

## **PENGEMBANGAN SOFTWARE CPEM SEBAGAI SARANA PENDIDIKAN EKSPERIMENT FISIKA REAKTOR PADA REAKTOR KARTINI**

Tegas Sutondo dan Syarip

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Badan Tenaga Nuklir Nasional  
JL. Babarsari, Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta, 55281

### **ABSTRAK**

**PENGEMBANGAN SOFTWARE CPEM SEBAGAI SARANA PENDIDIKAN EKSPERIMENT FISIKA REAKTOR PADA REAKTOR KARTINI.** Telah dibuat dan dikembangkan suatu modul perangkat lunak atau software CPEM (core parameter evaluating module), untuk evaluasi/ pemrosesan data eksperimen beberapa parameter operasi reaktor Kartini seperti penentuan reaktivitas batang kendali, daya reaktor, dan fluks neutron absolut. Modul ini masih dalam tingkat awal, yang akan menjadi bagian modul perhitungan parameter reaktor yang terintegrasi. Uji fungsi dan validasi dilakukan melalui komparasi hasil eksperimen dengan metode yang berbeda seperti kalibrasi daya reaktor Kartini dengan metode neutronik dan metode kalorimetri, pada tingkat daya reaktor nominal 100 kW, komparasi kalibrasi batang kendali metode doubling time dengan metode langsung menggunakan reactivity meter, dan juga melalui komparasi dengan hasil perhitungan menggunakan program TRIGAP. Berdasarkan data eksperimen dan hasil analisis menunjukkan bahwa hasil keluaran software CPEM telah cukup sesuai dengan hasil pengukuran, dengan penyimpangan kurang dari 5.0 %. Diharapkan software CPEM ini dapat digunakan untuk mendukung kegiatan eksperimen/kalibrasi di reaktor Kartini serta menyiapkan suatu data base beberapa parameter reaktor sebagai bagian dari program pengembangan pemodelan simulator reaktor berbasis reaktor Kartini sebagai sarana pendidikan dan pelatihan SDM (bagian dari program nuclear training centre/NTC).

**Kata kunci:** Pengembangan, software, CPEM, parameter reaktor, Kartini

### **ABSTRACT**

**DEVELOPMENT OF CPEM SOFTWARE AS AN EDUCATIONAL FACILITY ON REACTOR PHYSICS EXPERIMENT OF KARTINI REACTOR.** A software module CPEM (core parameter evaluating module) intended for facilitating the evaluation of experimental data of several Kartini reactor parameters such as control rod worth, reactor power, and absolute neutron flux determinations have been developed. At present the module is still in early stage which will be a part of the integrated core parameters calculating modules. The functional and validation test has been performed through the comparison between the software's output and the experimental results such as Kartini reactor power calibration data based on neutronic and calorimetric methods at the nominal reactor power level of 100 kW, and between the software's output of control rod worth calibration using doubling time method and result of direct measurement by using reactivity meter. Comparison test was also performed with the output of TRIGAP computer code for the flux distributions. The test results concluded that the module has worked well as expected and the output is in good agreement with the compared results i.e. with the deviation of less than 5 %. It is hoped that this software can be used for constructing a database of several reactor parameters important to modeling and developing reactor simulator based on Kartini reactor, to support the improvement on educational and training facility (part of the nuclear training centre/NTC program).

**Keywords:** Development, CPEM, software, reactor parameters, Kartini

## 1. PENDAHULUAN

Sebagai bagian dari upaya pembinaan SDM dalam bidang teknologi nuklir, saat ini sedang direncanakan program *nuclear training centre* (NTC), [1] dengan memanfaatkan fasilitas laboratorium sebagai sarana pembelajaran termasuk peningkatan pemanfaatan reaktor Kartini. Terkait dengan rencana tersebut, telah dilakukan pengembangan suatu perangkat lunak (*software*) simulator reaktor berbasis reaktor Kartini sebagai bagian dari sarana pembelajaran tersebut, yang diharapkan dapat mempermudah dalam pemahaman berbagai fenomena fisika reaktor yang terjadi pada pengoperasian reaktor nuklir.

Makalah ini memuat sebagian dari hasil pengembangan dan validasi modul CPEM (*core parameter evaluating module*) yang telah dibuat, dan dimaksudkan untuk menyiapkan database beberapa parameter penting fisika reaktor, yang selanjutnya akan digunakan sebagai dasar dalam pemodelan simulator reaktor yang direncanakan. Modul *software* tersebut dibuat menggunakan bahasa pemrograman FORTRAN 77, yang terdiri dari beberapa modul perhitungan parameter yang berbeda yang diintegrasikan. Beberapa modul tersebut antara lain modul untuk menentukan daya reaktor baik secara non kalorimetri seperti telah digunakan pada program PENDAR, [2,3] maupun secara kalorimetri yang lazim digunakan pada kalibrasi meter daya reaktor, modul pemroses data kalibrasi reaktivitas batang kendali (diferensial dan integral), modul pemroses nilai fluks neutron absolut berdasarkan data aktivasi foil, dsb. Validasi hasil perhitungan CPEM dilakukan dengan membandingkannya dengan hasil eksperimen baik untuk perhitungan reaktivitas batang kendali, daya termal secara kalorimetri dan perhitungan daya secara non-kalorimetri. Selain itu juga dilakukan komparasi dengan keluaran program baku yang spesifik untuk reaktor jenis TRIGA seperti program TRIGAP.

Diharapkan dengan pengembangan modul CPEM ini dan juga software lainnya yang telah disusun, [4] dapat memberikan kontribusi pada peningkatan sarana pendidikan dan pelatihan menggunakan reaktor Kartini, atau dapat berkotribusi pada program NTC.

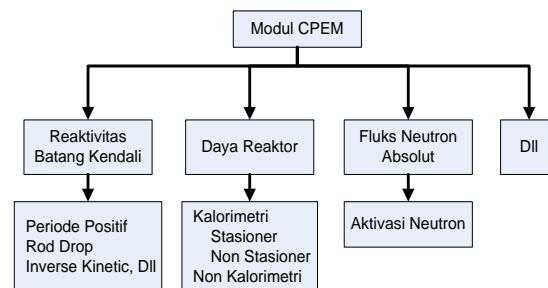
## 2. METODOLOGI

Gambar 1. memperlihatkan struktur dari modul CPEM. Beberapa opsi kasus perhitungan

akan diberikan pada awal eksekusi CPEM, dan setiap selesai proses perhitungan, hingga selesai semua kasus perhitungan yang diinginkan.

Data eksperimen yang akan diproses dan data fisis terkait lainnya disiapkan pada suatu file masukan atau *database-1* kemudian hasil keluaran dicetak pada file keluaran/*output* untuk selanjutnya siap dimasukkan pada file *database-2* yang dapat digunakan sebagai masukan untuk simulator reaktor yang sedang dikembangkan. Gambar 2 dan Gambar 3 memperlihatkan alur eksekusi dan contoh parameter yang diproses pada *database-1* dan hasil eksekusi dari modul CPEM yang ditampung pada *database-2*

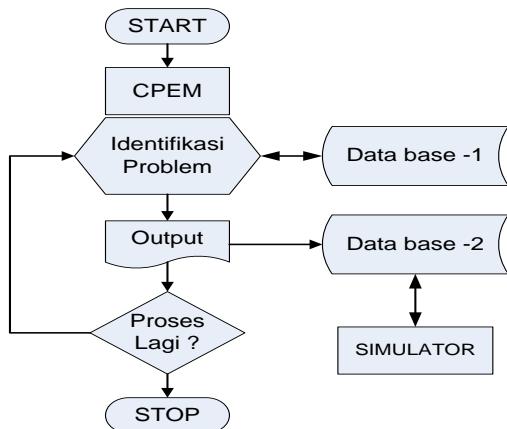
Selanjutnya verifikasi atau validasi modul CPEM dilakukan dengan metode komparasi hasil perhitungan CPEM dengan hasil pengukuran/ eksperimen di reaktor Kartini. Untuk maksud tersebut dilakukan inventarisasi data spesifikasi dan konfigurasi teras serta *burnup* dari setiap elemen bakar reaktor Kartini sebelum dilakukan eksperimen. Reaktor Kartini menggunakan bahan bakar standar TRIGA buatan General Atomic sebanyak 69 buah yang terdiri dari 67 buah tipe 104 dan 2 buah tipe 204, dan beberapa buah bahan bakar tiruan (*dummy*) yang terbuat dari grafit, yang dilengkapi dengan 3 buah batang-batang kendali. [5]. Gambar 4 memperlihatkan data konfigurasi teras tersebut.



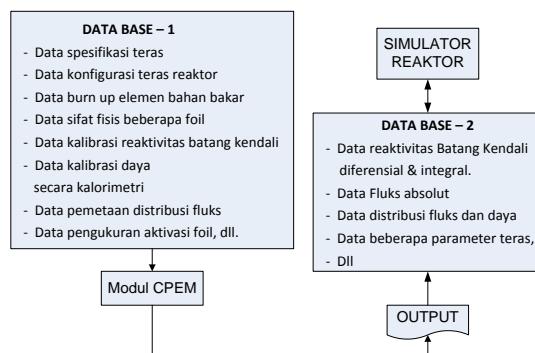
Gambar 1. Struktur modul CPEM.

Parameter yang diukur adalah reaktivitas batang kendali, reaktivitas lebih teras reaktor, suhu dan laju aliran pendingin, fluks neutron, dan posisi batang-batang kendali. Untuk penentuan daya menggunakan metode non kalorimetri didasarkan pada pemetaan distribusi fluks neutron di dalam teras reaktor baik pada arah aksial maupun radial pada ring B, ring C, D dan F, menggunakan *Self-Powered Neutron Detector* (SPND). Keluaran dari SPND berupa arus listrik yang sebanding dengan besarnya

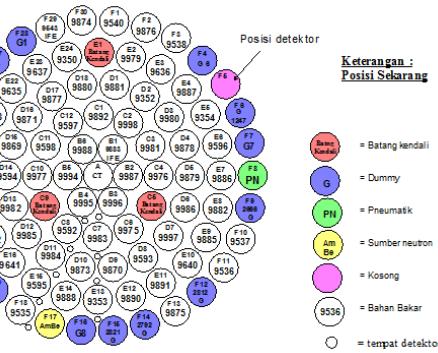
fluks neutron di daerah pengukuran. Dengan melakukan kalibrasi menggunakan metode aktivasi foil maka arus yang dibaca oleh SPND dapat merepresentasikan nilai fluks neutron pada lokasi tersebut, yang kemudian digunakan sebagai dasar untuk menghitung nilai daya reaktor.



Gambar 2. Skema alur eksekusi modul CPEM.



Gambar 3. Contoh beberapa parameter yang diproses dan dihasilkan oleh modul CPEM.



Gambar 4. Konfigurasi teras reaktor kartini.

Korelasi yang digunakan untuk mengukur daya reaktor berdasarkan neutronik adalah:

$$P = \frac{G}{3.1 * 10^{10} * A} N_A \sigma_f \bar{\phi} \quad (1)$$

dimana:

$P$  = daya total reaktor (watt),

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

$A$  = Nomor massa dari bahan fisil yang digunakan

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

$\sigma_f$  = tumpang lintang fisi mikroskopik (barns) dari bahan fisil yang digunakan. [6,7]

$\bar{\phi}$  = fluks neutron rerata di dalam teras reaktor ( $n/cm^2 s$ ), yang dapat dinyatakan dengan

$$\bar{\phi} = \phi_0 k_r^2 k_z \quad (2)$$

Dengan  $k_r$  dan  $k_z$  masing-masing ratio fluks rerata pada arah r, dan z terhadap fluks pada pusat teras ( $\phi_0$ ).

Sedangkan pada penentuan daya menggunakan metode kalorimetri non stasioner (sistem pendingin tidak dijalankan) maka daya reaktor dapat ditentukan dengan persamaan.

$$P = \frac{dQ}{dt} = 60H \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

dimana:

$P$  = adalah daya reaktor sesungguhnya (kW),

$Q$  = energi panas yang terbentuk di dalam teras reaktor,

$H$  = harga air reaktor Kartini (19,0476 kWh/ $^{\circ}C$ )

$T$  = suhu air tangki, ( $^{\circ}C$ ) dan

$t$  = adalah interval waktu pengamatan (menit).

Pada penentuan daya menggunakan metode non kalorimetri didasarkan pada pemetaan distribusi fluks neutron di dalam teras reaktor baik pada arah aksial maupun radial pada ring B, ring C, D dan F, menggunakan *Self-Powered Neutron Detector* (SPND) yang telah dikalibrasi menggunakan metode aktivasi foil.

Keluaran dari SPND berupa arus listrik yang sebanding dengan besarnya fluks neutron di daerah pengukuran. Selanjutnya nilai arus yang dibaca oleh SPND diubah menjadi nilai fluks neutron yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai daya reaktor.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data sesuai kondisi dan konfigurasi teras reaktor Kartini, maka telah dilakukan perhitungan dengan modul CPEM, yang mencakup:

- Perhitungan reaktivitas batang kendali menggunakan metode periode positif,
- Perhitungan daya termal reaktor menggunakan metode kalorimetri dan non-kalorimetri
- Perhitungan distribusi fluks dan daya reaktor pada setiap ring
- Perhitungan fluks absolut berdasarkan metode aktivasi neutron.

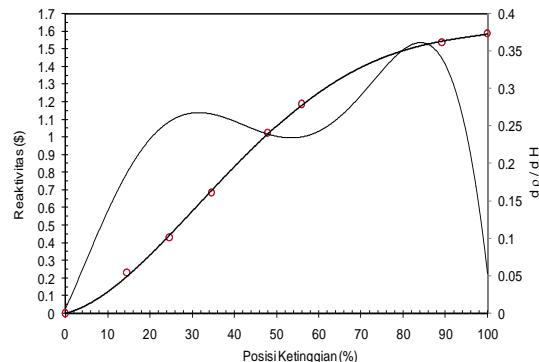
Hasil eksekusi perhitungan menunjukkan bahwa modul CPEM telah dapat berfungsi dengan baik untuk menjalankan perhitungan pada setiap kasus sesuai dengan yang diharapkan.

Verifikasi hasil perhitungan dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimen baik untuk perhitungan reaktivitas batang kendali, daya termal secara kalorimetri dan perhitungan daya secara non-kalorimetri.

Hasil kalibrasi batang kendali menggunakan reactivity meter memberikan nilai reaktivitas ( $\rho$ ) sebesar 1,587 \$, sedang hasil evaluasi perhitungan dengan CPEM berdasarkan metode periode positif diberikan pada Tabel 1. yang menunjukkan kesesuaian dengan hasil pengukuran *reactivity meter* dengan deviasi 0,28% dan pada Gambar 4. disajikan contoh representasi grafik reaktivitas batang kendali integral dan diferensial.

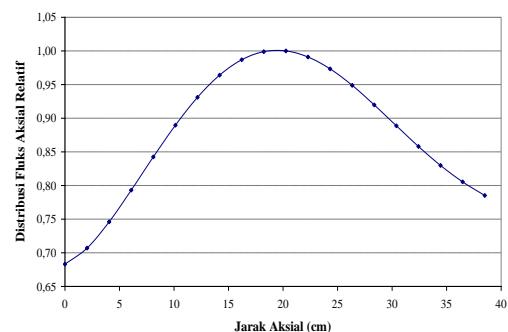
**Tabel 1. Kalibrasi batang kendali dengan metode periode positif**

Posisi (%)	$t_{1,5} x$ (s)	Periode (s)	$\Delta \rho$ (\$)	$\Delta \rho / dH$	$\Sigma \rho$ (\$)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,56	26,79	66,07	0,135	0,013	0,135
25,41	4,66	11,50	0,375	0,025	0,510
38,24	7,00	17,26	0,308	0,024	0,818
51,68	5,36	13,23	0,351	0,026	1,170
100,00	2,84	7,00	0,463	0,010	1,633

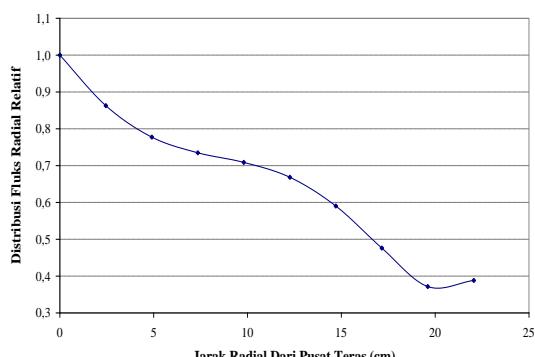


**Gambar 5. Contoh grafik reaktivitas batang kendali diferensial dan integral.**

Gambar 5. dan 6. memperlihatkan hasil pemrosesan data pengukuran distribusi fluks menggunakan SPND, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan distribusi fluks dan daya pada setiap ring, dan hasilnya seperti ditunjukkan pada Tabel 2. dengan total daya teras sebesar 96,914 kW.



**Gambar 6. Hasil perhitungan distribusi fluks relatif aksial ternormalisasikan.**



**Gambar 7. Hasil perhitungan distribusi fluks relatif radial ternormalisasikan.**

**Tabel 2. Kalibrasi daya reaktor kartini dengan metode kalorimetri dan non kalorimetri**

Ring	Fluks Neutron Rerata ( $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )			Daya (kW)
	Termal	Cepat	Total	
A	8.7482E+11	1.1370E+12	2.0118E+12	0.000
B	5.5466E+11	1.0375E+12	1.5922E+12	14.141
C	4.6169E+11	8.8770E+11	1.3494E+12	19.997
D	3.9552E+11	8.1635E+11	1.2119E+12	32.374
E	2.4557E+11	4.8734E+11	7.3291E+11	25.002
F	1.1394E+11	1.9089E+11	3.0483E+11	5.400
<b>TOTAL</b>				<b>96.914</b>

Hasil perhitungan tersebut hampir sama dengan hasil perhitungan menggunakan metode kalorimetri seperti ditunjukkan pada Tabel 3, dengan deviasi antara 3% – 4,8% terhadap penunjukan meter daya.

**Tabel 3. Perbandingan kalibrasi daya reaktor kartini dengan metode kalorimetri dan non kalorimetri**

Kalibrasi daya	Kalorimetri	Non kalorimetri
Terukur (kW)	104,84	96,914
Terbaca (kW)	100,00	100,00
Kesalahan meter (%)	- 4,84	- 3,09

Tabel 4. memperlihatkan contoh perbandingan hasil perhitungan fluks neutron menggunakan CPEM dan TRIGAP [8] ada sedikit perbedaan hasil pada nilai fluks neutron totalnya, tetapi dari segi pola distribusinya menunjukkan kesesuaian yang cukup baik.

Tabel 5. memperlihatkan contoh hasil pemrosesan data aktivasi foil untuk menentukan fluks absolut untuk beberapa variasi temperatur moderator. Dalam hal ini diasumsikan aktivitas setiap foil sama besarnya. Terlihat bahwa terjadi kenaikan fluks neutron dengan kenaikan temperatur. Hal ini sesuai dengan yang diharapkan, yaitu terjadinya penurunan tumpang lintang aktivasi dari foil dengan naiknya temperatur sehingga diperlukan fluks neutron yang lebih tinggi untuk mendapatkan tingkat aktivitas yang sama.

#### 4. KESIMPULAN

Telah dibuat suatu modul *software* CPEM (*core parameter evaluating module*), untuk memproses data eksperimen beberapa parameter penting terkait dengan pengoperasian reaktor.

Dari hasil uji fungsi dan verifikasi menunjukkan bahwa modul CPEM telah dapat difungsikan secara baik, untuk memproses

beberapa parameter yang diinginkan, dan keluarannya telah sesuai dengan hasil eksperimen/ pengukuran dengan metode yang berbeda

Disimpulkan bahwa modul ini telah dapat digunakan dalam mendukung kegiatan rutin pada pengoperasian reaktor dan penyiapan database dalam pemodelan simulator reaktor yang direncanakan.

Status dari modul ini saat ini masih dalam taraf awal dari suatu pengembangan dan masih perlu penyempurnaan lebih lanjut agar pemakaiannya lebih *user friendly*.

**Tabel 4. Perbandingan hasil perhitungan fluks neutron rerata tiap ring antara CPEM dengan TRIGAP pada daya 100 kW**

Ring	Fluks neutron total ( $n/\text{cm}^2 \text{ s}$ )	
	CPEM	TRIGAP
A	2.0118E+12	2.7164E+12
B	1.5922E+12	1.9883E+12
C	1.3494E+12	1.7974E+12
D	1.2119E+12	1.4383E+12
E	7.3291E+11	1.1172E+12
F	3.0483E+11	8.5207E+11
Rerata	1.2005E+12	1.6516E+12

**Tabel 5. Hasil pemrosesan data aktivasi foil untuk menentukan fluks absolut untuk beberapa variasi temperatur**

No foil	Cacah total	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\phi^{\text{Th}} (x 10^{10})$	$\phi^{\text{Epi}} (x 10^{10})$
1	1018	50	6,3375	2,6355
2	1018	70	6,4929	2,7001
3	1018	90	6,6394	2,7610
4	1018	110	6,7775	2,8184
5	1018	130	6,9076	2,8726

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

1. **TIM PENYUSUN FASILITAS PELATIHAN PLTN**, Dokumen Fasilitas Pelatihan PLTN, No. Dok.: C01/FP-PLTN/09, P2EN BATAN, Jakarta 11 Agustus 2009.
2. **FRIEDMAN, F.L. and KOFFMAN, E. B.**, “Problem Solving and Structured Programming in FORTRAN”, Addison-Wesley Publishing Company(1979).
3. **Microsoft FORTRAN Reference**, Version 5.
4. **SUTONDO, T.**, Pengembangan program

- komputer PENDAR untuk penentuan fluks neutron daya reaktor dan *burn-up* (Prosiding Seminar Komputasi Dalam Sains dan Teknologi Nuklir ke XII) PPIN BATAN, Jakarta (2001).
5. **PTAPB**, Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Kartini Rev 8, Yogyakarta (2009).
  6. **PROFIO, E.**, "Experimental Reactor Physics", John Wiley & Sons, New York, (1976).
  7. **BOECK, H.**, Neutron Activation Foil Manual, Course Manual of The Regional

Training Course, on The Use of PC in Research Reactor Operation and Management, Bandung, Indonesia, Januari 1992.

8. **MELE, I. and RAVNIK, M.**, Trigap - a computer programme for research reactor calculations, J. Stefan Institute, Ljubljana, Yugoslavia, December 1985.

## 6. DISKUSI

### **Arif Hidayat:**

Apakah CPEM itu dapat diadopsi untuk keperluan edukasi masyarakat?

### **Tegas Sutondo:**

Pada prinsipnya dapat digunakan selain untuk menunjang kegiatan rutin dalam pengoperasian reaktor, juga untuk sarana edukasi bagi masyarakat melalui simulator reaktor dimana CPEM merupakan bagian dari simulator tersebut.