

## DISTRIBUSI FLUKS NEUTRON SEBAGAI FUNGSI *BURN-UP* BAHAN BAKAR PADA REAKTOR KARTINI

Fatkhayatul Athiqoh<sup>1)</sup>, Wahyu Setia Budi<sup>1)</sup>, Choirul Anam<sup>1)</sup> dan Tri Wulan Tjiptono<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

<sup>2)</sup>BATAN, Yogyakarta

### ABSTRACT

The effective multiplication factor ( $k_{eff}$ ) and the flux distribution in the Kartini reactor which used Uranium Zirconium Hydride (UZrH) as fuel, pure water ( $H_2O$ ) as moderators and cooland has been analyzed using Monte Carlo simulation. The flux distribution analyzed by splitting core reactor become 5 rings (B, C, D, E and F). The effective multiplication factor ( $k_{eff}$ ) and flux distribution calculated by MCNP 4C with burn-up variation 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, 15%. The result shows that the critical condition obtained from burn-up rate 0% up to 5%. The highest value of flux distribution in the middle, at ring B and the value gets smaller towards to edge of reactor core.

Keywords : flux distribution,  $k_{eff}$ , MCNP, Kartini reactor

### ABSTRAK

Telah dilakukan analisis faktor pelipatan efektif ( $k_{eff}$ ) dan distribusi fluks neutron pada reaktor Kartini untuk bahan bakar Uranium Zirconium Hidrida (UZrH) dengan moderator dan pendingin air murni bebas mineral ( $H_2O$ ), menggunakan simulasi Monte Carlo. Analisis distribusi fluks neutron dilakukan dengan membagi teras menjadi 5 ring (yaitu ring B, C, D, E dan F). Perhitungan faktor pelipatan efektif ( $k_{eff}$ ) dan distribusi fluks neutron dilakukan menggunakan MCNP 4C dengan variasi tingkat burn-up bahan bakar 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, 15%. Didapatkan hasil bahwa kondisi kritis reaktor Kartini diperoleh dari tingkat burn-up 0% hingga 5%. Nilai distribusi fluks neutron pada reaktor Kartini tertinggi pada tengah teras, yaitu ring B dan nilainya semakin kecil ke arah pinggir teras reaktor.

Kata kunci : distribusi fluks neutron,  $k_{eff}$ , MCNP, reaktor Kartini

### PENDAHULUAN

Reaktor nuklir merupakan suatu tempat yang didesain secara khusus sedemikian sehingga di dalamnya dapat terjadi reaksi pembelahan inti secara berantai [1]. Di dalam reaktor terjadi reaksi pembelahan inti, setelah bahan bakar fisil bereaksi dengan neutron termal. Setiap reaksi pembelahan akan menghasilkan neutron baru. Neutron ini dapat melanjutkan reaksi pembelahan dengan inti bahan fisil, sehingga reaksi inti berantai dapat terjadi [1,2].

Perbandingan antara neutron baru yang dihasilkan dari reaksi pembelahan dengan neutron sebelumnya disebut faktor pelipatan neutron ( $k_{eff}$ ). Reaktor disebut kritis jika  $k_{eff}$  sama dengan 1, dan disebut subkritis jika  $k_{eff}$  lebih kecil dari 1. Sedangkan jika  $k_{eff}$  lebih besar dari 1 disebut super kritis. Pada kondisi kritis, reaksi berantai dapat terjadi terus dan dalam keadaan aman. Jika reaktor pada keadaan subkritis, maka reaktor segera padam dan jika reaktor pada keadaan super kritis

maka jumlah neutron akan bertambah dengan cepat dan dapat menimbulkan kecelakaan [2]. Reaktor harus dijaga berada pada kondisi kritis selama reaktor beroperasi, yaitu nilai faktor pelipatan efektifnya adalah satu.

Setelah reaktor beroperasi selama jangka waktu tertentu, maka akan terjadi pengurangan atau penyusutan bahan bakar. Penyusutan bahan bakar akan menyebabkan jumlah reaksi fisi yang terjadi berkurang dan neutron yang dihasilkan pada tiap siklus juga akan berkurang. Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan nilai faktor pelipatan efektif dan juga distribusi fluks neutron pada berbagai tingkat *burn-up* bahan bakar untuk memantau berlangsungnya operasi reaktor.

Dalam penelitian ini digunakan program MCNP 4C. Program MCNP 4C menggunakan metode Monte Carlo yang bersifat acak. Program ini melakukan simulasi perjalanan hidup neutron mulai dari neutron

tersebut lahir sampai neutron tersebut diserap oleh material penyusun teras reaktor.

**DASAR TEORI**

**Reaksi Fisi**

Reaksi fisi adalah suatu reaksi pembelahan inti atom, yang disebabkan oleh neutron. Dalam reaksi pembelahan, neutron ditangkap oleh inti atom dan menghasilkan suatu inti atom majemuk yang bersifat sangat tidak stabil. Dalam waktu yang sangat singkat, inti atom majemuk ini akan membelah menghasilkan 2 bagian utama dan kira-kira 2 sampai 3 neutron baru [3]. Reaksi fisi dapat terjadi ketika neutron yang menumbuk inti atom adalah neutron dengan energi sekitar 0,025 eV [1]. Dalam reaktor, jumlah neutron hasil reaksi fisi harus dibatasi sehingga hanya satu neutron saja yang akan diserap untuk reaksi fisi selanjutnya.

Neutron sendiri merupakan partikel tidak bermuatan. Oleh karena itu neutron bebas mendekati, bahkan masuk ke inti atom ataupun menembusnya. Berdasarkan tingkatan energinya, neutron dibedakan menjadi 4, yaitu, neutron *thermal*, neutron *intermediate* atau neutron resonansi atau neutron lambat, neutron cepat (*fast neutron*) dan neutron relativistik [4]. Dalam sistem reaktor neutron termal mempunyai peran penting, sebab bahan bakar yang digunakan dalam teras yaitu  ${}_{92}\text{U}^{235}$  hanya dapat membelah dengan neutron termal.

**Persamaan Difusi Neutron**

Neutron dalam reaktor mengalami tumbukan-hamburan dan karenanya neutron selalu berpindah-pindah tempat dari satu titik hamburan ke titik hamburan berikutnya sampai akhirnya neutron mengalami reaksi serapan. Proses perpindahan neutron ini disebut proses transport.

Persamaan yang menggambarkan proses transport secara lengkap disebut persamaan transport. Suatu bentuk pendekatan yang paling sederhana terhadap teori transport disebut teori difusi [5]. Persamaan transport ini merupakan persamaan tentang kesetimbangan neutron. Untuk reaktor kritis, jumlah neutron sebelum dan sesudah reaksi harus sama. Persamaan umum difusi pada

saat sistem dalam keadaan seimbang dapat dituliskan:

$$\text{produksi} - \text{kebocoran} - \text{penyerapan} = 0 \quad (1)$$

$$S - \Sigma_a \phi + D \nabla^2 \phi = 0 \quad (2)$$

**Faktor Perlipatan Neutron**

Faktor perlipatan  $k$ , bagi suatu reaktor didefinisikan sebagai perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan dalam suatu pembangkitan dibagi dengan jumlah neutron yang dihasilkan pada pembangkitan sebelumnya [6]. Perbandingan jumlah neutron ini diharapkan bernilai satu sehingga reaktor berada dalam kondisi kritis.

Faktor perlipatan tak hingga ( $k_\infty$ ) merupakan perbandingan antara neutron yang diproduksi oleh pembelahan di dalam satu generasi dengan jumlah neutron yang hilang melalui penyerapan generasi sebelumnya. Faktor perlipatan yang memperhitungkan kebocoran adalah faktor perlipatan efektif ( $k_{eff}$ ) yang didefinisikan sebagai perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan oleh fisi pada satu generasi dengan jumlah neutron yang hilang melalui penyerapan dan kebocoran pada generasi berikutnya [7]. Jadi faktor perlipatan neutron efektif menunjukkan perbandingan jumlah neutron dalam dua generasi yang berurutan.

$$k_{eff} = \frac{\varepsilon p f \eta}{1 + L^2 \left\{ \left( \frac{2,405}{R} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{H} \right)^2 \right\}} e^{- \left\{ \left( \frac{2,405}{R} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{H} \right)^2 \right\} \tau} \quad (3)$$

dengan  $\varepsilon$  : faktor fisi cepat

$p$  : probabilitas tangkapan resonansi

$f$  : faktor pemanfaatan termal

$\eta$  : faktor reproduksi

$B$  : kelengkungan teras reaktor (cm)

$L$  : panjang difusi (cm)

$\tau$  : umur Fermi (cm<sup>2</sup>)

**Fraksi Bakar (*Burn-up*)**

*Burn-up* (fraksi bakar) bahan bakar didefinisikan sebagai berikut [8]:

1. *Burn-up* adalah energi yang dibebaskan selama pembakaran dalam reaktor dan dinyatakan dalam Mega watt days per ton.
2. *Burn-up* adalah kerapatan pembelahan yang dinyatakan dalam cacah pembelahan per satuan volume atau satuan berat bahan bakar.
3. *Burn-up* adalah persen penurunan jumlah atom dapat-belah selama proses pembelahan.

Dalam penelitian ini definisi yang digunakan adalah definisi nomer 3, yaitu bahwa massa bahan bakar Uranium akan berkurang selama proses pembelahan terjadi di dalam reaktor.

### Reaktor Kartini

Reaktor Kartini merupakan reaktor riset tipe TRIGA MARK II (*Training, Research and Isotop Production by General Atomic*) yang dimanfaatkan untuk pelayanan aktivasi/irradiasi neutron, pendidikan dan pelatihan serta penelitian dalam bidang teknologi nuklir.

Reaktor Kartini tersusun atas beberapa komponen peralatan yaitu, bahan bakar, batang kendali, reflektor, plat kisi, sistem pendingin reaktor, penukar panas [9]. Dalam konfigurasi saat ini, teras reaktor Kartini memuat 69 elemen bakar serta 3 batang kendali yang menempati posisi C2, C6, dan E19. Posisi di tengah-tengah teras adalah *central thimble*. Posisi di ring terluar selain yang berisi elemen bakar berisi tabung pneumatik, sumber neutron dan elemen bakar tiruan.

### MCNP (*Monte Carlo for Neutron and Particle*)

Monte Carlo merupakan metode yang digunakan untuk mensimulasikan suatu proses stokastik. Metode Monte Carlo dapat digunakan untuk menduplikasi proses statistik (seperti interaksi partikel dengan bahan nuklir) dan berbagai masalah kompleks yang tidak dapat dikerjakan dengan metode *deterministik*.

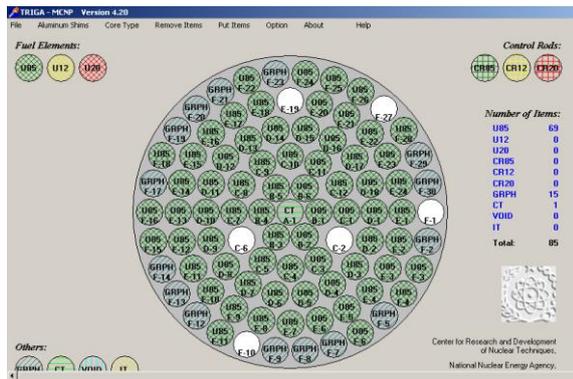
MCNP tidak secara langsung menghitung nilai faktor perlipatan  $k_{eff}$ , melainkan pada setiap akhir satu generasi akan dihasilkan 3 nilai  $k_{eff}$  yang berbeda yang disebut estimator. Ketiga estimator tersebut, yaitu:

1. Estimator tumbukan ( $k_{eff}^C$ ) adalah jumlah neutron yang dihasilkan dari seluruh proses fisi karena tumbukan, atau merupakan jumlah rata-rata neutron fisi yang dihasilkan tiap siklus melalui proses tumbukan.
2. Estimator serapan ( $k_{eff}^A$ ) yang dihitung setiap terjadi interaksi antara neutron dengan bahan dapat belah selama satu generasi neutron.
3. Estimator panjang jejak ( $k_{eff}^{TL}$ ) yang dihitung setiap kali neutron berpindah tempat di dalam bahan dapat belah pada suatu jarak tertentu dari posisi semula.

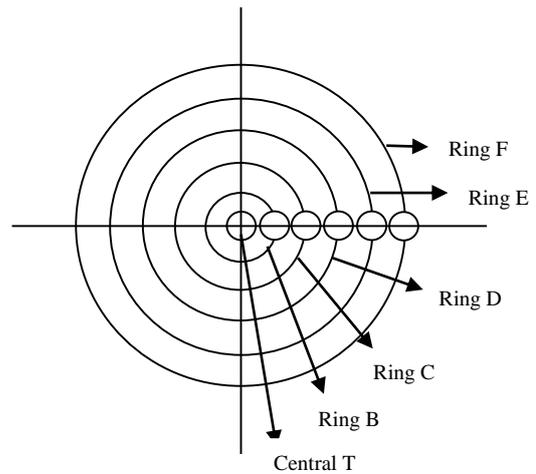
Dalam metode Monte Carlo, untuk mendapatkan parameter fluks neutron digunakan estimasi panjang lintasan (*track-length estimation*). Disebut estimasi panjang lintasan karena estimasi ini memanfaatkan panjang lintasan neutron dalam reaktor selama simulasi monte carlo berlangsung [10]. Dalam hal perhitungan fluks neutron menggunakan metode Monte Carlo, kebolehjadian partikel neutron berinteraksi dengan media ditentukan secara acak oleh pembangkit bilangan acak setelah densitas materi diketahui dari masukan programnya. Cacah partikel neutron yang melewati suatu lokasi tertentu dihitung, jumlah cacah neutron ini merupakan fluks neutron pada titik yang diamati.

### METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan program MCNP 4C untuk menghitung  $k_{eff}$  dan distribusi fluks neutron; dan program TrigaMCNP untuk membangkitkan *input* untuk program MCNP 4C.



Gambar 1. Konfigurasi teras reaktor Kartini pada program TrigaMCNP [11]



Gambar 2. Pembagian ring pada teras reaktor Kartini

Tabel 1. Spesifikasi bahan bakar reaktor Kartini [11]

Parameter	Dimensi
Panjang total	75 cm
Panjang bahan bakar aktif	38,1 cm
Panjang reflektor grafit atas	6,6 cm
Panjang reflektor grafit bawah	9,39 cm
Diameter luar bahan bakar	3,73 cm
Lapisan racun dapat bakar	0,0787 cm
Berat kandungan U <sup>235</sup>	38 gram
Komposisi bahan bakar	UZrH
Material kelongsong	SS-304
Tebal kelongsong	0,05 cm

Konfigurasi reaktor untuk menghitung  $k_{eff}$  dan distribusi fluks neutron digunakan program TrigaMCNP. Selanjutnya, dilakukan pengaturan variabel yang akan disimulasikan. Untuk konfigurasi teras reaktor Kartini dapat dilihat pada gambar 1. Pada penelitian ini, dilakukan variasi *burn-up* bahan bakar 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, 15%. Sementara parameter lain, digunakan dimensi bahan bakar sesuai dengan kondisi referensi, seperti terlihat pada Tabel 1.

Sementara untuk menentukan distribusi fluks neutron, dilakukan pengukuran pada jarak radial tertentu. Teknisnya teras dibagi menjadi 5 ring yaitu ring B, C, D, E dan F, seperti tampak pada Gambar 2.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Penentuan nilai $k_{eff}$

Penentuan nilai  $k_{eff}$  pada reaktor Kartini dilakukan dengan menggunakan program MCNP 4C, dengan variasi tingkat *burn-up* bahan bakar 0% sampai 15%. Hasil perhitungan program dapat dilihat pada Tabel 2.

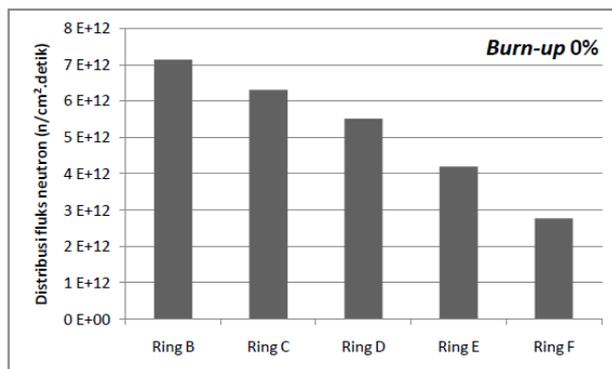
Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa nilai  $k_{eff}$  akan berkurang seiring dengan meningkatnya tingkat *burn-up* pada bahan bakar. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi tingkat *burn-up* maka akan berkurang massa dari bahan bakar. Semakin sedikit jumlah atom yang terkandung dalam bahan bakar, menyebabkan laju reaksi pembelahan semakin kecil sehingga neutron yang dihasilkan juga semakin berkurang. Kondisi kritis reaktor Kartini diperoleh sampai tingkat *burn-up* maksimal 5% yaitu sebesar 1,0070.

Tabel 2. Hasil perhitungan  $k_{eff}$

No	Tingkat <i>burn-up</i> (%)	$k_{eff}$
1	0,00	1,0199
2	2,50	1,0138
3	5,00	1,0070
4	7,50	0,9993
5	10,0	0,9910
6	12,5	0,9812
7	15,0	0,9632

### Distribusi Fluks Neutron

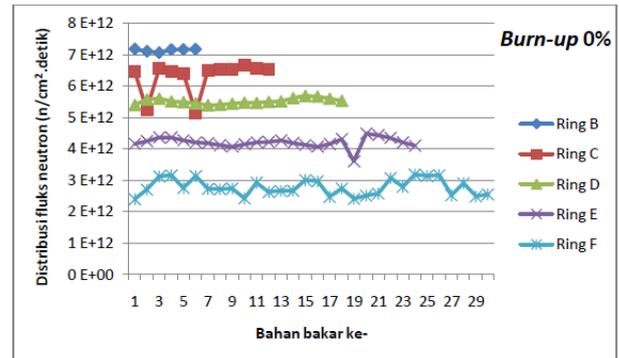
Penentuan distribusi fluks neutron pada elemen bahan bakar reaktor Kartini dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan reaktor akibat perubahan tingkat *burn-up* pada saat reaktor dioperasikan. Distribusi fluks neutron rata-rata untuk tingkat *burn-up* 0% dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik distribusi fluks neutron rata-rata tiap ring pada tingkat *burn-up* 0%

Berdasarkan Gambar 3, nilai distribusi fluks neutron tertinggi berada pada tengah teras reaktor yaitu ring B dan mengecil ke arah pinggir teras reaktor. Nilai distribusi fluks neutron pada ring B paling tinggi karena letaknya yang berada di tengah teras reaktor. Pada sekeliling teras reaktor dipasang reflektor berisi grafit yang berfungsi untuk memantulkan kembali neutron ke dalam teras reaktor untuk mengurangi bocoran neutron. Bentuk teras reaktor yang silinder, memungkinkan neutron yang menumbuk reflektor akan dipantulkan kembali ke tengah teras reaktor. Sehingga kemungkinan terbesar terjadinya reaksi fisi berantai berada di tengah teras reaktor.

Distribusi fluks neutron untuk masing-masing ring pada tingkat *burn-up* bahan bakar 0% dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik distribusi fluks neutron pada tingkat *burn-up* 0%

Gambar 4. menunjukkan bahwa distribusi fluks neutron paling besar terdapat pada ring B dan paling kecil pada ring F. Distribusi fluks neutron pada ring B dan D relatif homogen, karena semuanya berisi elemen bahan bakar. Sementara pada ring C yaitu pada ring C-2 dan C-6, distribusi fluks neutronnya lebih rendah dari rata-rata. Hal ini karena pada ring C-2 dan C-6 berisi air.

Program MCNP 4C menggambarkan ring yang berisi air sebagai moderator yang hanya dilewati neutron untuk menurunkan tingkat energi neutron untuk mencapai kondisi termal, sehingga nilai distribusi fluks yang terdeteksi pada ring tersebut sedikit. Pada ring E-19 nilainya lebih kecil dari rata-ratanya karena pada ring ini juga berisi air, sehingga distribusi fluks neutron yang terdeteksi sedikit. Pada ring F, nilai distribusi fluks neutronnya lebih bervariasi. Hal ini karena pada ring F diisi dengan elemen bahan bakar, elemen *dummy* yang berisi grafit dan air.

Besar fluks neutron yang telah ditentukan dapat digunakan untuk menghitung besarnya faktor puncak daya sebagai batas keselamatan reaktor. Faktor puncak daya merupakan perbandingan antara fluks neutron maksimum dengan fluks neutron rata-rata yang terjadi di dalam teras reaktor dan untuk batasan besarnya

$1 \leq$  faktor puncak daya  $\leq 1,5$ . [5]. Nilai faktor puncak daya ditunjukkan pada Tabel 3. Tampak bahwa nilai puncak daya lebih dari 1 dan kurang dari 1,5 pada tiap ring, angka ini menunjukkan bahwa reaktor masih aman dioperasikan.

**Tabel 3.** Nilai faktor puncak daya

Burn-up %	Ring B	Ring C	Ring D	Ring E	Ring F
0,00	1.0056	1.0599	1.0310	1.0682	1.1394
2,50	1.0173	1.0537	1.0398	1.0584	1.1452
5,00	1.0213	1.0667	1.0451	1.0742	1.1609
7,50	1.0185	1.0689	1.0457	1.0961	1.1650
10,0	1.0101	1.0688	1.0326	1.0721	1.1628
12,5	1.0110	1.0632	1.0457	1.0787	1.1732
15,0	1.0160	1.0598	1.0401	1.0943	1.1849

## KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa kondisi kritis reaktor Kartini didapatkan pada saat tingkat burn-up 5%, nilai  $k_{eff}$  sebesar 1,0070. Distribusi fluks neutron terbesar berada di tengah teras, dan nilai distribusi fluks neutron jaraknya semakin jauh dari pusat teras reaktor.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Krane K.S., 1992, *Fisika Modern*, Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta.
- [2]. Lamarsh J.R., 1965, *Introduction to Nuclear Theory*, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts.
- [3]. Kuntoro I., 2000, *Kumpulan Diktat Diklat Selingkung Penyegaran Operator dan Supervisor Reaktor*, Bidang Operasi Reaktor PUSBANG Teknologi Reaktor Riset BATAN, Serpong.
- [4]. Wardhana W.A., 2007, *Teknologi Nuklir, Proteksi Radiasi dan Aplikasinya*, Andi Offset, Yogyakarta.
- [5]. Glasstone S. dan Edlund M.C., 1952, *The Elements of Nuclear Reactor Theory*, D Van Nostrand Company, Inc, New York.

- [6]. Richardina V., 2009, *Studi Parameter Reaktor Berbahan Bakar  $UO_2$  dengan Moderator  $H_2O$  dan Pendingin  $H_2O$* , Skripsi S1 Jurusan Fisika Universitas Diponegoro, Semarang.
- [7]. Ridwan M. dkk., 1986, *Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Badan Tenaga Atom Nasional, Jakarta.
- [8]. Budhi W., 1999, *Penentuan Burn-up Bahan Bakar Reaktor Kartini berdasarkan Aktivitas Produksi Fisi  $Cs-137$* , Tesis Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- [9]. Widarto, 1997, *Operasi Reaktor Nuklir Kartini*, Badan Tenaga Atom Nasional, Yogyakarta.
- [10]. Briesmeister J.F., 2000, *MCNP<sup>TM</sup>-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version*, Los Alamos National Laboratory.
- [11]. BATAN, 2008, *Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Kartini Rev 7*, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB) BATAN, Yogyakarta.