

ANALISIS DAN PENGUKURAN PARAMETER REAKTOR KARTINI UNTUK PENERAPAN METODE k_0 -NAA

Sri Murniasih¹⁾, Roto²⁾, Agus Taftazani¹⁾, Th. Rina M.³⁾, Sutisna³⁾

¹⁾Pusat Sains dan Teknologi Akselerator – BATAN

²⁾Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam – UGM

³⁾Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju – BATAN

Email: smurni83@gmail.com

Diterima editor 22 April 2014

Disetujui untuk publikasi 9 Juni 2014

ABSTRAK

ANALISIS DAN PENGUKURAN PARAMETER REAKTOR KARTINI UNTUK PENERAPAN METODE k_0 -NAA. Metode k_0 -NAA merupakan metode analisis yang banyak digunakan dengan berbagai keunggulan. Dalam penerapan metode k_0 -NAA diperlukan nilai parameter reaktor (f dan α), maka tujuan penelitian ini adalah akan dilakukan pengukuran nilai parameter f dan α di fasilitas *Lazy Susan* reaktor Kartini. Metode yang digunakan meliputi metode *Cd-ratio* dan *triple bare*. Telah diukur nilai parameter tersebut pada tiga lubang iradiasi di fasilitas *Lazy Susan*. Diperoleh perbedaan hasil pengukuran nilai parameter yang signifikan pada setiap lubang iradiasi, nilai f berkisar 13,713 – 22,128 dan α berkisar -0,060 – 0,068. Hasil pengukuran f dan α dengan metode *Cd-ratio*, memberikan nilai yang lebih stabil dibandingkan metode *triple bare*. Nilai f dan α yang diperoleh dapat dijadikan basis data pada penerapan metode k_0 -NAA untuk analisis sampel di laboratorium AAN – PSTA.

Kata kunci: parameter reaktor, reaktor Kartini, k_0 -NAA, fluks neutron

ABSTRACT

ANALYSIS AND MEASUREMENT OF KARTINI REACTOR PARAMETERS FOR APPLICATION OF k_0 -NAA METHOD. The k_0 -NAA method is an analysis method that widely used by many of the advantages. In the application of k_0 -NAA method needed values of reactor parameters (f and α), then the purpose of the research would be conducted measurement parameter values f and α in the *Lazy Susan* Kartini reactor facilities. The methods used include *Cd-ratio* and *triple bare* methods. The parameter value has been measured in three channels in the irradiation facilities *Lazy Susan*. Differences of measurement results obtained parameter values are significant in each channel irradiation, the value of f ranged from 13,713 to 22,128 and the value of α ranged from -0,060 to 0,068. The results of measurements for the f and α with the *Cd-ratio* method, providing more stable value than the *triple bare* method. The value of f and α obtained can be used a database for the application of k_0 -NAA method for sample analysis in the laboratory NAA – CAST.

Keywords: reactor parameter, Kartini reactor, k_0 -NAA, neutron flux

PENDAHULUAN

Sejak diluncurkan pertama kali pada tahun 1975, metode standardisasi k_0 -NAA terus dikembangkan melalui berbagai riset agar dapat diterapkan menjadi metode analisis absolut. Penelitian berkaitan dengan pengembangan k_0 -NAA antara lain mengenai berbagai material yang dapat digunakan untuk pengukuran faktor k_0 , pengukuran efisiensi detektor, geometri dan matriks sampel, pengukuran karakteristik spektrum neutron pada lubang iradiasi dan keakuratan skema peluruhan berbagai radionuklida [1]. Sampai saat ini, banyak laboratorium Analisis Aktivasi Neutron (AAN) di dunia telah menerapkan metode k_0 -NAA untuk analisis kualitatif dan kuantitatif berbagai jenis samples [1,2]. Sementara itu, di Indonesia sendiri masih sangat sedikit laboratorium AAN yang telah menerapkan metode k_0 -NAA sebagai standar metode yang digunakan dalam pekerjaan sehari-hari.

Laboratorium AAN di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA) – BATAN merupakan salah satu laboratorium yang belum menerapkan metode k_0 -NAA. Laboratorium ini didukung oleh sumber radiasi reaktor Kartini yang merupakan jenis reaktor riset TRIGA MARK II. Reaktor Kartini mempunyai dua fasilitas operasi (fasilitas *pneumatic* dan *Lazy Susan*), beroperasi pada daya 100 kW dan mempunyai fluks neutron berkisar $2 \times 10^{11} \text{ n.s}^{-1}.\text{cm}^{-1}$.

Penerapan metode k_0 -NAA pada suatu laboratorium memerlukan dua parameter utama yang harus dilakukan yaitu pengukuran efisiensi detektor dan pengukuran parameter reaktor. Parameter reaktor merupakan salah satu *permanent data base* yang harus diukur secara akurat agar metode k_0 -NAA dapat aplikasikan dengan akurat dan benar sehingga dibutuhkan suatu riset tersendiri untuk melakukannya. Parameter reaktor ada dua yaitu parameter α yang merupakan penyimpangan dari distribusi spektrum neutron epitermal $1/E$ (menunjukkan penyimpangan spektrum epitermal dari bentuk ideal $1/E$ dengan pendekatan distribusi $1/E^{1+\alpha}$) dan parameter f yaitu *ratio* fluks neutron termal terhadap fluks neutron epitermal (ϕ_{th}/ϕ_e) [3]. Dalam rangka penerapan metode k_0 -NAA di PSTA, maka tujuan penelitian ini adalah akan dilakukan pengukuran α dan f di tiga (3) lubang radiasi pada fasilitas *Lazy Susan* dengan mempertimbangkan posisi bahan *dummy* pada konfigurasi bahan bakar menggunakan dua metode pengukuran *Cd-ratio* dan *triple bare* agar hasil pengukuran yang diperoleh dapat digunakan sebagai data basis pada *software* k_0 -NAA.

TEORI

Metode penelitian untuk penentuan faktor α dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok yaitu: metode *Cd-ratio*, *Cd-covered* dan *triple bare*. Pada penelitian ini digunakan metode *Cd-ratio multi-monitor* dan *triple bare* untuk penentuan faktor α .

Metode Cd-ratio Multi-monitor

Metoda ini digunakan untuk memonitoring parameter α terutama bila karakteristik fluks neutron selalu stabil setiap saat. Sejumlah bahan monitor fluks diiradiasi bersamaan dengan dan tanpa pembungkus Cd kemudian aktivitasnya diukur dengan fasilitas spektrometer yang terkalibrasi. Jika semua bahan monitor fluks memiliki tampang lintang $\sigma(v) \sim 1/v$ hingga energi 1,5 eV, parameter α diperoleh dari kemiringan kurva linier [3,4]:

$$\log \frac{(\bar{E}_{r,i})^{-\alpha}}{(F_{Cd,i} \cdot R_{Cd,i} - 1) \cdot Q_{0,i}(\alpha) \cdot G_{e,i}/G_{th,i}} \text{ versus } \log \bar{E}_{r,i} \quad (1)$$

dengan R_{Cd} menunjukkan nisbah cadmium atau perbandingan nisbah aktivitas jenis keping terbuka terhadap tertutup Cd, sedang G_e adalah faktor koreksi serapan-diri untuk neutron epitermal, dan G_{th} merupakan faktor koreksi serapan-diri untuk neutron termal.

Metode Bare-irradiation

Metoda ini banyak digunakan dalam penentuan parameter α pada suatu reaktor karena lebih sederhana. Sejumlah bahan monitor fluks bersamaan dengan bahan monitor acuan yang diiradiasi bersamaan tanpa pembungkus Cd. Jika semua bahan monitor fluks tersebut memiliki tampang lintang

$\sigma(v) \sim 1/v$ hingga energi 1,5 eV; parameter α diperoleh dari kemiringan dari garis lurus $\log\{(\bar{E}_{r,i})^{-\alpha} A_i\}$ versus $\bar{E}_{r,i}$ [1,2,3,5,6,7] :

$$A_i = \frac{\frac{A_{sp,i}}{k_{0,Au(i)}} \cdot \epsilon_{p,i} - \frac{A_{sp,ref}}{k_{0,Au(ref)}} \cdot \epsilon_{p,ref}}{Q_{0,i(\alpha)} \frac{G_{e,i}}{G_{th,i}} - Q_{0,ref(\alpha)} \frac{G_{e,ref}}{G_{th,ref}}} \quad (2)$$

dengan k_0 merupakan tetapan k_0 , ϵ_p adalah efisiensi deteksi dari puncak energi utuh, termasuk koreksi untuk attenuasi γ , indeks "ref" menyatakan acuan dan tidak diikuti dalam seri- i . Untuk dua bahan monitor fluks dan satu bahan monitor acuan maka menjadi metoda *triple bare-monitor* sehingga perhitungan parameter α dapat diperoleh dari persamaan [5,8]:

$$(a - b) \cdot Q_{0,1}(\alpha) \cdot \frac{G_{e,1}}{G_{th,1}} - \alpha \cdot Q_{0,2}(\alpha) \cdot \frac{G_{e,2}}{G_{e,2}} + b \cdot Q_{0,3} \cdot \frac{G_{e,3}}{G_{e,3}} = 0 \quad (3)$$

dengan,

$$a = \left\{ 1 - \frac{A_{sp,2}}{A_{sp,1}} \cdot \frac{k_{0,Au(1)}}{k_{0,Au(2)}} \cdot \frac{\epsilon_{p,1}}{\epsilon_{p,2}} \right\}^{-1} \quad \text{dan} \quad b = \left\{ 1 - \frac{A_{sp,3}}{A_{sp,1}} \cdot \frac{k_{0,Au(1)}}{k_{0,Au(3)}} \cdot \frac{\epsilon_{p,1}}{\epsilon_{p,3}} \right\}^{-1} \quad (4)$$

α adalah parameter untuk distribusi fluks neutron $\phi_e' \sim 1/E^{1+\alpha}$, sedang indeks 1,2 dan 3 menunjukkan isotop ke-1, ke-2 dan ke-3.

Pengukuran f Dengan Metode Cd -ratio

Parameter f adalah *ratio* fluks neutron termal terhadap epitermal dapat ditentukan dengan metode Cd -ratio [9].

$$f = (F_{Cd} R_{Cd} - 1) \cdot G_e \cdot Q_0(\alpha) / G_{th} \quad (5)$$

dengan $Q_0(\alpha)$ merupakan nisbah integral resonansi terhadap tampang lintang termal dengan distribusi fluks: $\phi_e \sim 1/E^{1+\alpha}$, sedangkan f adalah *ratio* fluks neutron termal terhadap fluks neutron epitermal.

Tabel 1. Nilai Q_0 dan \bar{E}_r beberapa isotop bahan monitor fluks ($F_{Cd}=1$, kecuali Au) [10]

Bahan monitor fluks	\bar{E}_r , eV	Q_0	$T_{1/2}$
$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	$5,65 \pm 0,400$	$15,710 \pm 0,280$ $F_{Cd}=0,991$	2,695 hari
$^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U} / ^{239}\text{Np}$	$16,9 \pm 0,200$	$103,400 \pm 1,300$	23,505 menit / 2,355 hari
$^{94}\text{Zr}(n,\gamma)^{95}\text{Zr}$	$6260 \pm 2,000$	$5,050 \pm 0,420$	64,030 hari
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	$136 \pm 7,000$	$1,990 \pm 0,054$	5,271 tahun
$^{96}\text{Zr}(n,\gamma)^{97}\text{Zr}$	$338 \pm 2,100$	$248,000 \pm 1,500$	16,740 jam
$^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$	2560 ± 260	$1,908 \pm 0,094$	244,000 hari

Pada persamaan (5), bahan monitor fluks yang digunakan telah diketahui nilai Q_0 dan \bar{E}_r seperti yang tercantum pada Tabel 1, dengan bahan monitor fluks akan diiradiasi dengan dan tanpa pembungkus Cd. Nilai G_e dan G_{th} berturut-turut menunjukkan faktor koreksi *self-shielding* neutron epitermal dan termal. Bahan monitor fluks Au sering digunakan karena sesuai persyaratan untuk mengetahui faktor koreksi *self-shielding* neutron. Secara praktis faktor transmisi Cd ($F_{Cd,r}$) didefinisikan seperti pada persamaan (6) [11].

$$F_{Cd} = \frac{(A_{sp})_{Cd}}{(A_{sp})_e} \quad \text{atau} \quad F_{Cd} = \frac{f \cdot (G_{th}/G_e)}{Q_{0(\alpha)} \cdot R_{Cd}} + \frac{1}{R_{Cd}} \quad (6)$$

dengan F_{Cd} merupakan faktor transmisi Cd untuk *neutron epithermal*

Pengukuran f dengan Metoda *Bare bi-isotop*

Pada metoda bi-isotop terbuka, parameter f ditentukan dengan mengiradiasi secara bersamaan dua buah isotop dan sebuah komparator tanpa pembungkus Cd. Dengan demikian parameter f dapat ditentukan dengan persamaan [8,11]:

$$f = \frac{G_{e,1} \cdot \frac{k_{0,c(1)}}{k_{0,c(2)}} \cdot \frac{\varepsilon_{p,1}}{\varepsilon_{p,2}} \cdot Q_{0,1} - G_{e,2} \cdot \frac{A_{sp,1}}{A_{sp,2}} \cdot Q_{0,2}}{G_{th,2} \cdot \frac{A_{sp,1}}{A_{sp,2}} - G_{th,1} \cdot \frac{k_{0,c(1)}}{k_{0,c(2)}} \cdot \frac{\varepsilon_{p,1}}{\varepsilon_{p,2}}} \quad (7)$$

bahan komparator (c) yang sering digunakan adalah ^{198}Au ($Q_{0,^{198}\text{Au}}=15,71$), sedangkan bahan monitor fluks lainnya digunakan adalah isotop ^{95}Zr ($Q_{0,^{95}\text{Zr}}=5,05$, $\bar{E}_r=6260$ eV) dan isotop ^{97}Zr atau $^{97\text{m}}\text{Nb}$ ($Q_{0,^{97}\text{Zr}}=248$, $\bar{E}_r=338$ eV). Untuk kawat Au-Al yang mengandung $\sim 0,1\%$ Au diketahui mempunyai nilai $G_{th} \approx G_e \approx 1$.

METODOLOGI

Pengukuran parameter reaktor (f dan α) pada penelitian ini dilakukan dengan dua metode yaitu metoda *triple bare* dan *Cd-ratio* guna mendapatkan nilai yang stabil yang dapat dijadikan *basis data* pada *software* k_0 -NAA.

Prosedur Pengukuran α dan f Dengan metoda *Triple Bare*

Penentuan parameter α dan f menggunakan metoda *triple bare* dilakukan dengan memasukkan keping Al-Au ($0,1003 \pm 0,0012\%$ Au IRMM-530R) dan Zr ($99,8\%$, ketebalan $0,125\text{mm}$, *GoodFellow*) tanpa pembungkus Cd ke dalam kelongsong, kemudian diiradiasi pada *Lazy Susan* selama 6 jam. Pendinginan dilakukan 1 jam untuk isotop ^{97}Zr ($T_{1/2} = 16,740 \pm 0,100$ jam), 5-10 hari untuk isotop ^{95}Zr ($T_{1/2} = 64,030 \pm 0,010$ hari) dan 1-3 hari untuk ^{198}Au ($T_{1/2} = 2,695 \pm 0,100$ hari). Perhitungan parameter α diperoleh dengan persamaan (3) sedangkan perhitungan f ditentukan dengan persamaan (7).

Prosedur Pengukuran α dan f Dengan Metoda *Cd-ratio*

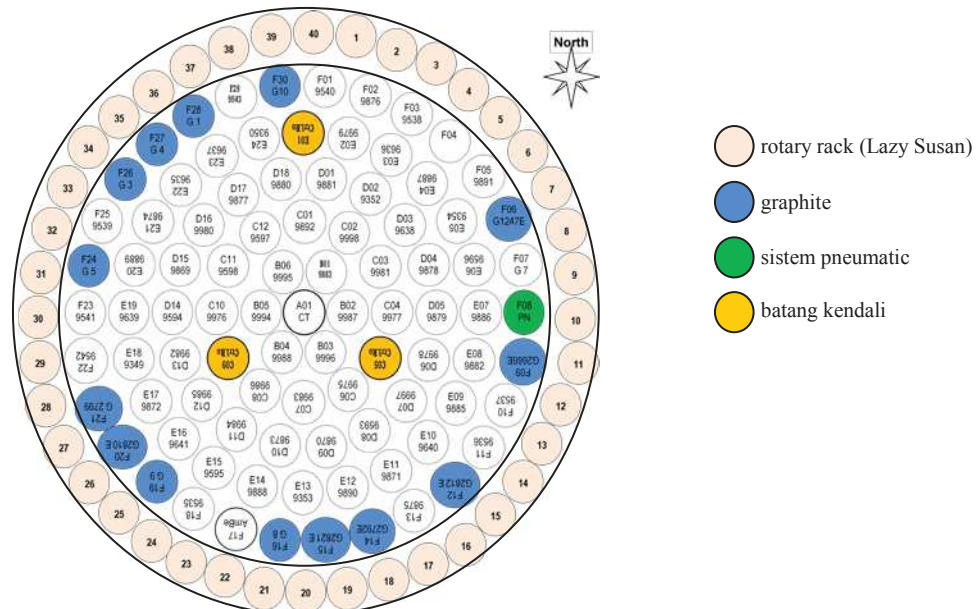
Penentuan parameter α dan f menggunakan metoda *Cd-ratio* dilakukan dengan memasukkan keping Al-Au ($0,1003 \pm 0,0012\%$ Au IRMM-530R); kepingan Zr ($99,8\%$, ketebalan $0,125\text{mm}$, *GoodFellow*); kepingan Al-U ($0,2\%$ U dengan $99,9520\%$ ^{238}U IRMM-NS00017); kawat Al-Co ($0,1043 \pm 0,0014\%$ Co) dan kepingan Zn ($99,980\%$, ketebalan $0,254$ mm, *Reactor Experiment Inc.*) tanpa pembungkus Cd dan dengan pembungkus Cd (ketebalan $1,1$ mm) yang dimasukkan dalam kelongsong dengan jarak > 6 cm. Keping bahan monitor fluks tersebut diiradiasi selama 6 jam pada fasilitas *Lazy Susan*. Pendinginan dilakukan sesuai dengan waktu paruh isotop yang akan diukur. Pengukuran aktivitas spesifik fluks monitor terbungkus maupun tidak terbungkus Cd dilakukan dengan spektrometer gamma dan dihitung menggunakan persamaan (1), sedangkan perhitungan f ditentukan dengan persamaan (5).

Pengukuran dilakukan pada spektrometer gamma terkalibrasi menggunakan detektor ORTEC GEM35P4-83 dan *multi channel analyzer* 4096 pada posisi jarak 10 cm dari *end-cap* detektor dimana efek *true-coincidence* dapat diabaikan. Bahan monitor fluks diukur dengan waktu pengukuran bervariasi $600 - 1800$ detik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setiap posisi iradiasi pada reaktor riset Kartini pada kondisi normal mempunyai jumlah neutron termal lebih besar dibandingkan neutron epitermal [1,12]. Hal ini sangat mempengaruhi jumlah atom yang dapat teraktivasi akibat reaksi dengan neutron termal dan epitermal sehingga fluktuasi statistik pembentukan isotop yang diinduksi oleh neutron termal akan *overlapping* dengan yang terinduksi oleh neutron epitermal, untuk itulah diperlukan kalibrasi parameter reaktor diantaranya f dan α [3]. Metode penentuan f dan α dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok yaitu metode *Cd-ratio*, *bare bi-isotop* dan *triple bare monitor* [13]. Pada penelitian ini, penentuan f dan α menggunakan metode *Cd-ratio*

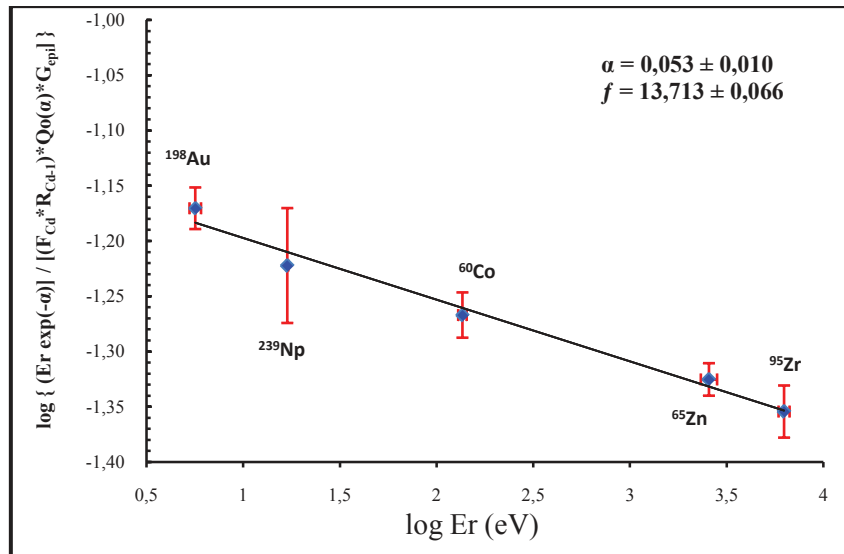
dan *triple bare monitor* yang dilakukan pada posisi 5, 15 dan 30 *Lazy Susan* dengan mempertimbangkan posisi bahan *dummy* pada konfigurasi bahan bakar. Konfigurasi bahan bakar reaktor dan posisi iradiasi pada saat dilakukan pengukuran parameter reaktor ditampilkan pada Gambar 1. Posisi iradiasi untuk analisis unsur umur pendek dilakukan pada fasilitas pneumatik yang berada di dalam teras reaktor sedangkan iradiasi sampel umur sedang dan panjang dilakukan pada fasilitas *Lazy Susan* yang terletak di luar teras reaktor. *Lazy Susan* merupakan rak putar pada reflektor grafit dengan 40 lubang iradiasi yang dioperasikan pada daya 100 kW.



Gambar 1. Konfigurasi bahan bakar dan posisi iradiasi pada fasilitas reaktor riset Kartini

Pengukuran fluks neutron termal, fluks epitermal, parameter α dan f digunakan beberapa bahan monitor fluks berupa kepingan atau kawat paduan logam dengan \bar{E}_r bervariasi yang mewakili jangkauan energi rendah sampai tinggi untuk mengetahui kestabilan nilai α pada seluruh daerah energi neutron epitermal pada suatu posisi iradiasi [13,14]. Tabel 1 menampilkan daftar monitor fluks dan data nuklir yang *relevant* yang digunakan pada penelitian ini.

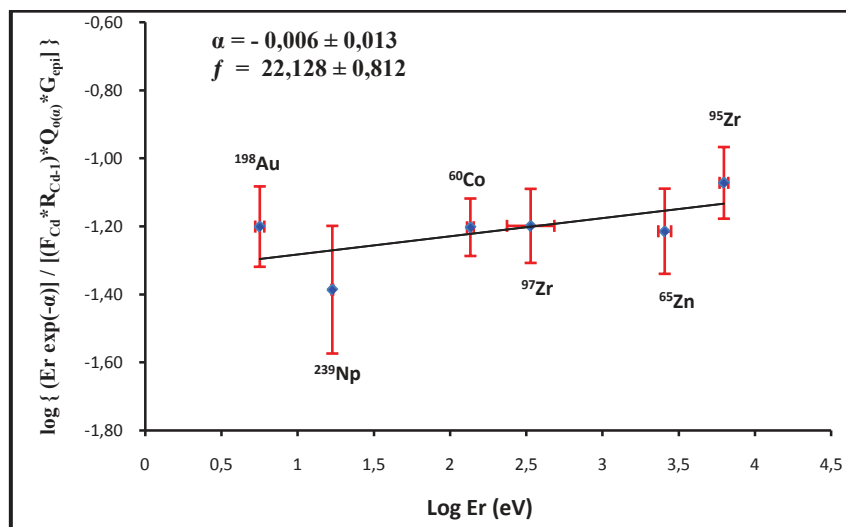
Posisi 5 pada *Lazy Susan* berada jauh dari bahan *dummy* dengan posisi grafit terdekat ada pada F06 G1247E (Gambar 1). Pengukuran f dan α pada posisi 5 dilakukan dengan metode *triple bare* dan metode *Cd-ratio multi monitor* untuk memperoleh nilai yang stabil. Isotop yang digunakan saat pengukuran dengan metode *triple bare* adalah ^{198}Au , ^{97}Zr dan ^{95}Zr , sedangkan untuk metode *Cd-rasio* digunakan isotop ^{198}Au , ^{239}Np , ^{95}Zr , ^{65}Zn dan ^{60}Co . Hasil pengukuran dengan metode *triple bare* diperoleh nilai $f = 13,669 \pm 0,087$ dan $\alpha = 0,052 \pm 0,019$ sedangkan pengukuran dengan metode *Cd-ratio multi monitor* diperoleh nilai $f = 13,713 \pm 0,066$ dan $\alpha = 0,053 \pm 0,010$ sebagaimana disajikan pada Gambar 2. Ketidakpastian hasil pengukuran f dengan metode *triple bare* mencapai 0,64% lebih besar dibandingkan ketidakpastian yang diperoleh dari metode *Cd-ratio multi monitor* yaitu 0,478%. Hal ini sesuai dengan penelitian Khoo (2007) dimana pengukuran parameter reaktor menggunakan metode *Cd-ratio multi monitor* memberikan nilai yang lebih stabil [5].



Gambar 2. Pengukuran f dan α pada posisi 5 *Lazy Susan* menggunakan metode *Cd-ratio multi monitor*

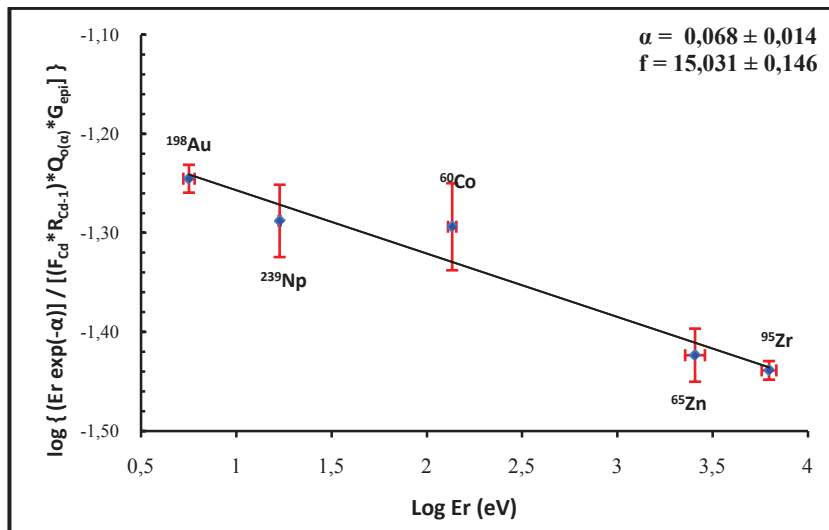
Posisi iradiasi 15 pada fasilitas *Lazy Susan* sangat dekat dengan bahan *dummy* (Gambar 1), hal ini akan mempengaruhi nilai f dan α berkaitan dengan distribusi neutron termal dan epitermal yang diterima bahan monitor fluks pada posisi tersebut. Pengukuran f dan α pada posisi 15 dilakukan dengan metode *triple bare* memberikan nilai $f = 17,818 \pm 0,881$ dan $\alpha = -0,061 \pm 0,021$, sedangkan metode *Cd-ratio multi monitor* memberikan nilai $f = 22,128 \pm 0,812$ dan $\alpha = -0,060 \pm 0,013$ sebagaimana disajikan pada Gambar 3. Nilai f pada posisi iradiasi 15 lebih tinggi dibandingkan pada posisi 5. Berdasarkan nilai f diketahui bahwa pada posisi 15, kelimpahan neutron epitermal yang terjadi lebih besar dibandingkan neutron termal dan berpengaruh pada nilai α cenderung negatif. Proses termalisasi yang besar akan membuat nilai α semakin positif dan jika proses termalisasi semakin kecil, maka nilai α semakin negatif [12,14].

Keberadaan bahan *dummy* juga mempengaruhi nilai f dan α pada posisi iradiasi, dimana bahan *dummy* terbuat dari grafit yang berfungsi sebagai reflektor yang mempunyai sifat dapat memantulkan neutron. Apabila neutron berinteraksi dengan bahan grafit, maka neutron tersebut akan dipantulkan ke daerah tengah bahan bakar aktif [15]. Hal ini menyebabkan pada daerah yang terdapat bahan grafit, harga fluks termal neutron kecil artinya proses terjadinya termalisasi relatif lebih kecil dibandingkan posisi iradiasi yang berada jauh dari bahan *dummy*.



Gambar 3. Pengukuran f dan α pada posisi 15 *Lazy Susan* menggunakan metode *Cd-ratio multi monitor*

Posisi iradiasi 30 pada fasilitas *Lazy Susan* dekat dengan bahan *dummy* (Gambar 1). Pengukuran f dan α pada posisi 30 dengan metode *triple bare* memberikan nilai $f = 15,803 \pm 0,198$ dan $\alpha = 0,066 \pm 0,018$ sedangkan metode *Cd-ratio multi monitor* memberikan $f = 15,031 \pm 0,146$ dan $\alpha = 0,068 \pm 0,014$ sebagaimana disajikan pada Gambar 4. Dibandingkan dengan posisi 15, posisi 30 mempunyai ketidakpastian pengukuran relatif lebih kecil. Ketidakpastian pengukuran f sebesar 0,97%. Proses penangkapan neutron termal dan epitermal mirip dengan posisi 5 dimana proses termalisasi lebih dominan sehingga menyebabkan nilai α lebih positif.



Gambar 4. Pengukuran f dan α pada posisi 30 *Lazy Susan* menggunakan metode *Cd-ratio multi monitor*

Pengukuran f dan α pada posisi fasilitas *Lazy Susan* memberikan nilai ketidakpastian dikarenakan penerimaan neutron oleh bahan monitor fluks sangat fluktuatif. Selain itu, penggunaan kombinasi bahan monitor fluks Au dan Zr yang menghasilkan isotop ¹⁹⁸Au dan ⁹⁷⁻⁹⁵Zr sangat menguntungkan untuk pengukuran fluks neutron dengan waktu iradiasi yang lama, tetapi tidak efisien untuk pengukuran dengan waktu iradiasi yang singkat. Ketidakefisienan tersebut karena aktivitas rendah dari isotop ⁹⁵Zr yang terbentuk pada waktu iradiasi yang singkat [9], sehingga memperbesar faktor ketidakpastian pengukuran.

Ketidakpastian pengukuran α pada posisi iradiasi 5, 15 dan 30 di fasilitas *Lazy Susan* berturut-turut adalah 20,012%; 22,647% dan 20,038% dengan nilai $\alpha \sim 0,01$. Dari hasil perhitungan ketidakpastian pengukuran f dan α , dapat dikatakan bahwa data yang dihasilkan dapat diterima karena suatu hasil pengukuran parameter reaktor dapat diterima atau valid jika ketidakpastian berkisar 5 – 10% untuk $\alpha \sim 0,1$ dan ketidakpastian > 50% untuk $\alpha \sim 0,01$ [10,12,16]. Nilai ketidakpastian yang tinggi ini dikarenakan bahan monitor fluks sangat sensitif terhadap perbedaan fluks termal dan perbedaan daya reaktor yang fluktuatif tiap waktu, hal ini sesuai dengan penelitian [5].

Setiap posisi iradiasi mempunyai nilai α dan f yang signifikan. Hal ini dipengaruhi fluktuasi distribusi neutron yang disebabkan oleh elemen bahan bakar dan konfigurasi *core central*, fasilitas operasi, *burn-up* dari perangkat bahan bakar, posisi batang kendali dan faktor lain seperti penurunan tekanan pada tiap lubang iradiasi.

Hasil perhitungan nilai α pada posisi 5, 15 dan 30 *Lazy Susan* mempunyai rentang nilai negatif sampai positif. Nilai α berhubungan dengan Φ_e yang sangat tergantung pada konfigurasi reaktor dan nilainya akan meningkat dengan bertambahnya jarak dari teras reaktor [5,16,17]. Menurut De Corte (1987), terjadinya termalisasi yang lebih tinggi menyebabkan nilai α menjadi lebih positif dan sebaliknya, semakin kecil terjadinya termalisasi akan menyebabkan nilai α menjadi negatif [13]. Dalam penelitian ini, nilai α yang diperoleh dalam kisaran -0,061 sampai 0,066. Hal ini menunjukkan bahwa proses termalisasi dalam reaktor Kartini berbeda secara signifikan untuk ketiga lubang iradiasi yang diamati.

Dari penjelasan di atas, dapat diketahui bahwa pada posisi iradiasi yang tidak berdekatan dengan elemen atau bahan yang mampu menyerap neutron, maka nilai f lebih kecil dan nilai α cenderung positif disebabkan proses terjadinya termalisasi berkurang dan kerapatan neutron epitermal semakin menurun. Untuk posisi iradiasi yang berdekatan dengan elemen yang mampu menyerap neutron, maka nilai f lebih besar dan nilai α cenderung negatif dikarenakan proses termalisasi berjalan lebih dominan dan kerapatan neutron epitermal semakin meningkat.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut: Diperoleh nilai parameter reaktor (f dan α) di fasilitas Lazy Susan reaktor Kartini, yang sangat dipengaruhi oleh posisi iradiasi karena keberadaan elemen bahan bakar dan atau bahan yang mampu menyerap neutron (*dummy*) pada konfigurasi bahan bakar. Setiap lubang iradiasi mempunyai nilai f dan α yang berbeda. Hasil pengukuran nilai parameter reaktor α dan f berbeda pada posisi iradiasi 5, 15 dan 30 di fasilitas Lazy Susan, baik yang menggunakan metode *Cd-ratio* maupun *triple bare*. Hasil pengukuran f dan α dengan metode *Cd-ratio*, memberikan nilai yang lebih stabil dibandingkan metode *triple bare*. Hasil pengukuran f dan α yang diperoleh dapat digunakan untuk iradiasi sampel yang akan datang maupun dapat dijadikan basis data untuk mendukung diterapkannya metode k_0 -NAA di laboratorium AAN - PSTA.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya kepada seluruh staf bidang reaktor PSTA pada saat iradiasi sampel serta Sutanto W.W. dan seluruh staf laboratorium AAN PSTA yang banyak membantu pada pekerjaan preparasi pra dan pasca iradiasi sampel.

DAFTAR PUSTAKA

1. Jong-Hwa Moon, S. Kim, Y. Chung, Y. Kim. Application of the k_0 -NAA method at the HANARO research reactor. J. Radioanal. Chem. 2007; 217: 289–295.
2. Torres B., E. Montoya, P. Mendoza, P. Bedregal, M. Ubillus, P. Olivera, Determination of gold and silver in copper concentrate using k_0 based Neutron Activation Analysis. J. Radioanal. Nucl. Chem. 2003; 257: 597- 601.
3. Dung H. M And Sasajima F. Determination of α and f for k_0 -NAA in irradiation sites with high thermalized neutrons. J Radioanal and Nucl Chem. 2003; 257(3): 509–512.
4. Sadiq U, Jonah S.A., Nasiru R. and Zakari Y.I. Neutron spectrum parameters in two irradiation channels of the Nigeria Research Reactor-1 (NIRR-1) for use in k_0 -NAA. Bayero Journal of Pure and Applied Sciences. 2010; 3(1): 220 – 223.
5. Khoo K.S., Sarmani S. B., Abugassa I. O. Determination of thermal to epitermal neutron flux ratio (f), epitermal neutron flux shape factor (a) and comparator factor (F_c) in the Triga Mark II Reactor, Malaysia. J Radioanal and Nucl Chem. 2007; 271(2): 419–424.
6. De Wispelaere A., De Corte F., Bossus D.A.W., Swagten J.L.M.G. and Vermaercke. Re-determination and Re-evaluation of the f and α Parameters in Channels Y4 and S84 of the BRI Reactor for use in k_0 -NAA at DSM research. Nucl. Instrum. Methods. 2006; 564: 636–640.
7. Alnour I. A., H. Wagiran, N. Ibrahim, S. Hamzah, B. S. Wee, M. S. Elias, J. A. Karim. Determination of neutron flux parameters in PUSPATI TRIGA Mark II Research Reactor, Malaysia. J Radioanal Nucl Chem. 2013; 296: 1231–1237.

8. Kubešova M. k_0 standardization in neutron activation analysis at LVR-15 reactor in Řez. dissertation, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University, Prague; 2012.
9. Jac'Imovic' R., V. Stibilj. Determination of Q_0 and k_0 factors for ^{75}Se and their validation using a known mass of Se on cellulose. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2010; A 622: 415–418.
10. De Corte F. The k_0 -NAA standardization method a move to the optimization of NAA, Rijksuniversiteit Gent; 1987.
11. Vermaercke P., Sneyers L., Bruggeman M., De Wispelaere A. and De Corte F. Neutron spectrum calibration using the Cd-ratio for multi-monitor method with a Synthetic Multi-element Standard. *J Radioanal and Nucl Chem*. 2008; 278(3): 631–636.
12. Sri Murniasih. Optimasi Metode Kayzero dalam Analisis Aktivasi Neutron di Reaktor Kartini, FMIPA – UGM; 2013.
13. Hung T. V. Modified method of a determination in the $1/E+1$ epithermal neutron spectrum of reactor. *J Radioanal and Nucl Chem*. 2010; 285: 331–336.
14. Lin X., Henkelmann R., Türler A., Gerstenberg H. and De Corte F. Neutron flux parameter at irradiation position in the new research reactor FRM-II. *Nucl. Instrum Methods*. 2006; 564: 641–644.
15. Mubarika S., Munir M., Sofjan Firdausi K. Dan Widarto. Analisis dan penentuan distribusi fluks neutron termal arah aksial dan radial teras reaktor Kartini dengan detektor swadaya. *JSM*. 2006; 14(4): 155 – 159.
16. Kubešova M. dan Kučera J. How to calculate uncertainties of neutron flux parameters and uncertainties of analysis results in k_0 -NAA. *J Radioanal and Nucl Chem*. 2012; 293: 87–94.
17. Smodiš B. Dan Bučar T, Overall measurement uncertainty of k_0 -based neutron activation analysis. *J Radioanal and Nucl Chem*. 2006; 269(2): 311–316.