

# **PENGEMBANGAN PROGRAM KOMPUTER PENDAR UNTUK PENENTUAN FLUKS NEUTRON, DAYA REAKTOR DAN BURNUP**

Tegas Sutondo, Syarip, Bambang Sumarsono, Heru Prayitno, Mudjilan\*

## **ABSTRAK**

**PENGEMBANGAN PROGRAM KOMPUTER “PENDAR” UNTUK PENENTUAN FLUKS NEUTRON, DAYA REAKTOR DAN BURNUP** Telah diselesaikan pembuatan dan pengujian Program komputer PENDAR. Program tersebut merupakan versi pertama yang ditulis dalam bahasa FORTRAN dan dimaksudkan sebagai bagian dari sistem kalibrasi fluks, daya serta pengelolaan bahan bakar didalam teras reaktor Kartini. Pengujian telah dilakukan dengan membandingkan terhadap hasil perhitungan program TRIGAP yang telah terverifikasi, untuk beberapa tingkat daya yang mencakup daya rendah hingga daya nominal yang diinginkan. Hasil pengujian menunjukkan hasil yang sangat memuaskan dan disimpulkan bahwa program tersebut dapat digunakan untuk memperbaiki akurasi hasil kalibrasi daya menggunakan metoda kalorimetri terutama pada tingkat daya rendah, serta pengelolaan bahan bakar didalam teras untuk reaktor riset, khususnya reaktor Kartini.

## **ABSTRACT**

**DEVELOPMENT OF THE COMPUTER CODE “PENDAR” TO DETERMINE THE NEUTRON FLUX, REACTOR POWER AND BURNUP.** A computer code named as PENDAR, was developed and tested. The code, first version, was written in FORTRAN, intended as part of flux and power calibration, and in-core fuel management systems of Kartini Reactor. Verification test has been performed by mean of benchmarking with a verified TRIGAP code, ranging from the low power to the postulated nominal power levels. The results show a very good agreement between them and it's concluded that the code can be used to improve the accuracy of power calibration obtained by calorimetrical method particularly at low power levels and the in-core fuel management for research reactors, especially for Kartini reactor.

## **PENDAHULUAN**

*Setting* atau penyesuaian skala pada meter daya terhadap daya termal yang dibangkitkan reaktor, ditetapkan berdasarkan hasil kalibrasi daya reaktor. Dengan demikian, akurasi data yang ditampilkan oleh meter daya sangat tergantung dari ketepatan hasil kalibrasi.

Kalibrasi yang lazim digunakan selama ini didasarkan pada metoda *kalorimetri* yang dapat dilakukan melalui 2 cara yaitu *Stasioner* dan *non stasioner*. Metoda *stasioner* didasarkan pada pengamatan laju alir (flow rate) dari pendingin primer serta

---

• Pusat Penelitian Pengembangan Teknologi Maju-Badan Tenaga Nuklir Nasional

perbedaan antara suhu masuk dan keluar reaktor dari pendingin, sedang metoda *non-stasioner* didasarkan pada pengamatan laju perubahan suhu air pendingin didalam tangki reaktor di mana sistem primer dimatikan.

Pengalaman pada reaktor Kartini selama ini menunjukkan bahwa metoda *stasioner* memberikan hasil yang kurang baik dibanding dengan metoda *non stasioner*, sekalipun metoda tersebut paling praktis dan cepat. Hal ini terjadi karena akurasi penunjukan *flow meter* serta *suhu* yang kurang baik, yang dimungkinkan karena belum terkalibrasinya peralatan tersebut secara baik dan perbedaan suhu suhu air yang masuk dan keluar reaktor yang relatif rendah (sekitar 2 °C) sehingga untuk kalibrasi meter daya pada reaktor Kartini selalu didasarkan pada metoda *non stasioner*.

Sekalipun demikian, akurasi dari metoda *non-stasioner* juga masih diragukan, mengingat pengulangan pengukuran sering memberikan hasil yang tidak konsisten. Hal ini terjadi karena pada tingkat daya yang relatif rendah (seperti pada reaktor Kartini), maka laju kenaikan suhu air pendingin sangat kecil, sehingga kesalahan dalam pembacaan termometer menjadi besar, selain masalah ketelitian skala termometer yang digunakan.

Berdasarkan kenyataan tersebut, maka selain perlu dilakukan pembenahan terhadap alat ukur flow meter dan termometer maka dirasa perlu mengembangkan metoda kalibrasi daya yang akurasinya tetap baik untuk semua tingkat daya, yaitu berdasarkan metoda *non-kalorimetri*, yang diimplemetasikan melalui program PENDAR.

Makalah ini menyajikan dasar teori, metodologi dan implementasinya pada program PENDAR beserta hasil pengujian program tersebut.

## DASAR TEORI

Laju reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor pada kondisi ajeg (*steady state*) secara umum dinyatakan dengan <sup>(1)</sup>

$$R_f = \sum_f (E) \int_{vol} f(E) dv$$

atau

$$R_f = \sum_f \bar{f} V_{teras} \quad (1)$$

dengan

$$\bar{f} = \frac{\int f(E) dv}{\int dv} \quad (2)$$

Adalah besarnya fluks neutron rerata didalam teras. Untuk teras berbentuk kotak, maka fluks rerata teras dapat dinyatakan dengan

$$\bar{f} = f_0 k_x k_y k_z$$

Di mana

$k_x$ ,  $k_y$  dan  $k_z$  masing-masing ratio fluks rerata pada arah x, y dan z terhadap fluks pada pusat teras ( $f_0$ ). sedang untuk teras berbentuk silinder, maka persamaan (2) menjadi

$$\bar{f} = f_0 k_r^2 k_z \quad (3)$$

$S_f$  = tampang lintang fisi makroskopis dari bahan bakar yang digunakan

$f$  = fluks neutron sebagai fungsi energi

$v$  = volume

Dalam hal reaktornya jenis reaktor termal, maka  $f$  adalah fluks pada energi termal. Besarnya daya (watt) yang dibangkitkan didalam reaktor dinyatakan dengan

$$P = \frac{\sum_f \bar{f} V_{teras}}{3.1 * 10^{10}} \quad (4)$$

$$P = \frac{G}{3.1 * 10^{10} * A} N_A S_f \quad (5)$$

Dengan

$G$  = total kandungan bahan fisil (gram) didalam teras reaktor

$A$  = Nomor massa dari bahan fisil yang digunakan.

$N_A$  = bilangan Avogadro =  $6,022045E^{23}$

$S_f$  = tampang lintang fisi mikroskopik (barns) dari bahan fisil yang digunakan.

Sehingga dengan mengetahui besarnya *core loading* dan *fluks neutron rerata* didalam teras reaktor, maka besarnya daya yang dibangkitkan dapat diketahui.

Besarnya fluks rerata di dalam teras dalam hal ini dapat ditentukan dari hasil pemetaan distribusi fluks neutron di dalam teras pada arah radial dan aksial pada suatu tingkat daya, menggunakan *detektor swadaya (Self Powered Detector / SPD)* di mana besarnya *arus listrik* yang dihasilkan oleh detektor sebanding dengan besarnya fluks neutron.

Besarnya fluks neutron yang sebenarnya, ditentukan dengan pengukuran menggunakan cara *pengaktifan foil* yang dilakukan pada pusat teras pada tingkat daya tertentu (misal 1 k watt), selanjutnya besarnya arus yang diberikan SPD dinormalisasikan terhadap besarnya fluks yang dihasilkan dari *pengaktifan foil* ( $f_{abs}$ ) yang ditentukan berdasarkan persamaan berikut ini <sup>(1,4)</sup>:

$$f_{abs}^{th} = \frac{l A C}{W s_{act} e g N_A (1-e^{-\gamma t_i})(e^{-\lambda t_d})(1-e^{-\lambda t_c})} * \frac{(CR-F)}{a * CR} \quad (6)$$

Di mana

- A = berat atom foil
- C = Total cacah gamma terukur dari isotope hasil aktivasi
- W = berat foil (gram)
- $s_{act}$  = tampang lintang aktivasi dari foil yang digunakan (barn)
- e = efisiensi dari sistem cacah terhadap sinar gamma
- $\gamma$  = fraksi laju emisi sinar gamma dari radio isotope yang terbentuk.
- l = konstanta peluruhan dari radio isotope yang diamati.
- $t_i, t_d$  dan  $t_c$  masing-masing lama waktu irradiasi, waktu tunda dan waktu cacah.
- a = koreksi faktor serapan diri neutron termal pada foil.
- CR = Cadmium Ratio = perbandingan aktivitas foil telanjang terhadap aktivitas foil terbungkus cadmium.
- F = Faktor koreksi untuk memperhitungkan fraksi neutron epitermal yang terserap pada bungkus cadmium.

$$= A_{epi}^{bare} / A_{epi}^{CD}$$

Untuk cadmium dengan ketebalan 0.5 hingga 1 mm dengan *cut off energy* antara 0,45 dan 0,55 ev maka  $F \approx 1$

Selanjutnya bila perhitungan daya akan didasarkan pada 2 kelompok energi neutron, maka neutron kelompok cepat dapat ditentukan sebagai:

$$f_{epi} = f_{th} / (CR - 1.0) \quad (7)$$

di mana CR harus dibagi dengan F dalam hal  $F \neq 1.0$

## BEBERAPA KRITERIA DALAM PEMILIHAN DETEKTOR/FOIL

Detektor/Foil yang akan digunakan untuk menentukan besarnya fluks neutron, hendaknya memiliki persyaratan sebagai berikut ini:

1. Tingkat kemurniannya tinggi, sedemikian rupa sehingga aktivitas gangguan yang ditimbulkan kurang dari 1%.
2. Tingkat gangguan/perturbation dari detektor terhadap fluks neutron termal dibuat sekecil mungkin (kurang dari 10 %) dengan mempertimbangkan ukuran dari foil.
3. Untuk pengukuran pada daerah yang mengandung air, maka detektor tidak boleh rusak akibat kontak dengan air.
4. Detektor sebaiknya dalam bentuk padatan dan stabil secara kimiawi dan tidak mengganggu keselamatan operasi reaktor..
5. Umur paroh dari detektor yang digunakan tidak terlalu kecil dibanding dengan waktu tunggu dan waktu cacah..
6. Disarankan menggunakan detektor yang dapat digunakan berulang-ulang.
7.  $\sigma_{act}$  dari detektor tidak terlalu menyimpang dari sifat  $1/v$  dan diketahui secara akurat, sehingga fluks neutron yang terhitung dapat lebih teliti.

Di antara detektor yang memenuhi persyaratan tersebut diatas adalah seperti pada tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Foil aktivasi untuk neutron Termal dan Resonansi [4]

Unsur & (bentuk)	Titik Leleh (°C)	Jenis Reaksi	Kelimpahan (%)	$\sigma_a^{th}$ (barn)	Energi Res (ev)	$T_{1/2}$ (hari)	Energi radiasi Utama (Mev)
Au (metal)	1063	$^{197}\text{Au}$ (n, $\gamma$ ) $^{198}\text{Au}$	100	98,8	4,91	2,7	$\gamma$ 0,412 (95%) $\beta$ 0,96
Co (metal)	1495	$^{59}\text{Co}$ (n, $\gamma$ ) $^{60}\text{Co}$	100	20,2	132	1920	$\gamma$ 1,173+1,332 (100%) $\beta$ 0,312
Cu (metal)	1083	$^{63}\text{Cu}$ (n, $\gamma$ ) $^{64}\text{Cu}$	69,1	4,4	580	0,533	$\beta$ 2,63
Mn (alloy atau larutan)		$^{55}\text{Mn}$ (n, $\gamma$ ) $^{56}\text{Mn}$	100	13,2	337	0,107 5	$\gamma$ 0,845 (99%)

Tabel 2. Foil aktivasi untuk neutron pada energi Threshold [4]

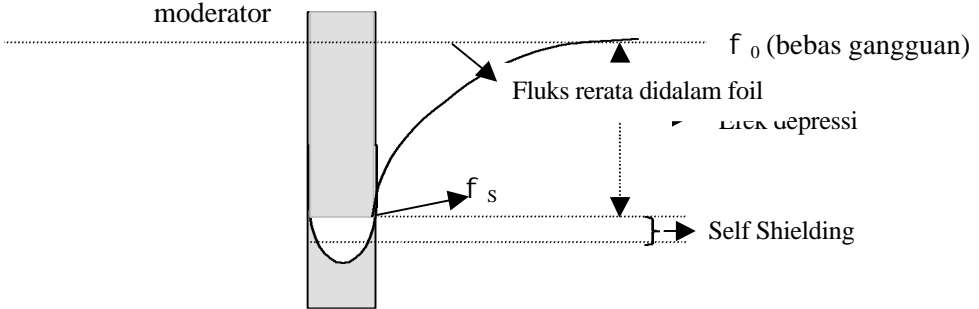
Unsur & (bentuk)	Titik Leleh (°C)	Jenis Reaksi	Kelimpahan (%)	$\sigma_a^{\text{eff}}$ (barn)	Energi (Mev)	$T_{1/2}$ (hari)	Energi radiasi Utama (Mev)
S (pellet)	120	$^{32}\text{S} (n,p) ^{32}\text{S}$	95	300	3.0	14,2	$\beta$ 1,71
Ni (metal)	1453	$^{58}\text{Ni} (n,p) ^{58}\text{Co}$	68	550	3.0	71,3	$\gamma$ 0,80 (100%) $\beta$ 0,312
Ti (metal)	1453	$^{46}\text{Ti} (n,p) ^{46}\text{Sc}$	8,0	230	5,5	83,9	$\gamma$ 2,01 + 0,89 (100%) $\beta$ 0,36
Al (metal)		$^{27}\text{Al} (n,p) ^{27}\text{Na}$	100	70	7,5	0,625	$\gamma$ 2,75 + 1,37 (100%) $\beta$ 1,39

## BEBERAPA KOREKSI

### Koreksi Terhadap Hasil Aktivasi Foil

#### Koreksi depresi fluks dan *Self Shielding*

Sampel/foil yang digunakan akan menimbulkan gangguan terhadap fluks neutron yang sedang diukur (terutama pada kelompok energi rendah/termal) berupa pengurangan sehingga fluks yang terukur pada permukaan foil ( $f_s$ ) akan (*terdepressi*) menjadi lebih rendah dari yang semestinya ( $f_0$ ). Selanjutnya neutron yang terserap didalam foil akan mengalami atenuasi sehingga menambah efek depresi yang disebut dengan efek serapan diri atau *self shielding* didalam foil, sehingga intensitas / jumlah neutron yang mengalami reaksi dengan atom foil menjadi berkurang, seperti diilustrasikan berikut ini:



Gambar 1: Efek Depresi Fluks dan Serapan Diri

Faktor koreksi untuk faktor depresi dan self shielding masing-masing adalah :

$$F_{dep} = \bar{f}_s / f_0$$

$$F_{ss} = \bar{f} / \bar{f}_s$$

Koreksi terhadap faktor depresi dapat ditentukan dari persamaan berikut [2]: (8)

$$F_{dep} = 1.0 + \frac{0.34 b R}{l_{tr}} \quad \text{untuk} \quad R \ll l_{tr}$$

$$F_{dep} = 1.0 + 0.5b \left[ \frac{3.0 R L}{2.0 l_{tr} (R+L)} - 1.0 \right]; \quad \text{untuk} \quad R \gg l_{tr} \quad (9)$$

Faktor koreksi serapan diri / *Self Shielding* untuk fluks yang *isotropik* adalah:

$$F_{SS} = (1.0 - T) / 2.x \quad (10)$$

Dengan

R = Radius Foil yang digunakan

b =  $1.0 - T$ ; T = Transmission probability

$$T = e^{-x} (1.0 - x) + x^2 [E_1(x)]$$

$$x = S_a d;$$

$S_a$  =ampang lintang makroskopik dari foil, d = tebal foil (cm)

$E_l(x)$  = Integral logaritmik

$$= \int_0^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$$

$l_{tr} = \text{Transport Mean Free Path}$

## Koreksi FILTER

Pada pengukuran neutron epitermal menggunakan foil yang dibungkus kadmium ada kemungkinan bahwa sebagian neutron epitermal terserap oleh *cover cadmium* yang digunakan. Untuk itu diperlukan koreksi terhadap *Cadmium Ratio (CR)* yang terukur yaitu dengan membagi dengan faktor faktor koreksi  $F_{cd}$  untuk memperhitungkan fraksi neutron epitermal yang terserap pada bungkus cadmium.

$$F_{cd} = A_{epi}^{bare} / A_{epi}^{CD} \quad (11)$$

Bila *scattering* dan *self shielding* didalam foil dapat diabaikan, maka

$$F_{cd} = \frac{A_{epi}^{bare}}{(1.0 - \alpha) A_{epi}^{CD}} = \frac{1.0}{2E_3(\Gamma_c)} \quad (12)$$

Di mana :

$$\alpha = 1.0 - 2E_3(\Gamma_c)$$

$$\Gamma_c = \text{Cadmium thickness} = d \cdot \Sigma_a^{CD}$$

$$d = m/\rho A$$

m = massa (gram)

$\rho$  = densitas (gr/cm<sup>3</sup>)

A = luas (cm<sup>2</sup>)

Untuk filter yang ideal, maka  $F_{cd} = 1.0$

Cadmium dengan tebal antara 0,5 hingga 1.0 mm (masing-masing memiliki *cut off* energy 0,45 ev dan 0,55 ev) cukup mendekati ideal<sup>(4)</sup>.

## Koreksi Pergeseran Spektrum

Keberadaan penyerap neutron yang kuat seperti bahan bakar, batang kendali, dsb., akan menggeser spektrum energi neutron didalam teras ke arah yang lebih tinggi. Untuk itu, besarnya tampang lintang dari material/foil yang digunakan harus dievaluasi berdasarkan temperatur neutron ( $T_n$ ) efektif. Menurut *Coveyou* besarnya  $T_n$  dapat ditentukan dari temperatur moderator ( $T_m$ ) berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\frac{T_n}{T_m} = 1 + 0.46\Delta \quad (13)$$

1. Untuk model homogen, maka

$$\Delta = 2A \frac{\Sigma_a(E)}{\Sigma_s} \left[ \frac{E}{kT_m} \right]^{1/2} \approx \frac{4\Sigma_a^m(kT_m)}{\chi \Sigma_s^m} \quad (14)$$

Dengan  $\chi$  adalah penurunan energi logaritmis rerata per tumbukan

1. Untuk sistem heterogen dengan moderator air ringan,

$$\Delta = 2A \frac{\Sigma_a(E)}{\Sigma_s} \left[ \frac{E}{kT_m} \right]^{1/2} \approx \frac{4\Sigma_a^m(kT_m)}{\chi \Sigma_s^m} \quad (15)$$

Di mana

$m$  dan  $abs$  masing masing index untuk moderator dan absorber

$N$  = jumlah macam inti *moderator* atau *absorber*

$F_i$  = rasio rapat neutron rerata di dalam material *penyerap i* dan *moderator*

$S_a$  dan  $S_s$  masing-masing tampang lintang makroskopis serapan dan hamburan.

Setelah temperatur neutron ( $T_n$ ) diketahui, maka besarnya tampang lintang serapan dari foil terkoreksi temperatur pada daerah *Maxwellian* ditentukan sebagai berikut:

Untuk foil dengan sifat  $1/v$ , yaitu di mana besar tampang lintang serapannya berbanding terbalik dengan kecepatan atau energi neutron, maka

$$\bar{\Sigma}_a = \left[ \frac{\rho T_0}{4T_n} \right]^{1/2} \Sigma_a(E_0) \quad (16)$$

Sedang untuk foil dengan sifat non  $1/v$ , maka :

$$\bar{\Sigma}_a = \left[ \frac{\rho T_0}{4T_n} \right]^{1/2} g_a(T_n) \Sigma_a(E_0) \quad (17)$$

Dalam hal ini  $T_0 = \text{temperatur kamar} = 293,6^0 \text{ K}$  dan  $E_0 = 0.025 \text{ eV}$   
 $g_a(T_n) = \text{faktor non } 1/v$  untuk foil yang digunakan, sebagai fungsi temperatur, yang secara matematis dinyatakan sebagai berikut:

$$g(T_n) = \frac{\int_0^{\infty} S(v) v n(v) dv}{S_0 v_0 \int_0^{\infty} n(v) dv} \quad (18)$$

di mana

$$n(v) = v^2 \exp\left[-\frac{mv^2}{2kT_n}\right] = \text{rapat neutron sebagai fungsi kecepatan} \quad (19)$$

Untuk beberapa material, parameter  $g_a(T_n)$  telah ditabelkan. Bila spektrum neutron yang ditinjau juga mencakup daerah *Non Maxwellian* hingga *cut off energy*  $E_{cd}$  maka koreksi terhadapampang lintang aktivasi foil menjadi:

$$\bar{\Sigma}_a = \left[\frac{\rho T_0}{4T_n}\right]^{1/2} \Sigma_a(E_0) [g_a(T_n) + r s(T_n)] \quad (20)$$

dengan  $s(T_n) = \text{faktor non } 1/v$  pada daerah *non Maxwellian* (untuk beberapa maeiti yang telah ditabelkan) dan  $r = \text{spectralindek}$  yang menyatakan ukuran besarnya komponen *nonMaxwellian*. Harga  $r$  dapat ditentukan dari persamaan :

$$r\sqrt{T_n/T_0} = \frac{1}{4R_{cd}} \sqrt{\rho E_{cd}/kT_0} ; \dots kT_0 = 0.025 \text{ eV} \quad (21)$$

Untuk aktivasi pada daerah *Epitermal*,  $f(E) = f_{epi}/E$  maka untuk foil yang sangat tipis

$$A_{\Psi} = N f_{epi} I_0 \quad (22)$$

$$I_0 = \int_{E_{cd}}^{\infty} \frac{S_{act}(E)}{E} dE \quad (23)$$

=infinite dilution Resonance Integral, untuk beberapa material telah ditabelkan.

## METODOLOGI

Implementasi metode tersebut kedalam program komputer PENDAR dilakukan dengan pendekatan sebagai berikut:

1. Data distribusi fluks neutron yang diperoleh dari hasil pemetaan didalam teras reaktor baik pada arah vertikal maupun radial dikonversi kebentuk fungsi polinomial, untuk selanjutnya digunakan untuk mencari reratanya dan perbandingannya terhadap fluks pada pusat teras ( $k_x, k_y, k_z$ ). Proses konversi tersebut dilakukan secara otomatis melalui Subroutine POLFIT yang ada didalam Program PENDAR.
2. Berdasarkan fungsi polinomial hasil *fitting* tersebut, selanjutnya juga dapat ditentukan besarnya fluks dan daya pada tiap zone, dengan cara menormalisasikan terhadap fluks rerata teras dan daya teras yang telah dihitung. Secara ringkas, besarnya daya pada tiap zone ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$P(z) = f(z) / \bar{f} * w(z) / w(teras) * P(teras) \quad (24)$$

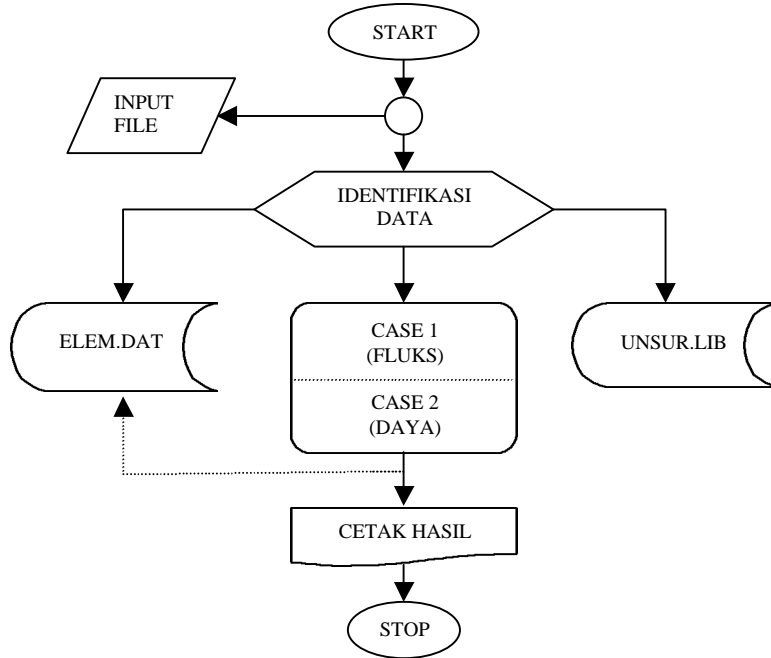
Di mana  $w(z)$  dan  $w(teras)$  masing-masing = berat  $U^{235}$  pada zone dan teras.

3. Besarnya fluks absolut dapat dilakukan pada sembarang lokasi di dalam teras (misal bagian terluar), selanjutnya harga fluks pada pusat teras dan tempat lainnya dapat dilakukan dengan menormalisasikan berdasarkan hasil pemetaan distribusi didalam teras (yang bisa dilakukan antara lain dengan detektor *swadaya*).
4. Dalam hal pengukuran fluks absolut dilakukan dengan foil, maka selain menggunakan foil standar yang baik, juga ketebalannya yang cukup tipis dan ukurannya relatif kecil, sehingga efek gangguannya dapat diabaikan.
5. Perhitungan didasarkan pada dua kelompok energi neutron (termal dan cepat), di mana kelompok cepat dimulai dari batas *cutt off energy* untuk standar bungkus cadmium setebal antara 0.5 – 1 mm (tebal ideal). Dalam hal ini besarnya *Cadmium Ratio* rerata teras diambil dari rerata seluruh daerah / *zone*.

Secara ringkas, proses perhitungan ditunjukkan seperti pada diagram (gambar 2):

6. Data masukan disiapkan melalui file masukan (nama file bebas) dengan format bebas, yang memuat antara lain pilihan problem yang diinginkan (perhitungan fluks atau daya) dan data lain yang bersangkutan seperti konfigurasi teras dan opsi untuk perhitungan Burnup (dalam hal dipilih perhitungan daya).
7. Apabila dipilih perhitungan fluks maka program akan membaca data konstanta unsur/foil yang digunakan melalui file pustaka "UNSUR.LIB" untuk selanjutnya diproses melalui subroutine CASE1 sedang untuk perhitungan daya maka PROGRAM akan berkomunikasi dengan file ELEM.DAT yang memuat informasi nomor identifikas dan burnup/kandungan  $U^{235}$  dari tiap elemen yang menyusun teras, sesuai dengan data konfigurasi yang diberikan pada file masukan, dan selanjutnya dilakukan pemrosesan melalui subroutine utama CASE2.

8. Apabila diinginkan perhitungan BURNUP, maka harga burnup dari tiap elemen bakar didalam teras akan dihitung dan dilakukan pembaharuan (*update*) data burnup dari tiap elemen bakar pada file ELEM.DAT



Gambar 2. Diagram Alir Program PENDAR

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini diberikan contoh hasil pengujian program PENDAR baik untuk perhitungan fluks maupun daya reaktor. Tabel 2 adalah contoh dari bentuk file masukan untuk perhitungan *fluks* dan *daya*.

Baris pertama pada file masukan ('FLUKS' atau 'DAYA') menunjukkan masalah yang dipilih. Pada file masukan pertama, dievaluasi sebanyak 5 data pengukuran yang sama dengan variasi **temperatur moderator**. Dari kasus tersebut, maka diperkirakan besarnya fluks neutron akan semakin tinggi seiring dengan kenaikan temperatur moderator sebagai akibat penurunan tampang lintang aktivasi.

Hasil perhitungan untuk kasus tersebut diberikan pada tabel 3, di mana terlihat adanya kenaikan besarnya fluks dengan kenaikan temperatur moderator, sesuai yang diharapkan.

Selanjutnya untuk perhitungan *daya reaktor* telah dilakukan perbandingan dengan hasil perhitungan program TRIGAP. Program TRIGAP adalah program difusi 1 dimensi, dengan 2 kelompok energi neutron yang dirancang untuk perhitungan kekritisan dan pengelolaan bahan bakar didalam teras, untuk reaktor TRIGA (250 kw). Program tersebut telah terverifikasi dan telah digunakan pada reaktor Kartini kegiatan pengelolaan teras. Salah satu kekhususan dari program TRIGAP adalah bahwa besarnya tingkat *daya reaktor harus ditetapkan* kemudian menghitung  $k_{eff}$  nya serta distribusi fluks/daya pada setiap zone.

Sebagai langkah pembading, maka dievaluasi distribusi fluks yang dihasilkan dari perhitungan TRIGAP untuk beberapa tingkat daya, mulai dari daya rendah hingga 100 KW. Selanjutnya dilakukan perhitungan dengan program PENDAR, menggunakan data kandungan  $U^{235}$  pada file ELEM.DAT dan konfigurasi teras yang sama dengan pada perhitungan dengan program TRIGAP untuk beberapa tingkat daya tersebut.

Hasil perhitungan menunjukkan tingkat kesamaan yang sangat baik, seperti ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Fluks Dengan PENDAR (Temperatur divariasi)

Nomor Sampel	Cacah Total	Cacah Epitermal	Cadmium Ratio	T- Mod (° C)	$\phi^{Th}$ (x 10 <sup>10</sup> )	$\phi^{Epi}$ (x 10 <sup>10</sup> )
1	1018	299	3.405	50	6.3375	2.6355
2	1018	299	3.405	70	6.4929	2.7001
3	1018	299	3.405	90	6.6394	2.7610
4	1018	299	3.405	110	6.7775	2.8184
5	1018	299	3.405	130	6.9076	2.8726

Tabel 5. Verifikasi Program PENDAR Terhadap program TRIGAP

Daya (KW) TRIGAP	$\phi$ (0,0) ( x 10 <sup>12</sup> )	$\phi_1$ rerata ( x 10 <sup>12</sup> )	$\phi_2$ rerata ( x 10 <sup>12</sup> )	Daya (KW) PENDAR
1.0	0.02976	0.01067	0.01831	1.0245
10	0.2979	0.10679	0.18331	9.8978
25	0.74589	0.26753	0.45923	24.796
50	1.4458	0.53687	0.92156	49.758
75	2.2501	0.80800	1.38700	74.888
90	2.7048	0.97150	1.66760	90.042
100	3.0089	1.08090	1.85540	100.18

## KESIMPULAN

Dari hasil pengujian disimpulkan bahwa program PENDAR telah dapat berfungsi sebagaimana diharapkan. Verifikasi menggunakan program TRIGAP menunjukkan bahwa model perhitungan yang digunakan pada program PENDAR cukup baik, dan karenanya dapat digunakan sebagai kalibrator terhadap meter daya, dan diharapkan dapat memperbaiki kalibrasi dengan metoda *Kalorimetri* pada reaktor riset dan pengelolaan bahan bakar selama didalam teras, serta pengembangan lebih lanjut pada sistem monitor daya, khususnya untuk reaktor Kartini.

## DAFTAR PUSTAKA

1. ANL-6410, *Reactor Laboratory Experiments*, August (1961)
2. ANL-5800, *Reactor Physics Constants*
3. EDWARD PROFIO, *Experimental Reactor Physics*, John Wiley and Sons, New York (1976)
4. H. BOECK, *Neutron Activation Foil Manual*, Course Manual of the regional training course, on the use of PC in research reactor operation and management, Bandung, Indonesia, January (1992)
5. S.D. CONTE and CARL DE BOOR, *Elementary Numerical Analysis*, Mc. Graw-Hill Book Company (1972)

Tabel 3. Contoh data pada file masukan untuk program PENDAR

### Contoh data pada file masukan untuk perhitungan FLUKS

'FLUKS' / PERHITUNGAN FLUKS ABSOLUT  
 197, 5 / NOMOR MASSA DAN JUMLAH DATA YANG AKAN DIPROSES  
 1, 0.011, 5.0, 23.934, 5.0, 1018.0, 23.834, 5.0, 299.0, 6.0e-3, 50.0/ DATA 1  
 2, 0.011, 5.0, 23.934, 5.0, 1018.0, 23.834, 5.0, 299.0, 6.0e-3, 70.0/ DATA 1  
 3, 0.011, 5.0, 23.934, 5.0, 1018.0, 23.834, 5.0, 299.0, 6.0e-3, 90.0/ DATA 1  
 4, 0.011, 5.0, 23.934, 5.0, 1018.0, 23.834, 5.0, 299.0, 6.0e-3, 110.0/ DATA 1  
 5, 0.011, 5.0, 23.934, 5.0, 1018.0, 23.834, 5.0, 299.0, 6.0e-3, 130.0/ DATA 1

#### Keterangan

Baris pertama identifikasi masalah ='fluks'  
 Baris kedua = nomor massa foil (197=emas) dan jumlah data yang diproses (5)  
 Baris ketiga dan seterusnya memuat parameter yang sama yaitu:

Kolom 1 = nomor foil  
 Kolom 2 s/d 10 adalah sebagai berikut:  
 BERAT FOIL (GRAM)  
 LAMA IRRADIASI (MENIT)  
 WAKTU TUNGGU FOIL TELANJANG (JAM)  
 WAKTU CACAH FOIL TELANJANG (MENIT)  
 TOTAL CACAH FOIL TELANJANG  
 WAKTU TUNGGU FOIL DIBUNGKUS CD (JAM)  
 WAKTU CACAH FOIL DIBUNGKUS CD (MENIT)  
 TOTAL CACAH FOIL DENGAN BUNGKUS CADMIUM  
 EFISIENSI DETEKTOR  
 TEMPERATUR MODERATOR (°C)

### Contoh data pada file masukan untuk perhitungan DAYA REAKTOR

'POWER' / → PERHITUNGAN DAYA REAKTOR  
 9 17 17/ → JUMLAH PASANGAN DATA DISTRIBUSI FLUKS PADA ARAH AKSIAL DAN RADIAL(X,Y)  
 0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0 40.0/ → JARAK ANTAR TITIK PADA ARAH AKSIAL  
 2.0 4.0 5.0 8.0 10.0 10.0 8.0 6.0 4.0/ → HARGA PADA TIAP TITIK ARAH AKSIAL  
 .14 1.5 2.86 4.22 5.58 6.94 8.3 9.66 11.02 12.38 13.74 15.1 16.46 17.82 19.18 20.54 21.9/ → JARAK ANTAR TITIK(Y)  
 .29790 .27417 .21759 .19319 .18615 .18505 .17877 .16722 .15209 .13989 .12894 .11848 .10800 .099929  
 .093858 .082744 .068078 / → DATA NILAI PADA MASING-MASING TITIK PENGAMATAN ARAH X  
 .14 1.5 2.86 4.22 5.58 6.94 8.3 9.66 11.02 12.38 13.74 15.1 16.46 17.82 19.18 20.54 21.9/ → JARAK ANTAR TITIK(Y)  
 .29790 .27417 .21759 .19319 .18615 .18505 .17877 .16722 .15209 .13989 .12894 .11848 .10800 .099929  
 .093858 .082744 .068078 / → DATA NILAI PADA MASING-MASING TITIK PENGAMATAN ARAH Y  
 0.2979E12 60.0 0.0 38.0/ → FLUKS PADA PUSAT TERAS, SUHU MODERATOR, LAMA OPR, TINGGI TERAS  
 0/ → PILIHAN PERHITUNGAN BURNUP : 1= BURNUP DIHITUNG, 0= BURNUP TIDAK DIHITUNG  
 6 / → JUMLAH ZONE DIDALAM TERAS  
 1 6 12 18 24 30 / → MAKSIMUM JUMLAH LOKASI ELEMEN PADA TIAP ZONE  
 2.3125 6.1183 10.0800 14.0660 18.0610 22.0600/ → JARI-JARI TIAP ZONE  
 1.829075 1.522626 1.524665 1.479919 1.506481 1.63262 / → CADMIUM RATIO PADA TIAP ZONE  
 4 / → NOMOR IDENTIFIKASI ELEMEN PADA PUSAT TERAS  
 9883 9636 9637 9639 9640 9641 → NOMOR IDENTIFIKASI ELEMEN PADA RING - B  
 9887 9886 9875 9869 4 9870 → NOMOR IDENTIFIKASI ELEMEN PADA RING - C  
 9873 9874 4 9872 9871 9998  
 9978 9879 9980 9878 9879 9876 → NOMOR IDENTIFIKASI ELEMEN PADA RING - D  
 9877 9985 9986 9987 9885 9882  
 9881 9880 9981 9982 9983 9984  
 4 9977 9994 9598 9542 9592 → NOMOR IDENTIFIKASI ELEMEN PADA RING - E  
 9976 9975 9892 9995 9594 9596  
 9891 9597 9595 9996 9890 9889  
 9997 9593 9888 9635 9988 9540  
 9350 9539 9353 9354 9538 9541 → NOMOR IDENTIFIKASI ELEMEN PADA RING - F  
 6 8 6 9537 9536 6  
 8 6 6 6 7 11  
 6 6 9535 6 9352 6  
 9349 6 6 6 6 6

