpan balik daya negatif.



Gambar 8. Hubungan kekritisitan reaktor terhadap laju aliran moderator pada daya normal (1187 MW) dengan racun setimbang.

KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan di atas, dapat disimpulkan bahwa desain reaktor HWR-DM memiliki keunggulan-keunggulan sebagai berikut :

1. Umpan balik daya negatif;
2. Ekonomi neutron tinggi, dapat mencapai burn up tinggi (16000 MWd/ton U; $r = 1,2\%$);
3. Memenuhi persyaratan non proliferasi bahan bakar nuklir (pengkayaan masih cukup rendah);
4. Kandungan aktinida dan hasil fisi berumur panjang pada limbah rendah;
5. Memiliki kemampuan gagal aman (kegagalan sistem pendingin dan moderator menurunkan nilai k , sehingga dapat men-*shutdown* reaktor);
6. Efisiensi termal tinggi (suhu keluaran pendingin tinggi, 565 °C pada saluran terpanas, 522 °C rata-rata);
7. Prosedur pengaturan daya sederhana (dengan mendatur laju aliran moderator);
8. Secara *inheren* ekskursi daya dibatasi pada suatu level tertentu;
9. Mempunyai lebih dari satu sistem *shutdown* pasif (sistem pemompaan moderator, pengosongan parsial tangki moderator);

10. Tetap memiliki kemampuan untuk bertindak sebagai penerima kalor jangka panjang setelah reaktor *shutdown* (sirkulasi alam pada sistem moderator yang tak mampu mengkritiskan reaktor pada tingkat daya tinggi).

DAFTAR PUSTAKA

1. BEREZNAI, G., *Nuclear Power Plant System and Operation – Reference Text*, Department of Nuclear Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, 1998.
2. HEDGES, K. R. and Yu, S. K. W., *Next Generation CANDU Plants*, 1998 Pacific Basin Nuclear Conference Proceeding, p.p. 729-735, 1998.
3. SNELL, V. G. and WEBB, J. R., *CANDU-9 – The CANDU Product to Meet Customer and Regulator Requirements Now and in the Future*, 1998 Pacific Basin Nuclear Conference Proceeding, p.p. 1445-1453, 1998.
4. TONG, L. S. and WEISMAN, J., *Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors*, American Nuclear Society, 1970.
5. Weisman, J., *Elements of Nuclear Reactor Design*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1977.