



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Zaki Su'ud

**PLTN GENERASI LANJUT,
PERKEMBANGAN TEKNOLOGI DAN
PROSPEK APLIKASINYA DI MASA DEPAN**

24 Juni 2011
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Hak cipta ada pada penulis

**Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
24 Juni 2011

Profesor Zaki Su'ud

**PLTN GENERASI LANJUT,
PERKEMBANGAN TEKNOLOGI DAN
PROSPEK APLIKASINYA DI MASA DEPAN**



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Judul: PLTN GENERASI LANJUT, PERKEMBANGAN TEKNOLOGI DAN PROSPEK APLIKASINYA DI MASA DEPAN
Disampaikan pada sidang terbuka Majelis Guru Besar ITB, tanggal 24 Juni 2011.

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Allah Swt. yang telah memberikan berbagai nikmat berupa hidayah, petunjuk, dan kemudahan dalam meniti jalan kehidupan ini khususnya dalam meniti karir di ITB termasuk dalam proses penyusunan naskah ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan seluruh anggota Majelis Guru Besar ITB atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan pidato ini sebagai bagian dari pertanggungjawaban akademik selama penulis berkarya di ITB.

Sesuai dengan bidang keilmuan penulis maka pidato ilmiah ini berjudul “**PLTN GENERASI MAJU Perkembangan Teknologi dan Peluang Aplikasinya di Indonesia**”. Pasca kecelakaan Chernobyl terjadi revolusi dalam teknologi PLTN sehingga melahirkan PLTN generasi III dan IV yang memiliki kemampuan keselamatan inheren/pasif, mampu membakara limbahnya sendiri, serta lebih kompetitif secara ekonomis.

Penulis berharap pidato ilmiah ini memberikan manfaat kepada seluruh masyarakat akademis khususnya di ITB dan umunya di Indonesia.

Bandung, 24 Juni 2011

Zaki Su'ud

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis
Data katalog dalam terbitan

Zaki Su'ud

PLTN GENERASI LANJUT, PERKEMBANGAN TEKNOLOGI DAN PROSPEK APLIKASINYA DI MASA DEPAN

Disunting oleh Zaki Su'ud

Bandung: Majelis Guru Besar ITB, 2011

vi+42 h., 17,5 x 25 cm

ISBN **978-602-8468-31-2**

1. Teknologi 1. Zaki Su'ud

DAFTAR ISI

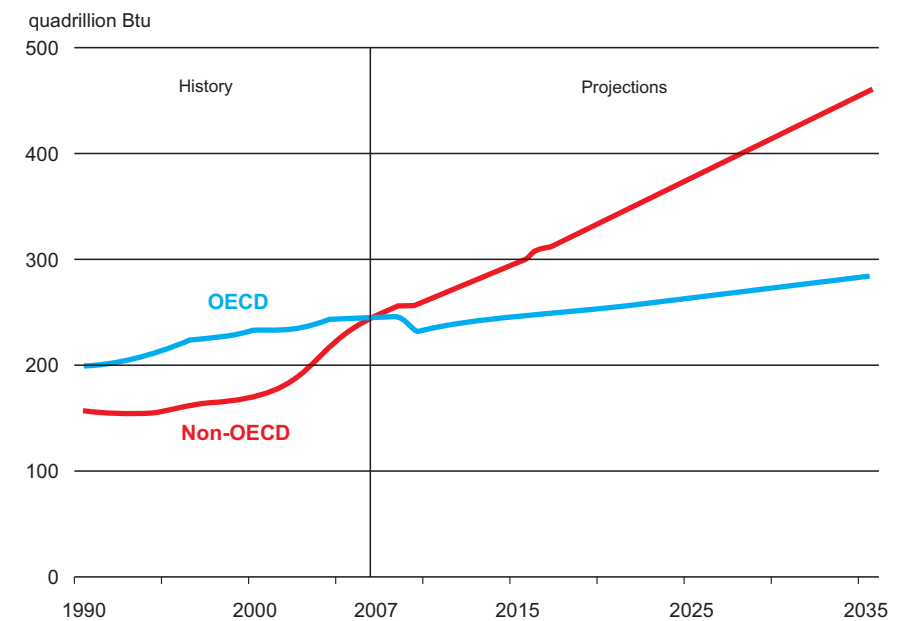
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. PENDAHULUAN	1
2. KONSEP DISAIN REAKTOR NUKLIR BERUMUR PANJANG TANPA PENGISIAN ULANG BAHAN BAKAR DENGAN EKSES REAKTIVITAS YANG RENDAH	4
3. PENGEMBANGAN REAKTOR DAYA NUKLIR BERUMUR PANJANG BERPENDINGIN PB-BI CAIR DENGAN BAHAN BAKAR NITRIDA YANG MEMILIKI KEMAMPUAN KESELAMATAN INHEREN	8
4. KONSEP DISAIN REAKTOR NUKLIR BERUMUR PANJANG TANPA PENGISIAN ULANG BAHAN BAKAR DENGAN BERBAGAI LEVEL POWER	13
5. PENGEMBANGAN SISTEM ANALISIS UNTUK STUDI DISAIN DAN KESELAMATAN PLTN	14
6. REAKTOR TERMAL BERUMUR PANJANG TANPA PENGISIAN ULANG BAHAN BAKAR DENGAN SIKLUS THORIUM	16
7. PENGEMBANGAN REAKTOR DAYA NUKLIR MODULER BERBAHAN BAKAR MOX DENGAN KEMAMPUAN KESELAMATAN INHEREN	17
8. ANALISA DAN OPTIMASI REAKTOR DAYA YANG DAPAT LANGSUNG MEMAKAI BAHAN BAKAR URANIUM ALAM DALAM SIKLUS BAHAN BAKARNYA DENGAN KONSEP CANDLE YANG DIMODIFIKASI	21

9. UCAPAN TERIMA KASIH	26
10. DAFTAR PUSTAKA	29
11. CURRICULUM VITAE	35

PLTN GENERASI LANJUT, PERKEMBANGAN TEKNOLOGI DAN PROSPEK APLIKASINYA DI MASA DEPAN

1. PENDAHULUAN

Pada saat ini kita menghadapi berbagai persoalan menyangkut masalah energi baik di tingkat nasional maupun di tingkat global. Ketidakstabilan harga minyak membawa konsekuensi ketidakpastian suplai dan harga energi yang dampaknya sangat luas mulai dari kehidupan industri, transportasi, kebutuhan pokok seperti sandang pangan papan, dll.



Gambar 1: Konsumsi energi dunia di negara-negara anggota OECD dan non OECD
(sumber ref. 1)

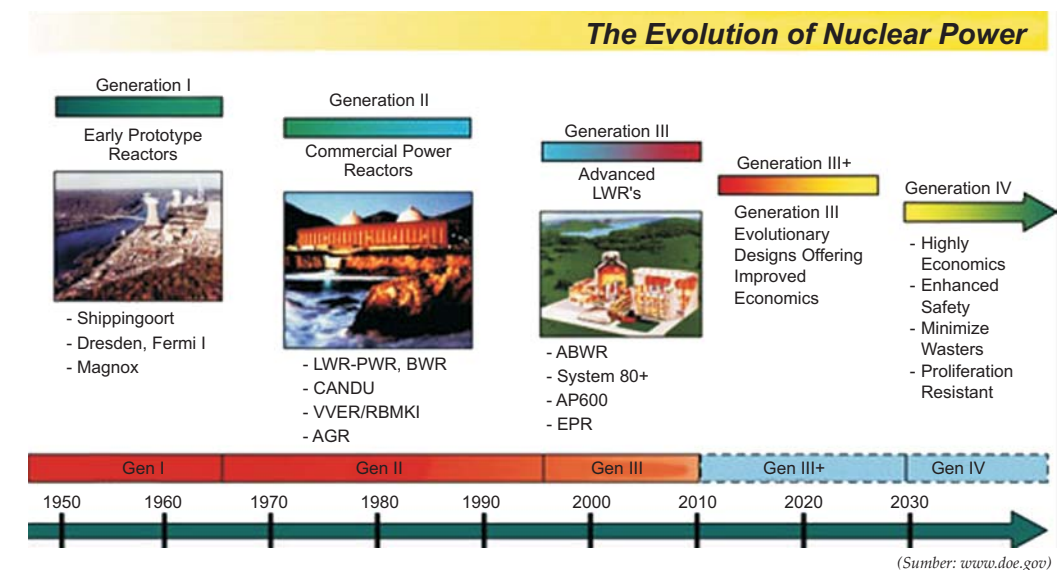
Di sisi lain problem pemanasan global juga mengancam kehidupan manusia dengan ancaman perubahan iklim yang seringkali disertai bencana besar. Problem polusi lingkungan juga menjadi masalah karena menuntut tambahan biaya produksi untuk dapat mengatasinya.

Sangatlah penting bagi Indonesia untuk mengembangkan seluruh potensi energinya termasuk berbagai potensi energi alternatif yang ada. Optimasi dilakukan dengan mempertimbangkan kelebihan dan kekurangan masing-masing sistem energi dan kombinasi optimal perlu diputuskan untuk setiap kurun waktu tertentu. Setelah optimasi dilakukan dengan mempertimbangkan segala aspek pertimbangan yang perlu maka selanjutnya diperlukan implementasi yang ketat agar tidak menimbulkan kenaikan biaya-biaya yang tak perlu dan pada akhirnya membebani APBN dan ekonomi nasional.

Krisis ekonomi yang terjadi belakangan ini membuat pukulan berat bagi industri dan karena itu peningkatan daya saing industri lokal menjadi lebih penting lagi. Dalam hal ini ketersediaan energi beserta harganya yang kompetitif menjadi persyaratan untuk bertahan dan berkembangnya industri di Indonesia saat ini.

Energi nuklir memiliki keunggulan dari kepadatan energinya serta biaya operasinya yang relatif murah, dibandingkan dengan sistem-sistem energi lainnya terutama energi fosil. Di sisi lain PLTN secara umum memerlukan biaya kapital yang lebih besar dari pembangkit-pembangkit lainnya².

Sementara itu pasca kecelakaan TMI II dan Chernobyl disain PLTN mengalami perbaikan secara sangat signifikan. Selain eliminasi keberadaan reaktivitas dalam jumlah besar yang dapat dieksploitasi operator seperti pada kasus Chernobyl, perbaikan juga menyangkutantisipasi terhadap kecelakaan akibat gangguan pompa dan pipa-pipa. Beberapa fitur keselamatan pasif/inheren juga banyak diterapkan pada PLTN-PLTN yang dirancang pasca kecelakaan Chernobyl. Selain itu juga dilakukan revolusi penanganan limbah nuklir dengan cara membakar limbah di dalam reaktor sehingga tingkat toksisitasnya lebih kecil dari saat diambil dari alam. Hasilnya kini muncul PLTN-PLN generasi baru yang secara ekonomi sangat kompetitif dan memiliki tingkat keselamatan inheren/pasif. Diantara disain-disain baru itu adalah PBMR, SVBR-100, IRIS, dll.³⁻⁵ Perkembangan PLTN secara umum ditunjukkan dalam gambar berikut.

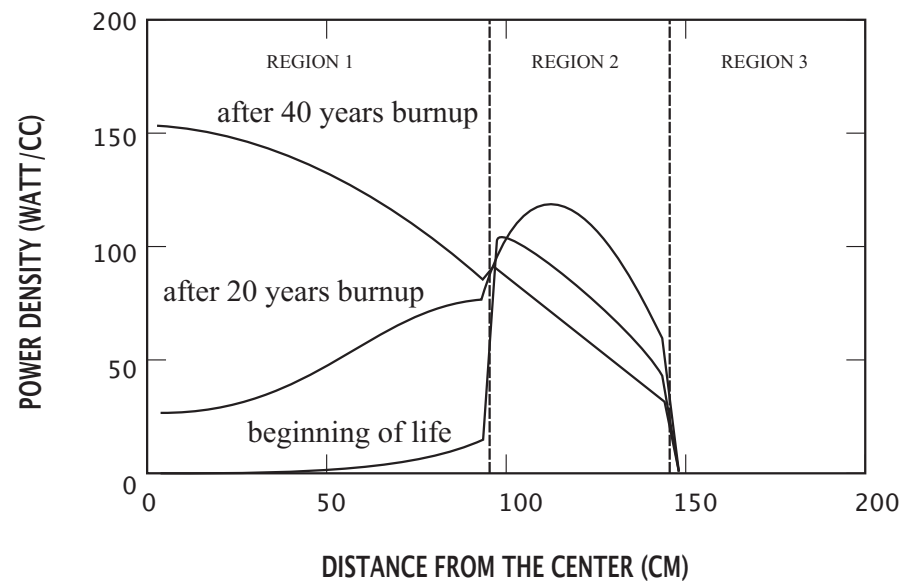


Gambar 2: Evolusi Teknologi PLTN⁶

2. KONSEP DISAIN REAKTOR NUKLIR BERUMUR PANJANG TANPA PENGISIAN ULANG BAHAN BAKAR DENGAN EKSES REAKTIVITAS YANG RENDAH

Saat itu mulailah berkembang konsep reaktor generasi baru yang mencoba memecahkan persoalan-persoalan klasik reaktor nuklir sekaligus seperti masalah keselamatan inheren, kemampuan memanfaatkan uranium alam secara optimal, pembakaran limbah, dsb.

Studi reaktor cepat berpendingin Pb-Bi khususnya untuk aplikasi reaktor kecil/menengah yang dapat dioperasikan dalam waktu lama tanpa pengisian ulang bahan bakar mengalami pertumbuhan pesat. Sejak perintisan pertama oleh penulis dkk. di Tokyo Institute of technology awal dekade 1990 an⁷⁻¹⁵.

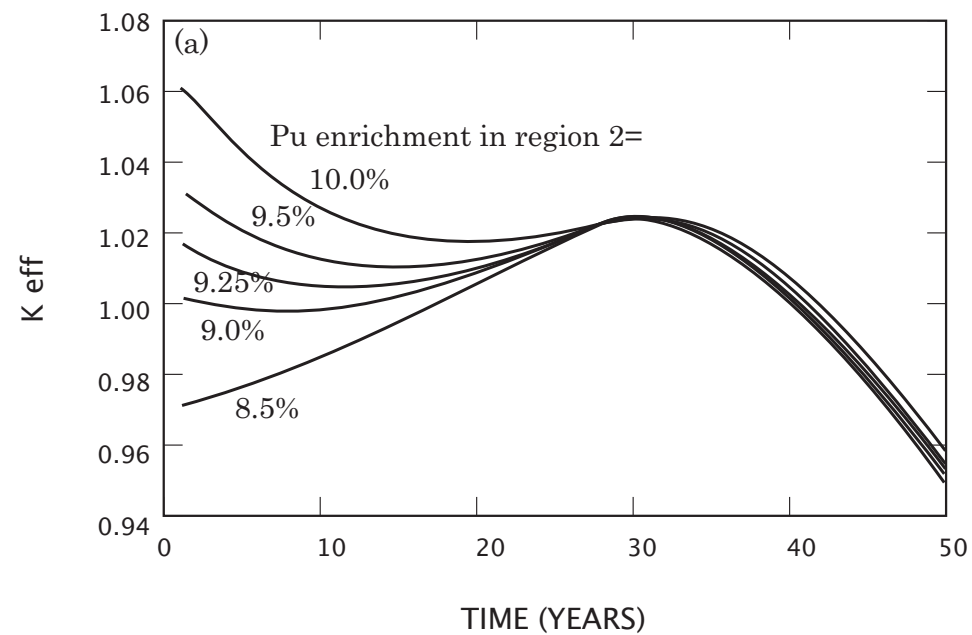


Gambar 3: Konsep ultra long life fast reactors dengan memasukkan stok uranium alam di bagian tengah reaktor.⁷

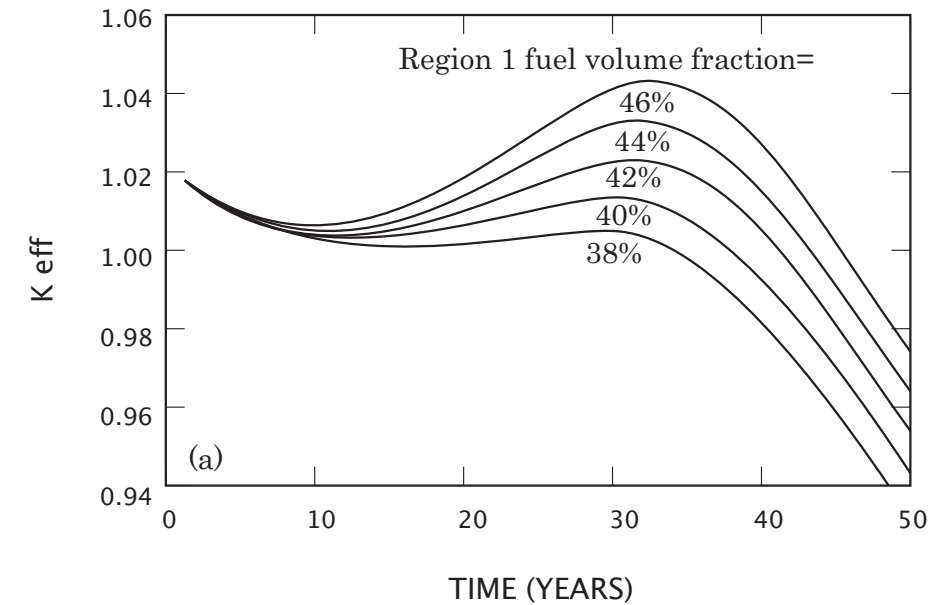
Pertama-tama dilakukan parametric survey dengan mengubah-ubah parameter diantaranya lebar region bagian dalam yang berisi uranium alam, region teras bagian luar yang merupakan teras aktif sejak awal, dan lebar reflektor⁷. Tabel 1 menunjukkan parameter umum pada proses survei parameter ini. Sebagai contoh gambar 4 dan 5 ditunjukkan bahwa pengayaan plutonium di teras aktif dan fraksi volume di daerah blanket (di tengah teras) masing-masing sangat dominan mengontrol perubahan bentuk faktor multiplikasi di bagian awal dan akhir umur reaktor. Berdasarkan hasil-hasil survei parameter ini kemudian dapat dikembangkan disain reaktor cepat berpendingin logam cair (sodium atau Pb atau Pb-Bi) yang dapat dioperasikan pada waktu lama tetapi ekses reaktivitasnya kurang dari satu dolar sebagaimana ditunjukkan pada gambar 6. Hasil ini sangat revolusioner karena pada saat itu ekses reaktivitas umumnya jauh di atas 1 dolar yang kemudian harus dikendalikan dengan batang kendali. Dengan hasil terbaru ini maka berarti kita dapat membuat reaktor nuklir yang dapat beroperasi selama 40 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar dan selama operasinya tak memberikan peluang terjadinya super prompt critical accident seperti yang terjadi di Chernobyl karena ekses reaktivitas sepanjang operasi kurang dari 1 dolar reaktivitas⁷.

Table 1⁷
General reactor specifications

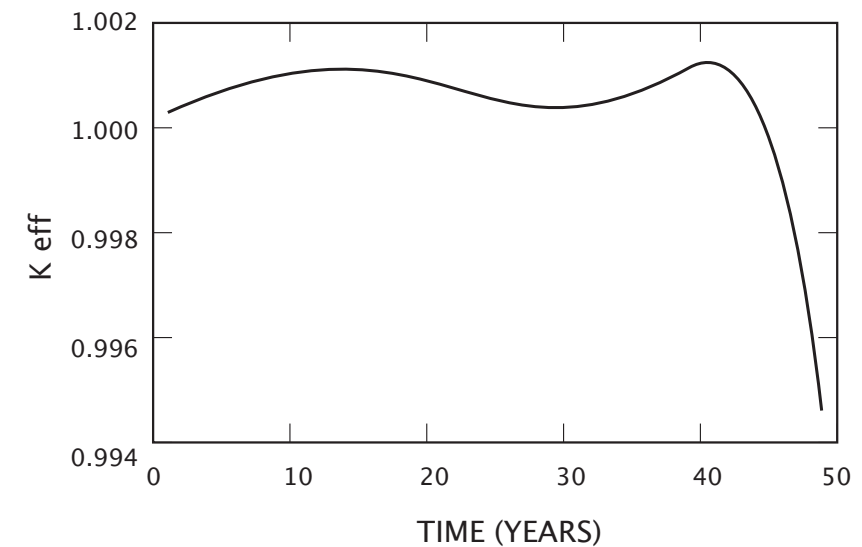
Reactor power	900 MWth
Reactor life	40 years
Fuel material	Metal
Core (region 2)	U-Pu-10 wt % Zr
Blanket (region 1)	U-10 wt % Zr
Cladding material	Stainless steel
	SUS-316
Cladding thickness	0.4 mm
Coolant material	Sodium
Smearred fuel density	
[%theoretical density]	75%
Reactor average temperature	500°C



Gambar 4: Pengaruh plutonium enrichment di region II (teras aktif) pada perubahan pola faktor multiplikasi sepanjang umur reaktor⁷

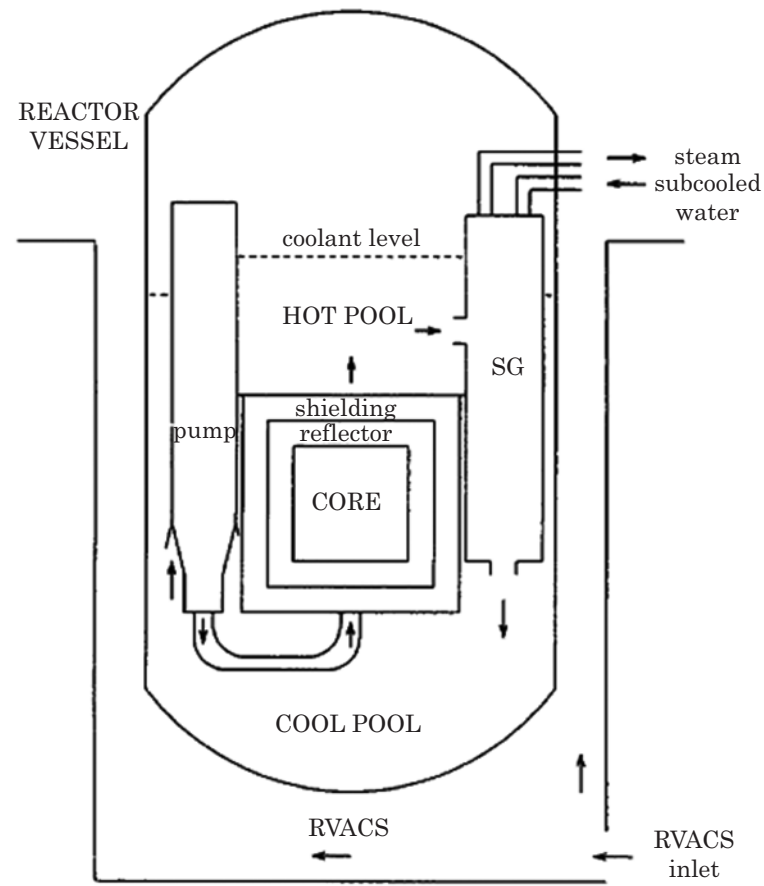


Gambar 5: Pengaruh fraksi volume di region I (blanket di tengah reaktor) pada perubahan pola faktor multiplikasi sepanjang umur reaktor⁷



Gambar 6: hasil opetimasi reaktor berumur panjang tanpa pengisian ulang bahan bakar dengan ekse reaktivitas kurang dari satu dolar reaktivitas sepanjang waktu operasinya⁷.

3. PENGEMBANGAN REAKTOR DAYA NUKLIR BERUMUR PANJANG BERPENDINGIN Pb-Bi CAIR DENGAN BAHAN BAKAR NITRIDA YANG MEMILIKI KEMAMPUAN KESELAMATAN INHEREN⁸⁻¹¹

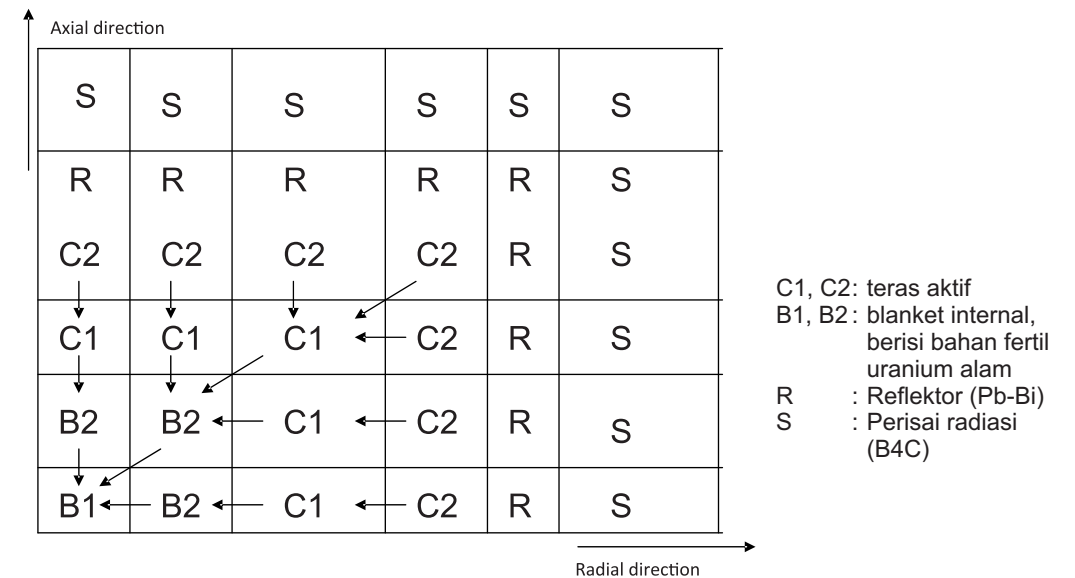


Gambar 7: Lay-out Reaktor daya kecil berumur panjang dengan pendingin Pb-Bi^{8,11}

Pada tahap riset lebih lanjut dipilih bahan pendingin Pb-Bi cair dengan pertimbangan tak eksplosif bila bertemu air atau udara, serta memiliki sifat netronik yang superior. Pendingin Pb-Bi cair juga memiliki

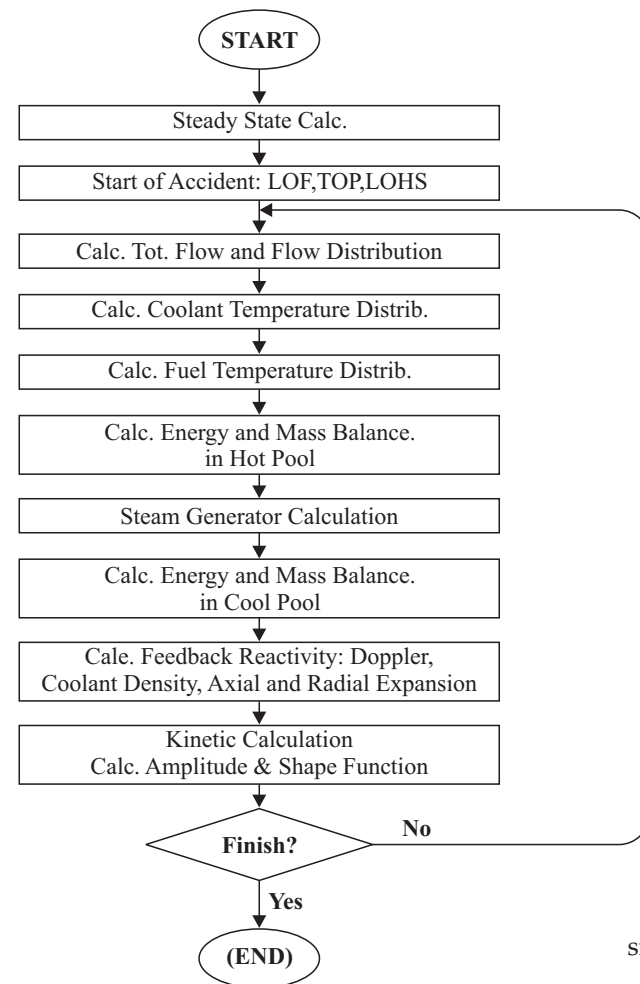
titik leleh yang rendah (~125°C) sehingga dapat dioperasikan pada rentang suhu 350°C-500°C tanpa khawatir terjadi pembekuan bahan bakar. Secara keseluruhan tata letak komponen reaktor tampak dalam gambar 7. Tampak bahwa pembangkit uap (steam generator) diletakkan dalam bejana reaktor.

Untuk optimasi bagian teras secara netronik, maka disain teras reaktor dikembangkan berdasarkan konsep yang ditunjukkan pada gambar 8. Konsep ini dikembangkan lebih rinci dari hasil studi awal yang telah dijelaskan pada bagian 3. Tampak bahwa baik teras aktif maupun blanket internal masing-masing dibagi lagi menjadi 2 daerah (region) untuk memungkinkan optimasi lebih lanjut guna mendapatkan eksres reaktivitas yang sangat kecil yaitu maksimum 0,1\$ reaktivitas.



Gambar 8: Konsep teras untuk reaktor kecil berumur panjang dengan “zero burnup reactivity swing”^{9,10}

Arah panah menunjukkan arah pergeseran teras aktif sejalan dengan meningkatnya level burnup/lama operasi. Pada saat itu telah berhasil dirancang reaktor berdaya 150 MWth yang dapat dioperasikan dalam waktu 10 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar dengan eksese reaktivitas di bawah 0.1%dk/k dan memiliki kemampuan keselamatan inheren terhadap berbagai jenis kecelakaan ULOF, UTOP, ULOHS maupun kombinasi diantaranya.



Gambar 9: Diagram alir program simulasi kecelakaan Reaktor Cepat berpendingin Pb-Bi¹¹

Gambar 9 menunjukkan diagram alir perhitungan simulasi kecelakaan reaktor Pb-Bi dengan bahan bakar nitrida yang meliputi analisa kinetika ruang waktu di teras dan analisa transien termal hidrolis di teras, tanki panas, tanki dingin, dan pembangkit uap.

Hasil simulasi kecelakaan untuk berbagai kasus dapat dilihat pada gambar 10-11. Parameter utama reaktor dapat dilihat pada tabel 2 berikut.

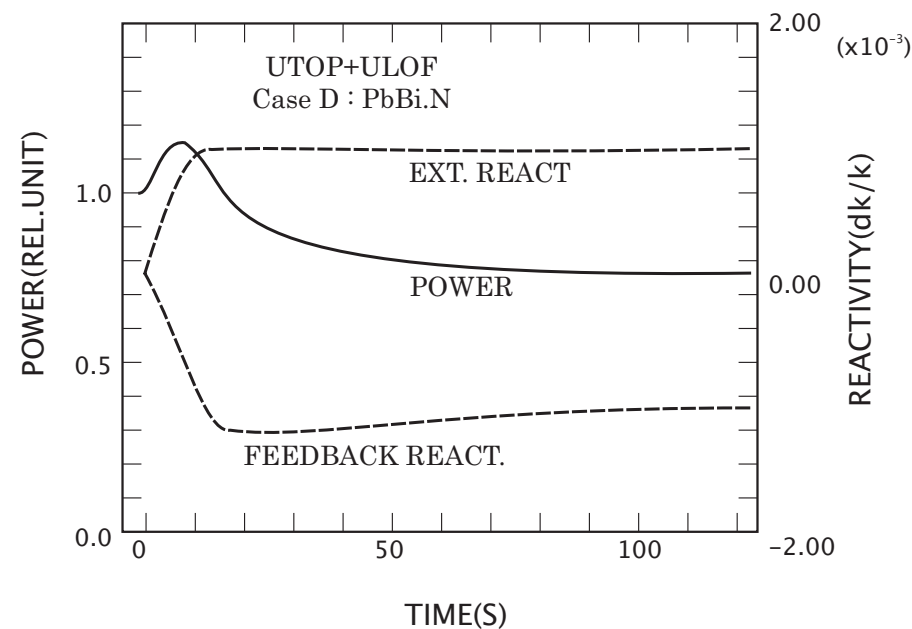
Ada beberapa poin penting pada informasi di tabel 2, pertama adalah reaktor ini berdaya 150 MWt dan dapat dioperasikan terus menerus dalam 12 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar dengan eksese reaktivitas sepanjang operasinya tak pernah melebihi 0,1% reaktivitas. Konsep ini merupakan pionir untuk sistem reaktor cepat dengan “zero burnup reactivity swing” yang memiliki konsekuensi besar yaitu eliminasi kemungkinan kecelakaan seperti Chernobyl.

Table 2
Parameter Utama Reaktor Pb-Bi berumur panjang¹¹

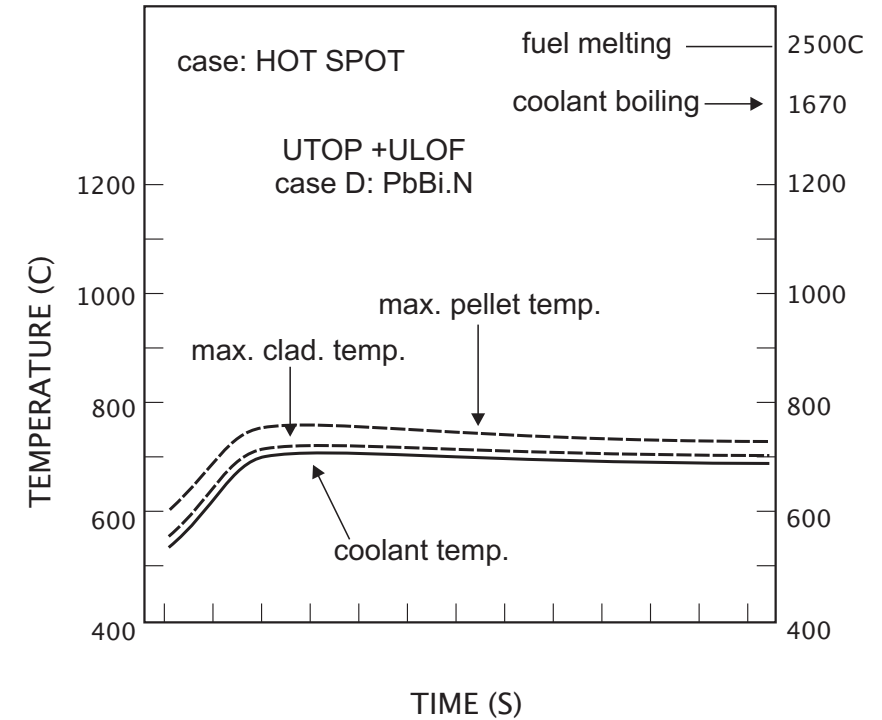
Reactor power (MWt)	150
Lifetime (years)	12
Volume of internal blanket (m ³)	1.5
Fuel	U - Pu -10%Zr metallic fuel, or U N - PuN nitride fuel
Shielding material	B4C
Structural material	HT9/SS316
Pin pitch /diameter	1.2
Pin diameter (cm)	1.0
Cladding thickness (mm)	0.8
Steam generator	
Inlet water temperature (°C)	225
System pressure (M Pa)	7

Secondary flow rate (kg s-1)	60-70
Height (m)	4.0
Pipe diameter (cm)	2.5/2.2 (inner/outer)
Reactivity swing (% $\Delta k/k$)	<0.1
Peak burnup (% HM)	1.2
Void coefficient	Negative

Selanjutnya gambar 10 menunjukkan perubahan daya dan reaktivitas dalam kecelakaan serempak ULOF-UTOP. Tampak bahwa daya secara otomatis bergeser ke level yang lebih rendah sesuai dengan kemampuan sirkulasi alamiah sistem. Selanjutnya gambar 11 menunjukkan perubahan temperatur di daerah paling panas (hot spot). Tampak bahwa safety margin untuk temperatur bahan bakar dan pendingin sangat tinggi.



Gambar 10: Perubahan daya dan reaktivitas dalam kecelakaan serempak ULOF-UTOP¹¹



Gambar 11: Perubahan temperatur bahan pendingin, kelongsong dan bahan bakar dalam kecelakaan simultan ULOF-UTOP¹¹

4. KONSEP DISAIN REAKTOR NUKLIR BERUMUR PANJANG TANPA PENGISIAN ULANG BAHAN BAKAR DENGAN BERBAGAI LEVEL POWER¹²

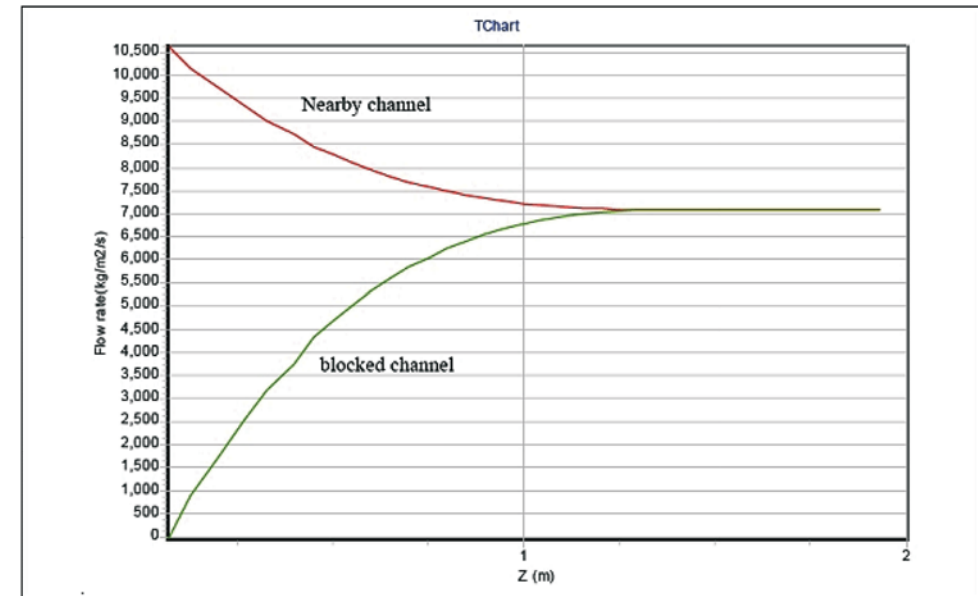
Konsep di atas kemudian diekstensikan untuk reaktor berumur panjang dengan daya yang lebih besar namun dengan konsep yang sama. Pada saat itu ditunjukkan bahwa untuk reaktor berdaya sampai dengan 1000MWe (2500 MWth) berpendingin Pb-Bi pun dapat dirancang memiliki kemampuan keselamatan inheren menggunakan pendekatan yang sama¹¹⁻¹⁹. Untuk ukuran daya yang semakin tinggi maka umur

operasi diambil lebih pendek terkait keterbatasan material untuk level burnup yang lebih tinggi.

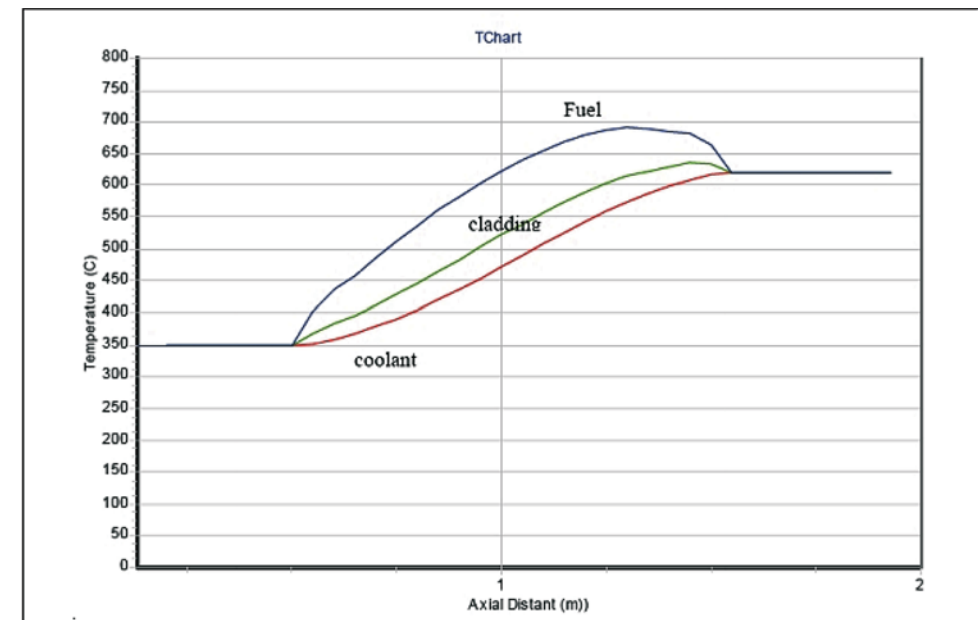
5. PENGEMBANGAN SISTEM ANALISIS UNTUK STUDI DISAIN DAN KESELAMATAN PLTN^{7, 11, 20-14}

Sampai saat ini telah dikembangkan berbagai sistem analisis disain dan keselamatan PLTN meliputi analisa netronik dalam keadaan tunak: program komputer untuk memecahkan persamaan multigrup difusi dan analisa burnup 1,2 dan 3 dimensi; program simulasi termohidrolika keadaan tunak 2 dan 3 dimensi, program analisa keselamatan reaktivitas akibat ditariknya batang kendali tanpa proteksi, program analisa hilangnya daya pompa tanpa proteksi, program analisa hilangnya sistem pembuang panas tanpa proteksi serta kombinasi dari ketiganya.^{7,11}

Selain itu telah dikembangkan beberapa program untuk analisa kecelakaan pemblokkan lokal, simulasi PLTN yang dapat membakar bahan bakar uranium alam secara langsung tanpa perlu sistem pengayaan uranium yang merupakan teknologi yang sensitif, serta sejumlah program analisis untuk PLTN generasi IV. Contoh hasil program untuk analisa pemblokkan lokal dapat di lihat pada gambar 12-13.²²



Gambar 12: Aliran silang pada kasus pemblokkan lokal reaktor daya berpendingin Pb-Bi²²



Gambar 13: Distribusi temperatur secara aksial pada kanal yang mengalami pemblokkan²²

6. REAKTOR TERMAL BERUMUR PANJANG TANPA PENGISIAN ULANG BAHAN BAKAR DENGAN SIKLUS THORIUM²⁵⁻²⁷

Telah berhasil dikembangkan sejumlah rancangan reaktor daya nuklir berpendingin air jenis PWR dan BWR yang dapat diperasikan dalam jangka panjang tanpa pengisian ulang bahan bakar dengan menggunakan siklus thorium dan dalam beberapa kasus dilakukan penambahan Pa 231 untuk meningkatkan performansi netronik dan aspek non-proliferasi. Riset dalam bidang ini dimaksudkan pula sebagai upaya persiapan SDM bila Indonesia akan membangun PLTN berpendingin air seperti APWR (Advanced Pressurized Water Reactors) atau ABWR (Advanced Boiling Water Reactors)

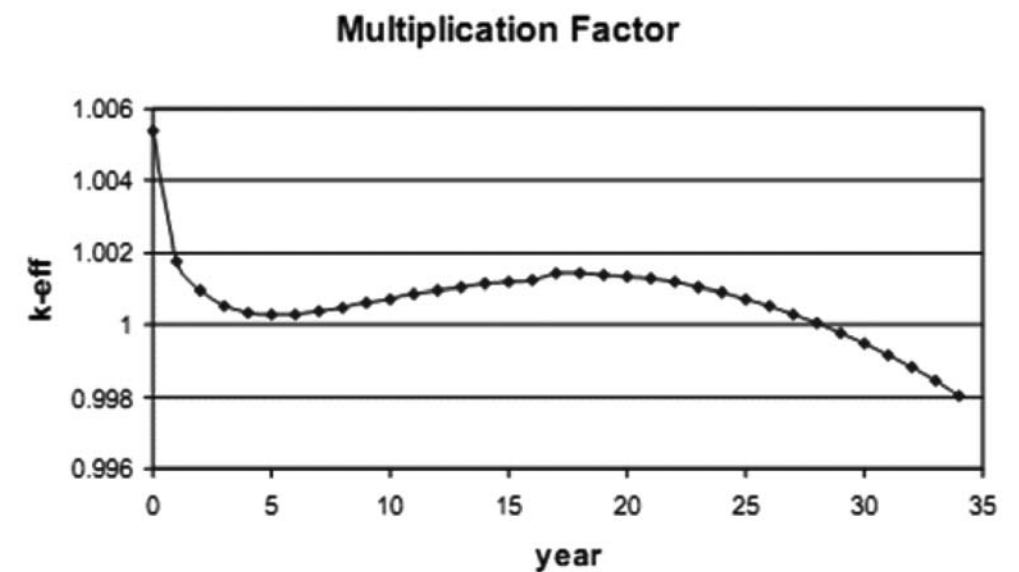
Contoh hasil-hasil yang ada dapat di Lihat pada Tabel 3 dan gambar 14 berikut. Tampak dari gambar 14 bahwa PWR ini dapat dioperasikan sampai lebih dari 30 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar dengan eksres reaktivitas yang lebih rendah dari PLTN PWR konvensional.²⁶

Table 3

Parameter utama PWR berumur panjang tanpa pengisian ulang bahan bakar²⁶

Power	420 MWth
Operation period	28 year
Shielding	Zircallov
Coolant	Light water (H ₂ O)
Fuel	Th-Pa-U oxide
Enrichment U-233	6% - 7% - 9%
Percentage Pa-231	4.3% - 7% - 9%
Fuel, cladding & moderator volume fraction	60 % - 10% - 30%
Power Density	28.1 watt/cc

Dia. Pin	1.224 cm
Pitch	1.4 cm
Core geometry	Cylinder 2-D (R-Z)
Cell Geometry	Square Cell
Active core size	130 cm x 280 cm
Reflector width	30 cm



Gambar 14: Perubahan faktor multiplikasi efektif untuk PWR berumur panjang tanpa pengisian ulang bahan bakar²⁶

7. PENGEMBANGAN REAKTOR DAYA NUKLIR MODULER BERBAHAN BAKAR MOX DENGAN KEMAMPUAN KESELAMATAN INHEREN^{17,18,21,28}

Semenjak berkembangnya PLTN generasi lanjut di era 90an maka bahan bakar unggulan jenis metal dan nitrida serta karbida umumnya dipilih sebagai bahan bakar bagi PLTN generasi lanjut tersebut. Beberapa

pertimbangan dasar tak digunakannya bahan bakar MOX yang banyak digunakan pada PLTN konvensional adalah karena konduktivitas termal yang rendah sehingga menyebabkan suhu maksimum bahan bakar di teras menjadi tinggi serta kerapatan atom yang relatif lebih rendah dari bahan bakar metal, nitrida dan karbida. Namun bahan bakar MOX unggul dari fasilitas produksi masal yang telah banyak tersedia sedang bahan bakar lain belum.

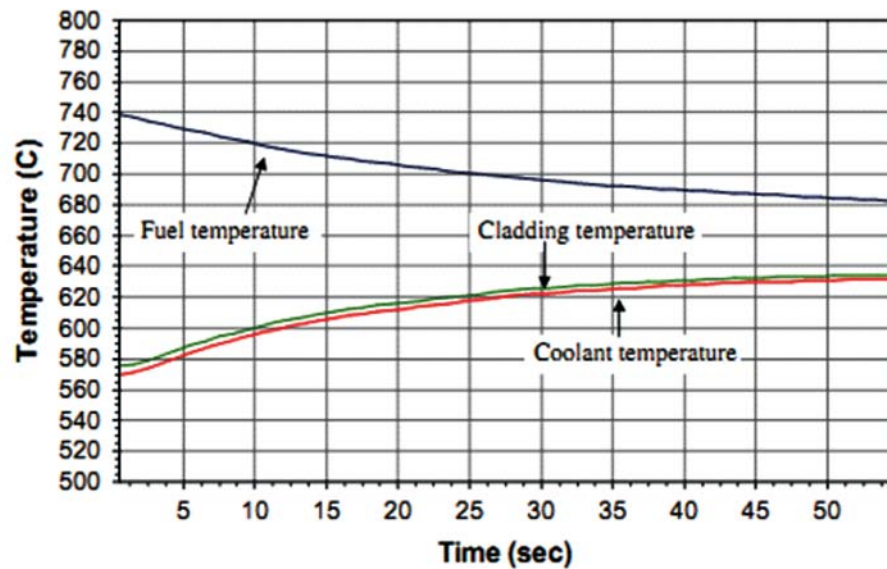
Pada tahun 2003-2004 penulis banyak mengembangkan sistem analisis kuasistatik untuk menganalisis keselamatan inheren yang relatif sederhana dengan tujuan utama untuk memudahkan mahasiswa tingkat 2 dalam memahami keselamatan inheren dalam PLTN generasi lanjut. Namun selanjutnya sistem analisis ini sangat berguna dalam melakukan survei awal disain PLTN baru dari aspek kemampuan keselamatan inherennya.²¹ Dari analisis ini penulis menemukan bahwa dengan strategi tertentu bahan bakar MOX dapat mejadi sangat kompetitif untuk membuat PLTN generasi lanjut yang memiliki kemampuan keselamatan inheren. Salah satu kunci pentingnya dalah kita merancang teras dengan kerapatan daya yang sedang dan menggunakan fraksi volume bahan bakar yang lebih tinggi serta dibantu dengan Pu-238 untuk mendapatkan kemampuan netronik yang lebih baik. Contoh-contoh hasil yang didapat ditunjukkan pada tabel 4 dan gambar 15-16 berikut.¹⁸

Table 4
Contoh hasil optimasi PLTN kecil berumur panjang berbahan bakar MOX¹⁸

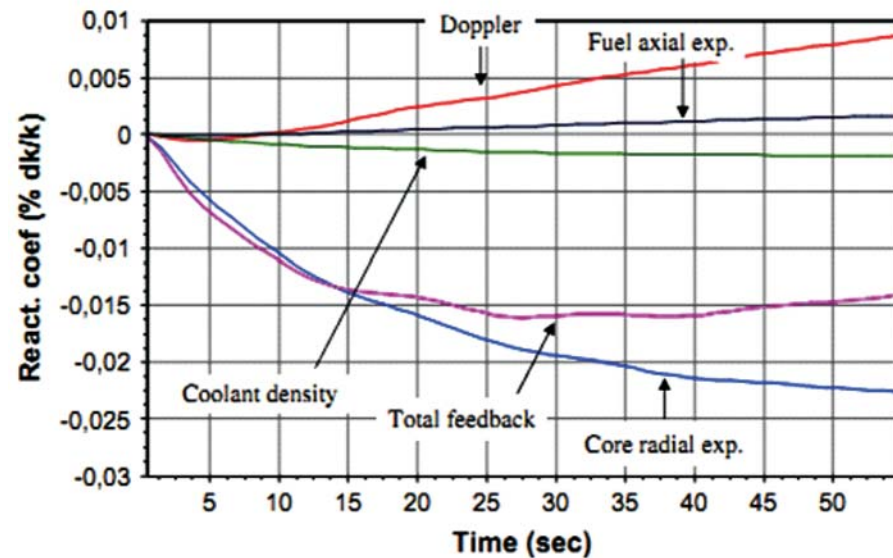
Thermal power (MWt)	Inner blanket width (cm)	Main core width (cm)	Reflector width (cm)	Shielding width (cm)	Volume fraction (%)		
					Fuel	Structure	Coolant
75	5	63	50	-	60	10	30
150	9	69	50	-	60	10	30
225	9	72	50	-	60	10	30
300	15	71	50	-	60	10	35

Note: all cores are constrained to have maximum excess reactivity < one dollar.

Tabel 4 menunjukkan 4 disain berbasis MOX dengan daya 75MWt, 150MWt, 225MWt, dan 300MWt berbasis MOX yang memiliki kemampuan dioperasikan dalam waktu lama tanpa pengisian ulang bahan bakar dan dengan kemampuan keselamatan inheren. Gambar 15 menunjukkan bahwa dalam kecelakaan hilangnya daya pompa pendingin tanpa proteksi maka maksimum temperatur di bahan bakar, kelongsong dan bahan pendingin masing jauh dibawah batas maksimum yang diperkenankan. Adapun gambar 16 menunjukkan mekanisme umpan balik yang memungkinkan reaktor MOX ini dapat bertahan terhadap kecelakaan ULOF secara inheren.¹⁹



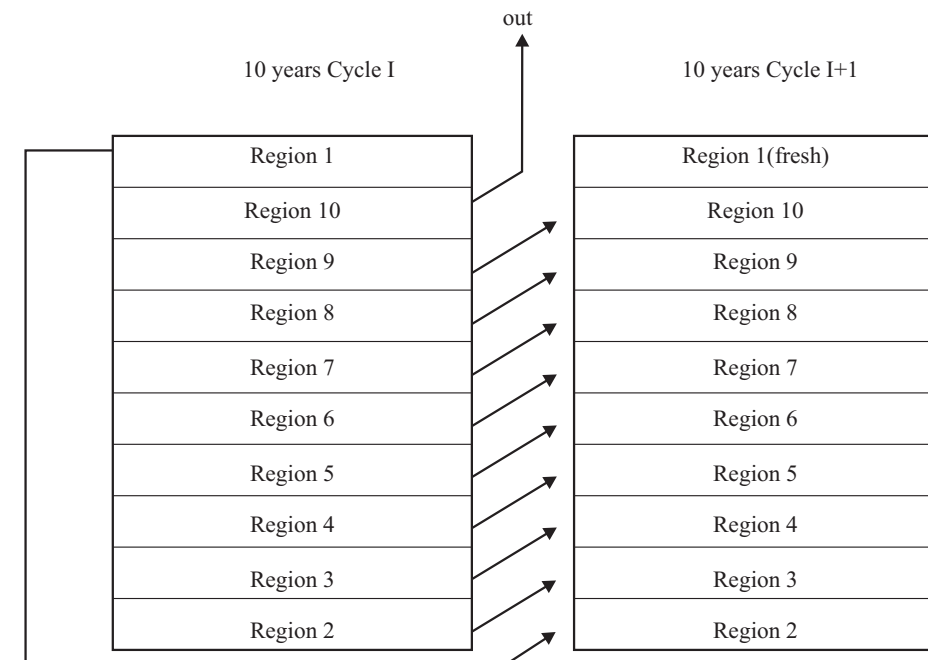
Gambar 15: Temperatur hot spot pada kasus ULOF untuk reaktor daya berumur panjang 225 MWT dengan bahan bakar MOX.¹⁹



Gambar 16: Reaktivitas umpan balik pada kasus ULOF untuk reaktor daya berumur panjang 225 MWT dengan bahan bakar MOX.¹⁹

8. ANALISA DAN OPTIMASI REAKTOR DAYA YANG DAPAT LANGSUNG MEMAKAI BAHAN BAKAR URANIUM ALAM DALAM SIKLUS BAHAN BAKARNYA DENGAN KONSEP CANDLE YANG DIMODIFIKASI²⁹⁻³⁶

Mekanisme burn-up CANDLE adalah mekanisme pengaturan siklus bahan bakar dalam reaktor yang dikembangkan oleh Prof. SEKIMOTO di Tokyo Institute of Technology³⁰⁻³⁴ untuk mendapatkan pendayagunaan bahan bakar nuklir alamiah mencapai 40% (pada reaktor PWR biasa angka ini biasanya hanya mencapai orde 1-2%) tanpa memerlukan sistem pengayaan bahan bakar ataupun sistem pemrosesan ulang bahan bakar yang keduanya merupakan teknologi yang sangat sensitive bagi Negara-negara dunia ketiga.



Gambar 17: Konsep dasar reaktor CANDLE yang dimodifikasi^{29,36}

Pada studi yang lalu telah berhasil didapatkan hasil analisa netronik yang menunjukkan bahwa konsep CANDLE yang dimodifikasi ini dapat diterapkan pada reaktor berumur panjang dengan siklus pengisian bahan bakar tiap 10 tahun. Sistem analisa CANDLE menggunakan metoda equilibrium adapun dalam metoda modified CANDLE maka digunakan metoda iteratif bergantung waktu dengan perangkat difusi dan burn-up yang lazim digunakan dalam analisa disain reaktor nuklir.^{29,36} Kelebihan konsep modifikasi CANDLE adalah fleksibilitasnya pada level burnup dari bahan bakar yang dikeluarkan dari reaktor. Pada konsep CANDLE asal maka bahan bakarnya akan memiliki level burnup sekitar 40% yang untuk teknologi bahan bakar maju saat ini masih belum memungkinkan untuk implementasi tanpa melibatkan penggantian kelongsong bahan bakar (*cladding*). Dengan konsep CANDLE yang dimodifikasi didapatkan bahwa setelah optimasi dapat diperoleh reaktor daya yang level burnup keluarannya sekitar 20%.^{29,36}

Keunggulan lain dari sistem ini adalah bahwa bila kita menggunakan reaktor nuklir dengan konsep ini kita akan terlepas dari ketergantungan dari teknologi pengayaan uranium dan pemrosesan ulang bahan bakar nuklir yang saat ini dikuasai Negara-negara maju dan walaupun ada Negara berkembang yang memaksakan menguasai teknologi ini akan memicu krisis. Dengan teknologi ini sekali reaktor telah berjalan selanjutnya kita hanya perlu menyediakan bahan bakar uranium alam yang teknologinya praktis telah dikuasai Indonesia dan bahan bakunya

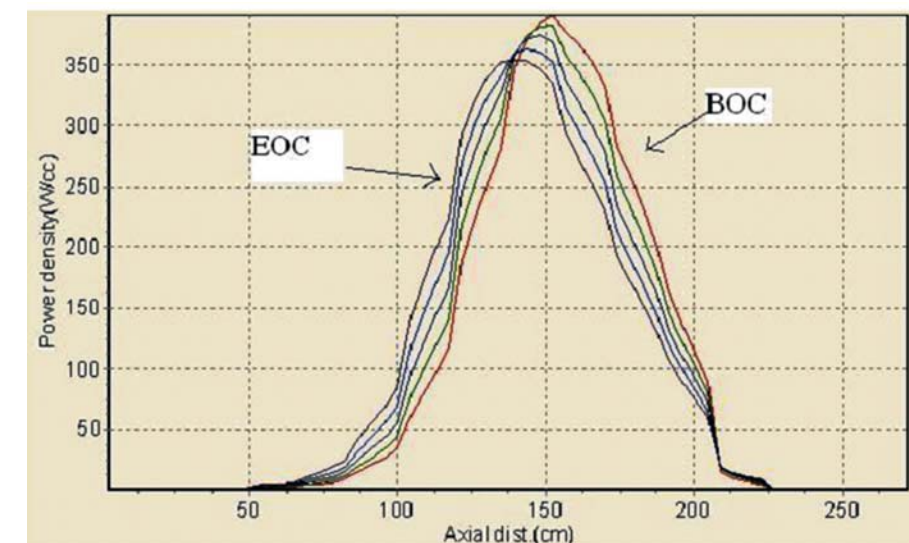
juga tersedia di Indonesia.

Contoh hasil analisa reaktor daya nuklir dengan konsep CANDLE yang dimodifikasi dapat dilihat pada gambar 18-22. Parameter umum dijelaskan pada tabel 5 berikut.

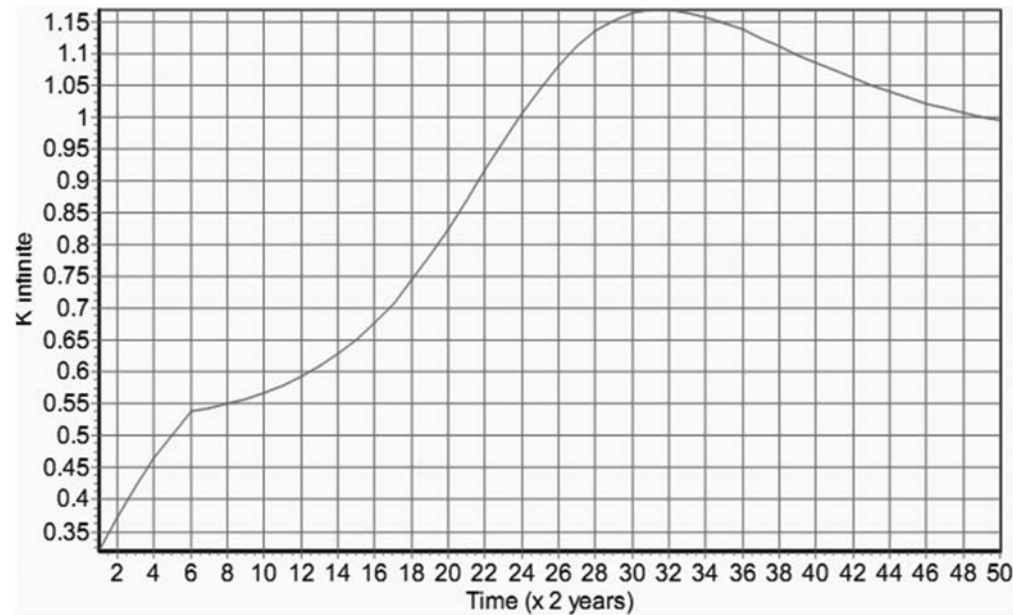
Tabel 5

Parameter umum untuk Reaktor Daya Nuklir Berbasis CANDLE yang dimodifikasi³⁶

<i>Parameter</i>	<i>Value/description</i>
Power (N1\Wth)	800
Number of equal volume region in core	10
Sub cycle length (years)	10
Fuel type	Nitride (UN-PuN)
Fuel volume fraction	60%
Cladding volume fraction	12.5%
Coolant volume fraction	27.5%
Fuel diameter	1.2 cm
Coolant type	Pb-Bi



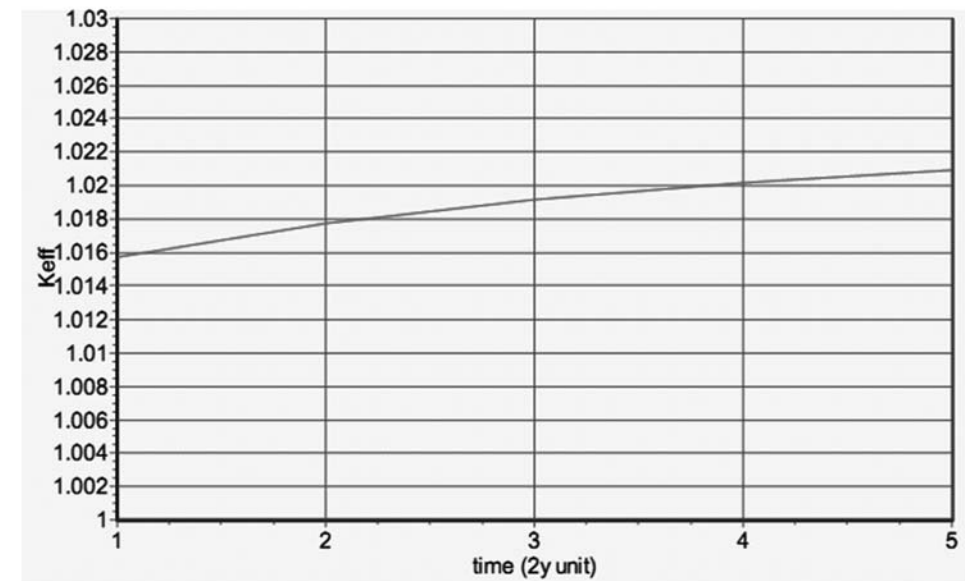
Gambar 18: Perubahan distribusi daya aksial selama 10 tahun proses burnup³⁶



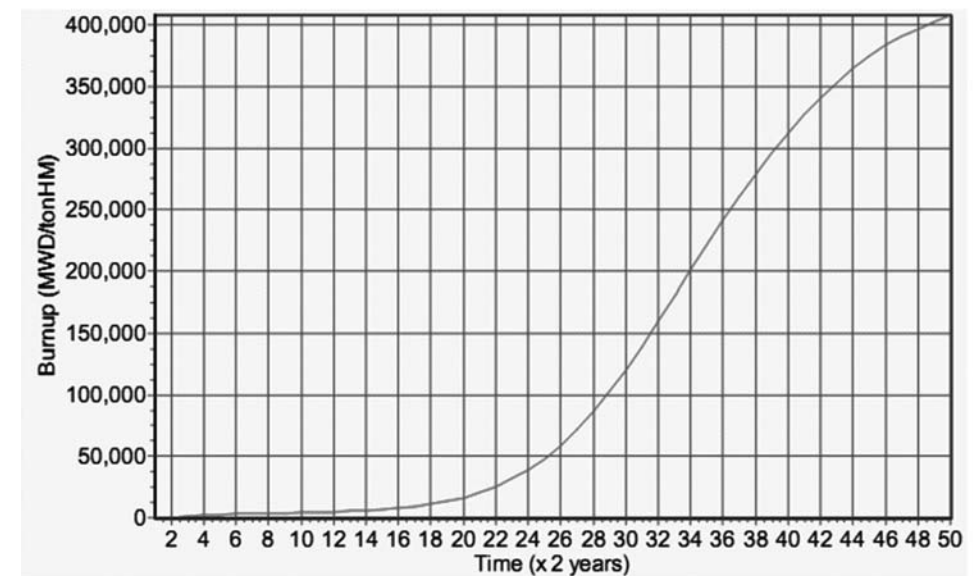
Gambar 19: Perubahan nilai faktor multiplikasi tak hingga selama 100 sejarah burnup bahan bakar³⁶

Pada gambar 18 ditunjukkan bahwa ada sedikit pergeseran kerapatan daya ke arah bahan bakar yang lebih sedikit level burnupnya dalam 10 tahun operasi reaktor. Adapun gambar 19 menunjukkan proses perubahan bahan bakar dari bahan uranium alam yang belum bisa secara efektif menghasilkan daya besar, menuju bahan bakar utama yang mengandung cukup plutonium sehingga dapat menghasilkan daya yang cukup besar. Gambar 20 menunjukkan bahwa reaktor dapat beroperasi 10 tahun tanpa pengisian ulang bahan bakar karena keff selalu di atas 1.0. Selanjutnya gambar 21 menunjukkan perubahan level burnup sepanjang operasi reaktor. Hasil ini berkorelasi dengan hasil pada gambar 19. Terakhir gambar 22 menunjukkan proses akumulasi plutonium di bahan bakar

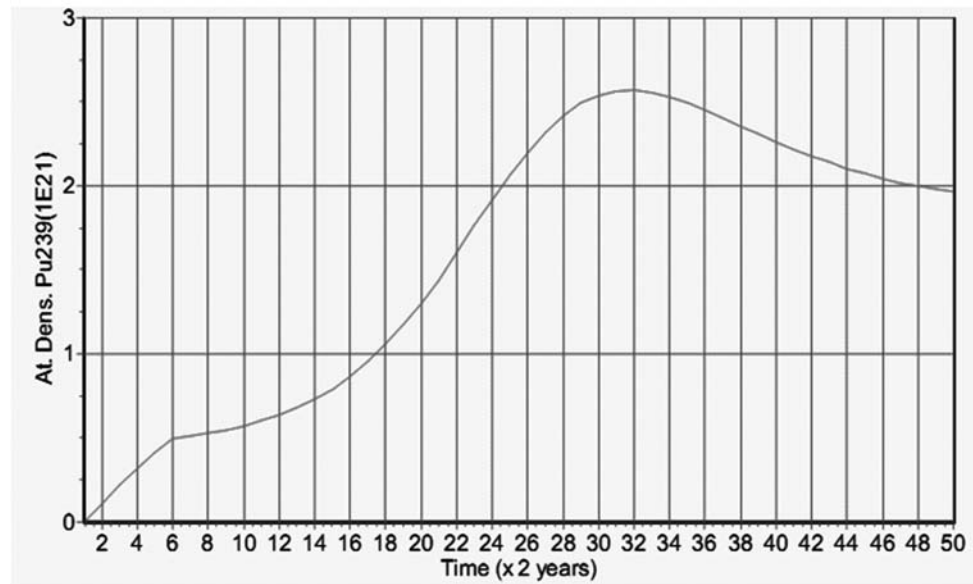
sepanjang sejarah burnupnya dalam reaktor CANDLE yang dimodifikasi.



Gambar 20: Perubahan nilai faktor multiplikasi efektif selama 10 tahun operasi reaktor³⁶



Gambar 21: Perubahan nilai level burnup selama 100 sejarah burnup bahan bakar³⁶



Gambar 22: Perubahan kerapatan atom Pu-239 selama 100 sejarah burnup bahan bakar³⁶

9. UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini perkenankanlah penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Pimpinan dan Anggota Majelis Guru besar ITB atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan pidato ilmiah dihadapan hadirin sekalian.

Penulis juga ingin menyampaikan ucapan dan terima kasih kepada segenap pendidik yang telah menempe penulis secara tulus, meliputi para guru di SD III Wonosobo, SMP I wonosobo, SMA I Wonosobo. Selain itu penulis secara khusus ingin menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada guru dan pembimbing kami

berikut: Dr. Sutrisno, Prof. Marsongkohadi (alm.), Prof. Haryadi P. Soepangkat, Prof. Barmawi, , Prof. Lilik Hendrajaya, Prof. Waloejo Loeksmanto, Drs. Hartono P., Prof. The How Liong, Prof. M.O. Tjia, Prof. Sriyatno (alm), dan Prof. P. Silaban.

Penulis juga ingin menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pada Guru dan Pembimbing serta kolega di Tokyo Institut of Technology : Prof. H. Sekimoto (Sudah pensiun dari Tokyo Institute of Technology, sekarang Prof. Tamu di universitas California Berkeley), Prof. M. Aritomi, Prof. Inoue (Sudah pensiun dari Tokyo Institute of Technology), Prof. T. Obara, Prof. M. Igashira, Prof. Takahashi, Prof. Saito, Prof. Y. Fujiie dan Prof. Fujii (sudah pensiun dan eks direktur dari RNLK Tokyo Tech), Prof. Takaki Naoyuki (Universitas Tokai, jepang), dan juga Dr. Liem Peng Hong (NAIS Jepang). Penulis juga tak lupa menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pada para kolega di program kerjasama IAEA dan dalam bidang riset terkait reaktor maju Dr. V.V. Kuznetsov (sudah pensiun dari Direktur NTPDS IAEA), Prof. GI Toshinsky (IPPE Rusia), Dr. David Wade (sudah pensiun dari Argon National Laboratory), Prof. Y. Shimazu (Sudah Pensiun dari Hokkaido University), Prof. M.S. Kazimi (MIT), Prof. Ehud Greenspan (Univ. California Berkeley), Dr. Tsuchihashi, Dr. Nakagawa, Dr. Takano (Sudah Pensiun dari JAERI), Prof. Artisyuk (OINPE Obninsk-Rusia).

Terima kasih juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan Dr. Abdul

Waris, Dr. Rijal Kurniadi, Dr. Idam Arif, Dr. Siti Nurul Khatimah, Dr. Widayani, Dr. Khairul Basar, Drs. Novitrian MS, Dr. Sparisoma Viridi, Dr. Freddy Haryanto, Dr. Rena Widita, Dr. Sidik Permana atas kerjasamanya dalam pengembangan KK Fisika Nuklir dan Biofisika. Selain itu ucapan terima kasih pada rekan-rekan Prof. Sukirno(alm.), Prof. Freddy P. Zen, Prof. Doddy Sutarno, Prof. Mikrajuddin, Prof. Khairurrijal, Dr. Maman Budiman Prof. Mitra Djamal, Prof. Triyanta, Prof. Toto Winata, Prof. Satria B., Dr. Umar F. Dr. Herman, dan para dosen di Fisika dan FMIPA ITB khususnya Prof. Akhmaloka, Prof. Pudji Astuti, Prof. Bukhori, Prof. Edi Tri Baskoro, Prof. Edy Soewono, Prof. Hendra Gunawan, Para anggota Senat FMIPA ITB, serta para anggota Komisi Penelitian ITB atas kerjasamanya dalam membangun ITB.

Penulis juga ingin menyampaikan terima kasih pada rekan-rekan peneliti dari berbagai lembaga yang banyak menjalin kerjasama dengan penulis dalam riset di bidang nuklir seperti : Dr. Asnatio Lasman (BAPETEN), Dr. Bakrie Arbie (BATAN), Dr. Sedyartomo Soentono (alm) (BATAN), Ir. Iyos Subki (Purnabakti BATAN), Dr. Hudi hastowo (BATAN), Ir. Adi Wardoyo(BATAN), Dr. Ferhat Aziz (BATAN), Dr. Wahyu (BATAN), Dr. Setiyanto (BATAN), Dr. Dhandhang Purwadi (BATAN), Ibu Yenny (BATAN), Ir. Zuhair M.Eng.(BATAN), Dr. Syamsa (RISTEK), dan Dr. Evvy Kartini (BATAN).

Terimakasih dan doa penulis sampaikan kepada orang tua penulis Ayahanda Salim (alm.) dan Ibunda Sundusah yang dengan kasih sayang

dan penuh pengorbanan serta doa mendidik penulis tak henti hentinya. Demikian juga kepada mertua penulis Bapak ervan Soemantri (alm) dan Ibu Siti Khadijah ((alm), penulis juga menyampaikan terima kasih dan doa. Juga kepada seluruh kakak dan adik penulis yang senantiasa memberikan dukungan kepada penulis.

Selanjutnya secara tulus dan cinta penulis mengucapkan terima kasih kepada istri tercinta Astining Wahjoeniarty, atas dukungan sepenuhnya dengan penuh kesabaran, cinta, semangat, konsistensi dan optimisme kepada penulis. Serta kepada anakanda tercinta Nabila Syahidah, Burhan Izzudin, Muhammad Mujtahid, dan Ibrahim Abul Aziz yang telah ikut membangun atmosfer keluarga yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. "International Energy Outlook 2010", DOE/EIA-0484(2010), <http://www.eia.gov/oiaf/ieo/world.html>
2. IEA:"Projected Costs of Generating Electricity: 2010 Edition", www.iea.org/Textbase/npsum/ElecCost2010SUM.pdf
3. IAEA TECDOC No. 1536: Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling, 2007
4. Fred R. Mynatt, et al., DESIGN AND LAYOUT CONCEPTS FOR COMPACT, FACTORY-PRODUCED, TRANSPORTABLE, GENERATION IV REACTOR SYSTEMS, NUCLEAR ENERGY

RESEARCH INITIATIVE (NERI) PROGRAM GRANT NUMBER DE-FG07-00SF22168, FINAL REPORT, 2003

5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of Advanced Light Water Reactor Designs 2004, IAEA-TECDOC-1391, Vienna (May 2004).
6. DOE: GEN IV Nuclear energy System, <http://www.ne.doe.gov/geniv/neGenIV1.html>
7. Zaki S. and H. Sekimoto: Preliminary Design Study of the Ultra Long Life Fast Reactor, Nuclear Engineering and Design, Vol. 140(1993), p.251-260.
8. H. Sekimoto and Zaki S., Design Study of Lead and Lead-bismuth Cooled Small Long-life Nuclear Power Reactors Using Metallic and Nitride Fuel, Nuclear Technology, Vol. 105, no.3 (1995).
9. Zaki S. and H. Sekimoto: Safety Aspect of Long Life Small Safe Power Reactors, Annals of Nuclear Energy (1995).
10. Zaki S. and H. Sekimoto: Design and Safety Aspect of Lead and Lead Bismuth Cooled Long-Life Small-safe Fast Reactor for Various Core Configuration, Journal of Nuclear Science and Technology 32/9 (1995).
11. Zaki S. and H. Sekimoto: Accident Analysis of lead or lead-bismuth Cooled Small Safe Long-life Fast Reactor Using Metallic or Nitride fuel, Nuclear Eng. And Design 162(1996), p. 205-222.
12. Zaki S.: Comparative Study on Safety Performance of Nitride Fueled Lead-Bismuth Cooled Fast Reactor with Various Power Level", Progress of Nuclear Energy, Vol.32, No. 3/4(1998) pp. 571~577.

13. Zaki Su'ud, PROSPECT OF NUCLEAR POWER REACTORS DEPLOYMENT IN INDONESIA, IAEA Technical Meeting on Small and Medium Sized Reactors, Vienna, June 7-11, 2004.
14. Zaki Su'ud: "Small and Very Small Liquid Metal Cooled Nuclear Reactors For The Use in Indonesia", IAEA Consultation Meeting on Small Reactor without On site Refueling, Vienna, March 15-17, 2004.
15. Zaki Su'ud : " Design Study of Small Pb-Bi Cooled Non-Refueling Nuclear Power Reactors (SPINNOR)", Proceeding of GLOBAL 2005 Conference, October 9-13, Tsukuba 2005.
16. " SMALL AND VERY SMALL Pb-Bi COOLED NO ON SITE REFUELING NUCLEAR POWER REACTORS (SPINNOR and VSPINNOR)", IAEA TECDOC 1536 (2007), p.739-759
17. Zaki Su'ud: "Advanced SPINNORs Concept and The Prospect of Their Deployment in Remote Area", ICANSE 2007 Conference, 13-14 November 2007, Grand Aquila Hotel, Bandung, Indonesia
18. Zaki S, Neutronic Performance Comparison of MOX, Nitride and Metallic fuel based 25-100 MWe Pb-Bi Cooled Long Life Fast Reactors without on site Refuelling, Progress of Nuclear Energy, Vol. 50 (2008), p. 276-278
19. Zaki S, Safety Performance Comparison of MOX, Nitride and Metallic fuel based 25-100 MWe Pb-Bi Cooled Long Life Fast Reactors without on site Refuelling, Progress of Nuclear Energy, Vol. 50 (2008), p. 157-162
20. Zaki Su'ud, "Transient Analysis in Long Life Liquid Metal Cooled Fast Reactors", IAEA Consultation Meeting on Small Reactor without On

site Refueling, Vienna, March 15-17, 2004.

21. Zaki Su'ud, "QUASISTATIC SAFETY ANALYSIS FOR REACTIVITY FEEDBACK BASED INHERENTLY SAFE FAST REACTORS", IAEA Technical Meeting on Small and Medium Sized Reactors, Vienna, June 7-11, 2004.
22. Zaki Su'ud, "LOCAL BLOCKAGE ANALYSIS OF LEAD COOLED NEXT GENERATION NUCLEAR POWER REACTORS", IAEA Technical Meeting on Small and Medium Sized Reactors, Vienna, June 7-11, 2004.
23. Zaki Su'ud et al., FP Group Constant Treatment For Long Life Pb-Bi Cooled Fast Power Reactors, International Journal of Nuclear Energy Science and Technology(IJNEST) Vol. 4 no. 3 (2009), p 201-216
24. Zaki Su'ud, "Performance of Benchmark Analysis for PbBi/Pb Cooled Long Life Cores of Small Reactors Without On-site Refueling and Optimization of their inherent/passive safety performance.", IAEA Research Coordinative Meeting, Vienna, 21-25 November 2005.
25. Eka S and Zaki S : "Design Study of Thorium Cycle Based Tight Lattice Long Life BWR", Proceeding of GLOBAL 2005 Conference, October 9-13, Tsukuba 2005.
26. Topan S, S.M. Nurul, Y. Astuti and Zaki S: Neutronic Design Study of Small Long Life PWR with (Th,U) O₂ fuel", Proceeding of GLOBAL 2005 Conference, October 9-13, Tsukuba 2005.
27. Iyos Subki, Asril P, SNM Rida, Zaki S, Eka SR, Muh. Nurul S., Topan, Yuli A., Sedyartomo S.: The Utilization of Thorium for Long Life Small Thermal Reactors Without On-Site Refueling, Progress of Nuclear

Energy, Vol. 50 (2008), p. 152-156

28. Zaki Su'ud, Bakrie Arbie, and Sedyartomo S.: "The Prospect of MOX Fuel Based Pb-Bi Cooled Small Nuclear Power Reactors', Progress of Nuclear Energy, Vol. 47, h.212-221, 2005.
29. Zaki Su'ud and H. Sekimoto: OPTIMIZATION OF MODIFIED CANDLE BURNUP SCHEME BASED LONG LIFE Pb-Bi COOLED FAST REACTOR WITH NATURAL URANIUM AS FUEL CYCLE INPUT , to be presented in Pacific Basin Nuclear Conference 2008, Japan
30. H. SEKIMOTO, Light a CANDLE An Innovative Burnup Strategy of Nuclear Reactors, COE INES, Research Lab. For Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology, Japan.
31. H. Sekimoto, et al, "CANDLE: The New Burnup Strategy", Nuclear Science and Engineering, 139, 1-12 (2001)
32. H. Sekimoto and S. Miyashita, "Startup of CANDLE Burnup in Fast Reaktor from Enriched Uranium Core", Proc. F 12th n. Cnf. On Emerging Nuclear Energy Sistem (ICENES 2005), Aug. 21-26, 2005, SCK.CEN, Mol., Brussels, Belgium
33. Y. Ohoka and H. Sekimoto, "Application of CANDLE Burnup to Block Type High Temperature Gas Cooled Reaktor ", Nuclear Engineering and Design, 229, 15-23 (2004)
34. Y. Ohoka and H. Sekimoto, "Application of CANDLE Burnup to Block Type High Temperature Gas Cooled Reaktor for Incenerating Weapon Grade Plutonium", Proc. Of GENES 4/ANP 2003, Sept. 15-19, Kyoto, Japan

CURRICULUM VITAE

35. Rida Siti NM and Zaki Su'ud, Design Study of Pb-Bi Cooled Fast Reactors Which Fuel Cycle Input is Natural Uranium, International Journal of Nuclear Energy Science and Technology(IJNEST) Vol. 4 no. 3(2009), p 217-222
36. Zaki Su'ud and H Sekimoto, Design study of long-life Pb-Bi cooled fast reactor with natural uranium as fuel cycle input using modified CANDLE burn-up scheme,, IJNEST, Vol 5, No. 4, 2010, p.347-368



Nama : **ZAKI SU'UD**
Tempat lahir : Wonosobo
Tanggal lahir : 12 Desember 1962
Alamat Kantor : GKK Fisika Nuklir dan
Biofisika Gedung Fisika,
Jl. Ganesa 10, Bandung 40132

Nama Istri : Astining Wahjoeniarty

Nama Anak : Nabila Syahidah

Burhan Izzudin

Muhammad Mujtahid

Ibrahim Abdul Aziz

RIWAYAT PENDIDIKAN:

- Sarjana Fisika ITB, Bandung, 1986
- Master of Engineering, Nuclear Engineering Dept., Tokyo Institute of Technology, 1992
- Doctor of Engineering, Nuclear Engineering Dept., Tokyo Institute of Technology, 1995

RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli, 1 Desember 1993
- Lektor Muda, 1 Mei 1996
- Lektor, 1 Agustus 2000

- Inpassing Lektor Kepala, 1 Januari 2001
- Guru Besar, 1 Juli 2010

PENGHARGAAN

- Satyalancana Karya Satya 10 tahun Presiden RI, 2003

RIWAYAT JABATAN DI ITB

- 1987-sekarang Staf Pengajar FMIPA ITB
- 2005-sekarang Ketua KK Fisika Nuklir dan Biofisika
- 2005-sekarang Anggota Senat FMIPA ITB
- 2008-sekarang Anggota Komisi Penelitian ITB

RISET, PENGAKUAN, DAN PENGALAMAN AKADEMIK

LAINNYA

- Lebih dari 20 hibah penelitian sejak 1995
- IAEA CRP Project 2004-2009
- Referee dari berbagai jurnal internasional seperti Nuclear Technology, Annals of Nuclear Energy, Energy Conversion and Management, Applied Radiation and Isotopes, Progress in Nuclear energy, Flow Measurement and Instrumentation, dll.
- Membimbing lebih dari 90 mahasiswa terdiri dari 45 mahasiswa S1, 30 mahasiswa S2 dan 8 mahasiswa S3
- Telah mengembangkan lebih dari 10 program/code untuk analisa PLTN generasi lanjut
- Telah mempublikasikan lebih dari 200 paper di jurnal internasional, Jurnal nasional, konferensi internasional, dan konferensi nasional,

dengan 41 buah tercatat di SCOPUS, dengan indeks sitasi 139

- Ketua Penyelenggara : Annual Physics Seminars (2000-2002), Tokyo Tech – Indonesia Seminar 2005, International Conference on Advanced in Nuclear Science and Technology 2007 (ICANSE 2007), International Conference on Advanced in Nuclear Science and Technology 2009 (ICANSE 2009)(Prosiding diterbitkan oleh AIP , International Conference on Advanced in Nuclear Science and Technology 2011 (ICANSE 2011), Editor dan Ketua Editor IJP (Indonesian journal of Physics) sejak 2004.

PUBLIKASI (SELECTED)

- **Zaki S** and H. Sekimoto: A concept of Long Life Small Safe Fast Reactors, SR/TIT 91, Elsevier, 1992.
- **Zaki S.** and H. Sekimoto: Preliminary Design Study of the Ultra Long Life Fast Reactor, Nuclear Engineering and Design, Vol. 140(1993), p.251-260.
- H. Sekimoto and **Zaki S.** , Design Study of Lead and Lead-bismuth Cooled Small Long-life Nuclear Power Reactors Using Metallic and Nitride Fuel, Nuclear Technology, Vol. 105, no.3 (1995).
- **Zaki S.** and H. Sekimoto: Safety Aspect of Long Life Small Safe Power Reactors, Annals of Nuclear Energy (1995).
- **Zaki S.** and H. Sekimoto: Design and Safety Aspect of Lead and Lead Bismuth Cooled Long-Life Small-safe Fast Reactor for Various Core Configuration, Journal of Nuclear Science and Technology 32/9 (1995).
- **Zaki S.** and H. Sekimoto: Accident Analysis of lead or lead-bismuth

Cooled Small Safe Long-life Fast Reactor Using Metallic or Nitride fuel, Nuclear Eng. And Design 162(1996), p. 205-222.

- **Zaki S.:** Comparative Study on Safety Performance of Nitride Fueled Lead-Bismuth Cooled Fast Reactor with Various Power Level", Progress of Nuclear Energy, Vol.32, No. 3/4(1998) pp. 571~577.
- Rizal Kurniadi, Marsongkohadi, **Zaki Su'ud**, dan Triyanta: An Alternative Calculation Technique in the Generator-Coordinate Method(GCM) to Determine the Ground State Energies of 2H and 4He and the Electric Quadrupole Moment of 2H (Nuclear Science and Technology, 2001.
- Marsodi, A. Lasman, K.Nishihara, T. Osugi, K. Tsujimoto, Marsongkohadi, **Zaki Su'ud**: 'Burnup Characteristics of ADS System Utilizing The Fuel Composition from MOX PWR's Spent Fuel', Annal of Nuclear Energy, Vol. 29, No. 18, Tahun 2002, hal. 2173-2186.
- **Zaki Su'ud**: "Small and Very Small Liquid Metal Cooled Nuclear Reactors For The Use in Indonesia", IAEA Consultation Meeting on Small Reactor without On site Refueling, Vienna, March 15-17, 2004.
- **Zaki Su'ud**, "Transient Analysis in Long Life Liquid Metal Cooled Fast Reactors", IAEA Consultation Meeting on Small Reactor without On site Refueling, Vienna, March 15-17, 2004.
- **Zaki Su'ud**, "QUASISTATIC SAFETY ANALYSIS FOR REACTIVITY FEEDBACK BASED INHERENTLY SAFE FAST REACTORS", IAEA Technical Meeting on Small and Medium Sized Reactors, Vienna, June 7-11, 2004.
- **Zaki Su'ud**, PROSPECT OF NUCLEAR POWER REACTORS DEPLOYMENT IN INDONESIA, IAEA Technical Meeting on Small and Medium Sized Reactors, Vienna, June 7-11, 2004.

- **Zaki Su'ud**, "LOCAL BLOCKAGE ANALYSIS OF LEAD COOLED NEXT GENERATION NUCLEAR POWER REACTORS", IAEA Technical Meeting on Small and Medium Sized Reactors, Vienna, June 7-11, 2004.
- **Zaki Su'ud**, Bakrie Arbie, and Sedyartomo S.: "The Prospect of MOX Fuel Based Pb-Bi Cooled Small Nuclear Power Reactors", Progress of Nuclear Energy, Vol. 47, h.212-221, 2005.
- **Zaki Su'ud**, "Performance of Benchmark Analysis for PbBi/Pb Cooled Long Life Cores of Small Reactors Without On-site Refueling and Optimization of their inherent/passive safety performance.", IAEA Research Coordinative Meeting, Vienna, 21-25 November 2005.
- **Zaki S** as contributor in "SMALL AND VERY SMALL Pb-Bi COOLED NO ON SITE REFUELING NUCLEAR POWER REACTORS (SPINNOR and VSPINNOR)", IAEA TECDOC 1536 (2007), p.739-759
- **Zaki S**, Neutronic Performance Comparison of MOX, Nitride and Metallic fuel based 25-100 MWe Pb-Bi Cooled Long Life Fast Reactors without on site Refuelling, Progress of Nuclear Energy, Vol. 50 (2008), p. 276-278
- **Zaki S**, Safety Performance Comparison of MOX, Nitride and Metallic fuel based 25-100 MWe Pb-Bi Cooled Long Life Fast Reactors without on site Refuelling, Progress of Nuclear Energy, Vol. 50 (2008), p. 157-162
- Dian F, **Zaki S**, Epung S, Marsongkohadi, Design And Safety Optimization On Ship Based Small Nuclear Power Reactors, Progress of Nuclear Energy, Vol. 50 (2008), p. 299-303

- Alan M, **Zaki S**, K.D. Hermawan, Khairurijal: Simulation Study of Steels Corrosion Phenomena in Liquid Lead-Bismuth Cooled Reactors Using Molecular Dynamic Methods, *Progress of Nuclear Energy*, Vol. 50 (2008), p. 616-620.
- Epung S.B. **Zaki S**, Abdul Waris, Bambang A.W., Dian F: Reactor Core Design Optimization Of The 200 MWt Pb-Bi Cooled Fast Reactor for Hydrogen Production, *Progress of Nuclear Energy*, Vol. 50 (2008), p. 434-437.
- Iyos Subki, Asril P, SNM Rida, **Zaki S**, Eka SR, Muh. Nurul S., Topan, Yuli A., Sedyartomo S.: The Utilization of Thorium for Long Life Small Thermal Reactors Without On-Site Refueling, *Progress of Nuclear Energy*, Vol. 50 (2008), p. 152-156
- **Zaki Su'ud** et al , FP Group Constant Treatment For Long Life Pb-Bi Cooled Fast Power Reactors, *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology(IJNEST)* Vol. 4 no. 3 (2009), p 201-216
- Rida Siti NM and **Zaki Su'ud**, Design Study of Pb-Bi Cooled Fast Reactors Which Fuel Cycle Input is Natural Uranium, *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology(IJNEST)* Vol. 4 no. 3 (2009), p 217-222
- **Zaki Su'ud**: Current Status of SPINNORs Design, *International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering (ICANSE) 2009 conference*, Grand Aquila Hotel, November 3-4, 2009, Prosiding sedang dalam proses publikasi oleh American Institute of Physics (AIP)
- Yanti Yulianti, **Zaki Su'ud**, A Waris, SN Khatimah, Iterative methods for solving space-time one-dimensional multigroup diffusion equations, *IJNEST*, Vol 5, No. 2, 2010

- **Zaki Su'ud** and H. Sekimoto, Local Blockage analysis of Lead-Cooled Next Generation Nuclear Power Reactors, *2010 Int. Journal of Nuclear Energy science and Technology*, Vol. 5, No.2, 2010
- Sugiharto, S., **Zaki Su'ud**, Kurniadi, R., Wibisono, W., Abidin, Z, Radiotracer method for residence time distribution study in multiphase flow system, *Applied Radiation and Isotopes* 67 (7-8), pp. 1445-1448
- **Zaki Su'ud** and H Sekimoto, Design study of long-life Pb-Bi cooled fast reactor with natural uranium as fuel cycle input using modified CANDLE burn-up scheme, *IJNEST*, Vol 5, No. 4, 2010, p.347-368
- Y. Yulianti, **Zaki Su'ud**, A. Waris and S.N. Khotimah, Solving two-dimensional space-time dependent multi-group diffusion equations with SOR method, *IJNEST*, Vol 5, No. 4, 2010, p.310-320
- **Zaki Su'ud**, Semi Analytical Analysis of Steady State Condition of Steam Generator, INTECH Publisher, 2011