

ANALISIS AWAL RANCANGAN SISTEM PGNAA MENGGUNAKAN SUMBER NEUTRON DARI BEAMPORT REAKTOR KARTINI

Edi Trijono Budisantoso, Syarip

Pusat Sains & Teknologi Akselerator
JL. Babarsari Kotak Pos:6101 Jogjakarta 55281
E-mail: edi-t@batan.go.id

Diterima: 01-06-2016

Diterima dalam bentuk revisi: 22-02-2017

Disetujui: 23-02-2017

ABSTRAK

ANALISIS AWAL RANCANGAN SISTEM PGNAA MENGGUNAKAN SUMBER NEUTRON DARI BEAMPORT REAKTOR KARTINI. Telah dilakukan analisis awal rancangan sistem PGNAA menggunakan salah satu *beamport* reaktor Kartini sebagai sumber neutron. Analisis awal ini meliputi penentuan moderator dan kolimator neutron analisis berkas neutron sejajar, dan *beam shutter* serta *beam stopper*. Perhitungan sifat neutronik dilakukan untuk memilih bahan material yang memenuhi syarat fungsi sebagai sub-komponen PGNAA dan menentukan ukuran geometrinya. Dari hasil perhitungan diperoleh data bahan yang baik untuk moderator yaitu grafit, bahan kolimator adalah aluminium, bahan *beam shutter* dan *beam stopper* adalah komposit boraks-parafin. Panjang moderator 90 cm, panjang kolimator 173 cm dengan tetapan kolimasi $D/L=0,015$, tebal *beam shutter* dan *beam stopper* masing-masing 22 cm dan 30 cm. Dipasang perisai gamma dan perisai neutron untuk menutup berkas neutron keluar dari sela dinding dalam *beamport* dan dinding luar kolimator. Bahan perisai tersebut dibuat dari komposit boraks parafin 25 % berat dan timbal yang masing-masing panjangnya 50 cm dan 30 cm. Hasil analisis menunjukkan bahwa dari fluks neutron awal pada *beamport* bagian dalam $1,5 \cdot 10^{12}$ n/cm²s dapat dihasilkan fluks neutron termal di ruang sampel PGNAA $1,76 \cdot 10^8$ n/cm²s dengan arus neutron termal $9,29 \cdot 10^8$ n/s. Nilai fluks neutron termal tersebut memenuhi persyaratan untuk suatu sistem PGNAA yaitu berada pada orde 10^6 s/d 10^8 n/cm²s.

Kata kunci: PGNAA, analisis awal, *beamport*, fluks neutron, reaktor, Kartini

ABSTRACT

PRELIMINARY ANALYSIS OF PGNAA DESIGN USING NEUTRON SOURCE FROM BEAMPORT OF KARTINI REACTOR. A preliminary design analysis of PGNAA system using one of the Kartini reactor *beamports* as a neutron source have been carried out. This preliminary analysis includes determining neutron moderator and collimator, the analysis of parallel neutron, beam shutter and beam stopper. Calculation of neutronic properties of materials was done to choose the material that meet the functional requirements of PGNAA and to determine the geometry size. Based on the calculational results obtained that good material for moderator is graphite, aluminum as beam collimator, and beam shutter or stopper is made from borax-paraffin composite. The moderator length is 90 cm and collimator length is 173 cm with collimation constant $D / L = 0,015$. Beam shutter and beam stopper thickness are 22 cm and 30 cm respectively. Gamma and neutron shield are added surrounding beam colimator to shield the radiation out from the pitch between collimator and *beamport* wall. The shield material made from composite of paraffin 25 w % borax, and lead with the length of 50 cm and 30 cm respectively. The analysis result shows that from the neutron flux of $1,5 \cdot 10^{12}$ n/cm²s at the inner side of *beamport*, can be generated thermal neutron flux at the PGNAA sample chamber of $1,76 \cdot 10^8$ n/cm²s with the thermal neutron current of $9,29 \cdot 10^8$ n/s. This thermal neutron flux meet the requirement for a PGNAA system i.e. in the order of 10^6 to 10^8 n/cm²s.

Keywords: PGNAA, beamport, neutron flux, Kartini, reactor

1. PENDAHULUAN

Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA) adalah suatu metode analisis unsur dalam suatu bahan yang dapat dilakukan secara cepat. Metode ini menggunakan teknik aktivasi target dengan neutron termal yang secara simultan dilakukan analisis spektrum gamma serentak yang dipancarkan oleh inti target pada keadaan teraktivasi. Radiasi gamma serentak dipancarkan inti target yang menangkap neutron dan mengalami eksitasi energi. Radiasi gamma tersebut mencirikan spesifik atom yang memancarkannya. Dengan menggunakan instrumentasi pencacahan gamma resolusi dan sensitivitas tinggi serta dilakukan secara *online* dapat diperoleh hasil analisis komposisi unsur dalam sampel secara cepat.

Menurut IAEA (1) teknik PGNAA pada umumnya banyak diterapkan untuk analisis unsur unsur organik H, C, N, O, F, P, S, Cl dan unsur yang memiliki tampang lintang serapan neutron tinggi seperti B, Cd, Sm, As dan Gd yang kebanyakan meluruh sangat cepat sehingga tidak bisa diukur dengan metode analisis aktivasi neutron biasa atau NAA. Qian Zhu (2) menuliskan bahwa metode PGNAA banyak diterapkan dalam sistem pengendalian dan pengolahan batubara yang membutuhkan analisis kualitas batubara secara *on-line*, tulisan Henry Kurth (3) dan Darrel Leetham (4) terkait PGNAA pada pertambangan fosfat dan industri semen. Sementara itu Muhammad Saleem (5), Massimo R (6), dan A.A. Naqvi (7) membuktikan PGNAA cukup akurat untuk uji kualitas keramik dan

material terkait, serta untuk analisis sampel lingkungan, bahkan untuk mendeteksi ranjau darat seperti yang ditulis oleh D. L. Chichester (8), Dariush Rezai (9).

Komponen penyusun sistem PGNAA terdiri dari sumber neutron, moderator, kolimator, perisai neutron, perisai gamma dan peralatan pencacahan spektrometri gamma. Kinerja PGNAA dikatakan baik apabila sistem tersebut dapat menghasilkan spektrometri gamma serentak dengan noise rendah, parameter ini menjadi salah satu parameter yang dipertimbangkan di dalam perhitungan dan analisis rancangan., Adapun fluks neutron termal yang harus dipenuhi dan layak untuk PGNAA sesuai dengan rujukan IAEA (1), Manuel L. et. al. (13), Zizhu Zhang et.al. (17), dan Robinson J.A. et.al. (18), adalah berkisar pada orde 10^6 s/d 10^8 n/cm²s. Untuk mendapatkan PGNAA dengan kualifikasi tersebut di atas dibutuhkan perencanaan konstruksi geometri dan pemilihan bahan yang diperhitungkan dengan memperhatikan sifat interaksi neutron dengan materi dan spektrum energi neutron yang dikendalikannya. Pada prinsipnya neutron berenergi tinggi menghasilkan sifat interaksi dengan atom medium lebih kompleks daripada neutron energi rendah sehingga dalam merencanakan sistem PGNAA perlu mempertimbangkan proses moderasi untuk membuat spektrum energi neutron berubah menjadi termal sebelum dimanfaatkan dalam sistem PGNAA.

Pada perencanaan model PGNAA ini diperhitungkan bahan dan ukuran yang dapat memoderasi neutron dari sumbernya sehingga neutron berubah menjadi termal

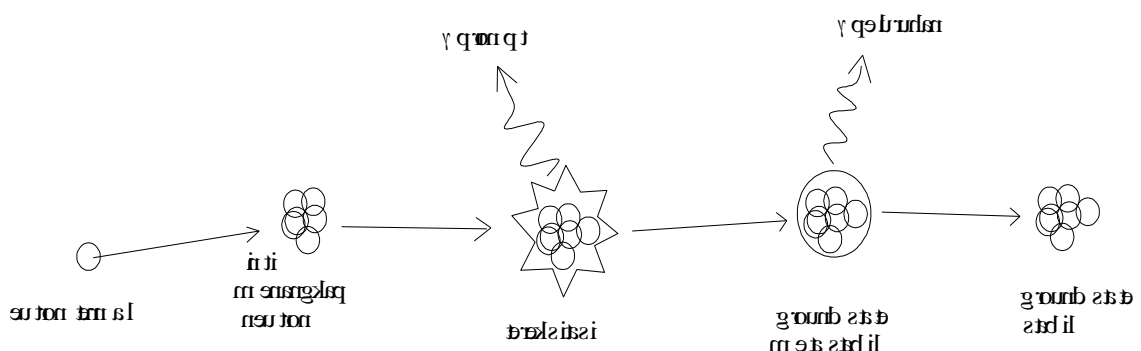
kemudian dikolimasi untuk menjadi neutron termal dengan berkas sejajar yang diarahkan menuju target analisis dalam ruang pencacahan PGNAA. Perhitungan sifat moderasi dilakukan berdasar pada sifat tampang lintang makroskopis bahan terhadap neutron. Perhitungan kualitas kolimator didasarkan pada perbandingan antara diameter dengan panjang kolimator. Makin besar nilai perbandingannya akan menghasilkan berkas neutron yang mendekati sejajar sedangkan hamburan dan serapan oleh udara di dalam kolimator dibuat rendah dengan memvakumkan medium kolimator.

2. TEORI

PGNAA adalah sebuah sistem analisis spektrum gamma yang berasal dari inti yang mengalami eksitasi energi karena menangkap neutron. Energi gamma yang dipancarkan adalah spesifik atom yang memancarkannya. Atom tersebut merupakan bagian dari elemen-elemen yang menyusun komposit target analisis. Dengan analisis spektrum gamma yang dipancarkannya dapat diketahui kandungan elemen-elemen dalam sebuah target iradiasi beserta konsentrasinya. Proses interaksi inti

dalam target PGNAA dapat dilukiskan seperti pada Gambar 1

Sistem PGNAA membutuhkan berkas neutron sejajar yang menyinari target secara terus menerus sehingga unsur-unsur pokok dalam target dapat menangkap neutron dan memancarkan radiasi gamma serentak yang kemudian dideteksi oleh spektrometer gamma. Sebagai indikator analisis adalah energi dan intensitas sinar gamma yang masing-masing menunjukkan jenis elemen konsentrasi elemen pemancarnya. Radiasi gamma serentak dapat langsung terdeteksi melalui analisis spektrum dan secara cepat diketahui komposit unsur-unsur dalam target ketika target dalam paparan radiasi neutron. Radiasi gamma peluruhan tidak mengganggu analisis karena intensitasnya jauh lebih kecil dari gamma serentak. Sistem pgnaa yang dapat mendukung proses ini membutuhkan kriteria pengendalian radiasi neutron yang ketat sehingga tidak ada neutron yang bocor keluar sistem PGNAA dan menimbulkan gangguan pada analisis spektrum gamma yang terjadi. Kriteria pengendalian neutron dapat dideskripsikan melalui proses moderasi, kolimasi, dan perisai radiasi.



Gambar 1. Proses kebolehhadrian radiasi gamma dalam target PGNAA

Apabila neutron berenergi tinggi bertumbukan dengan inti hidrogen atau atom ringan lainnya akan berakibat neutron kehilangan sebagian besar energi karena berpindah ke inti yang ditumbuknya. Fenomena ini menjadi dasar proses moderasi neutron. Moderator yang baik, mempunyaiampang serapan neutron kecil tetapiampang hamburan neutron besar dan mempunyai nomor massa kecil. Apabila medium berupa komposit makaampang lintang makroskopis ditetapkan berdasarkan pada rapat atom elemen molekul medium yang diperhitungkan Glasstone S (12) sbb.:

$$N_i = \frac{\rho}{mol} N_a n_i \quad (1)$$

di mana ρ rapat massa komposit, mol berat molekul komposit, N_a bilangan Avogadro, n_i jumlah atom I dalam molekul komposit, dan N_i rapat atom unsur i dalam komposit.

Tampang lintang makroskopis molekul komposit diperhitungkan sebagai jumlahampang lintang makroskopis masing-masing elemen yang terdapat dalam komposit dan dituliskan sebagai:

$$\begin{aligned} \Sigma_a &= \sum_1^j N_i \sigma_{ai} & \Sigma_s &= \sum_1^j N_i \sigma_{si} \\ \Sigma_t &= \sum_1^j N_i \sigma_{ti} \end{aligned} \quad (2)$$

di mana Σ_a , Σ_s , Σ_t , adalahampang lintang makroskopik molekul komposit, σ_{ai} , σ_{si} , σ_{ti} , adalahampang lintang mikroskopik atom unsur i, dan j adalah jumlah ragam unsur dalam komposit.

Proses moderasi neutron dapat diamati dengan memperhitungkan parameter tumbukan berkas neutron dalam medium moderator meliputi proses penurunan energi logartmik, jarak bebas merata, jumlah tumbukan, efisiensi dan daya moderasi. Penurunan energi logartmik (ξ) dari setiap neutron yang menumbuk atom medium, dapat dituliskan sbb. Glasstone S (12):

$$\xi = \frac{4A}{(1+A)^2} \quad (3)$$

Jarak bebas merata neutron diantara dua tumbukan yang dialaminya dapat dituliskan sebagai $\lambda_i = \frac{1}{\Sigma_t}$. Jumlah tumbukan yang dialami neutron cepat ($E = 1$ MeV) untuk menjadi termal ($E = 0,025$ eV), digunakan untuk membandingkan jumlah tumbukan neutron dalam medium komposit sebelum menjadi termal, dituliskan sebagai:

$$C = \frac{\ln \frac{E_1}{E_2}}{\xi} \quad (4)$$

Efisiensi penurunan energi logartmik neutron per satuan panjang jejak selama proses moderasi, efisiensi moderasi digunakan korelasi $\xi \frac{\Sigma_s}{\Sigma_a}$, sedangkan daya moderasi yaitu penurunan energi logartmik neutron per satuan panjang jejak selama proses moderasi dalam medium digunakan korelasi Glasstone S (12):

$$\xi \Sigma_s = \frac{\rho N_a}{M} (n_1 \sigma_{s1} \xi_1 + n_2 \sigma_{s2} \xi_2 + \dots) \quad (5)$$

$$\frac{I_m}{I_0} = \frac{A \exp(\Sigma_a L_m)}{4\pi(L_m)^2} \quad (7)$$

Apabila berkas neutron sejajar menembus medium tebal x , perubahan intensitas berkas neutron I_0 setelah menembus medium tebal x cm mempunyai kebolehjadian menjadi I_x yang diperhitungkan mengikuti fungsi eksponensial yaitu:

$$I_x = I_0 e^{-N\sigma_t x} = I_0 e^{-\Sigma_t x} \quad (6)$$

I_x/I_0 adalah nilai kebolehjadian neutron yang lolos interaksi dengan atom medium. Faktor perbandingan I_x/I_0 yang dituliskan sebagai $e^{-\Sigma_t x}$ dapat dinyatakan sebagai faktor kebolehjadian neutron tidak mengalami tumbukan dengan inti atom selama menembus medium tebal x cm. Demikian juga apabila yang digunakan adalah Σ_s atau Σ_a maka faktor yang diperoleh dalam perhitungan adalah kebolehjadian neutron lolos dari hamburan atau serapan inti medium yang dilewatinya.

Perhitungan arus neutron dalam PGNAA dilakukan dengan asumsi sumber neutron sebagai sumber titik yang memancar ke segala arah secara isotropik. Lintasan neutron dalam PGNAA berasal dari teras reaktor yang menembus moderator kemudian terkolimasi dalam kolimator PGNAA. Intensitas neutron yang keluar dari medium moderator (I_m) dapat ditentukan dengan pendekatan sebagai berikut:

di mana I_0 adalah intensitas sumber ($n/cm^2 s$), A adalah luas penampang efektif moderator (cm^2), L_m panjang moderator, dan Σ_a , adalah tampang lintang absorpsi makroskopik. A ditetapkan sesuai dengan konstanta kolimator (D/L) dan panjang kolimator (L_k) yang digunakan yaitu:

$$A = \pi \left[\frac{D(L_m + L_k)}{2} \right]^2 \quad (8)$$

Intensitas neutron yang keluar dari moderator diterima oleh kolimator untuk disaring menjadi berkas neutron sejajar. Selama melintas kolimator, berkas neutron mempunyai kebolehjadian berinteraksi dengan atom udara pengisi kolimator. Besarnya intensitas neutron yang keluar dari ujung kolimator (I') dapat ditentukan dengan pendekatan formulasi attenuasi neutron sebagai berikut:

$$I' = I_m \exp(\Sigma_a L_k) \quad (9)$$

Sedangkan arus neutron yang terukur di dalam sistem PGNAA (I_n) pada luas permukaan (A) dihitung dengan persamaan :

$$I_n = AI' \quad (10)$$

Kolimator neutron digunakan untuk penyaring berkas neutron sejajar yang dapat melewatinya. Batas sejajar berkas

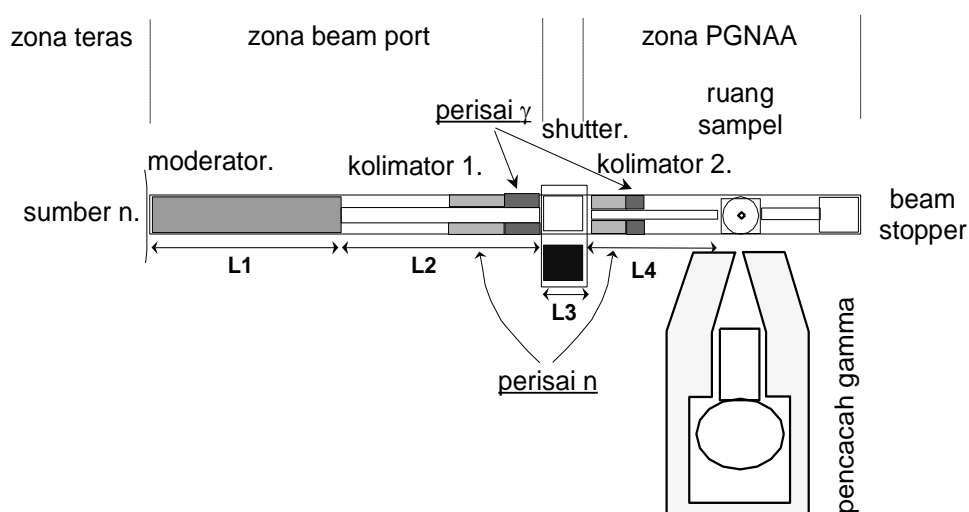
ditentukan oleh nilai D/L kolimator. D adalah diameter dan L adalah panjang kolimator, dengan nilai D/L yang makin kecil akan menghasilkan berkas neutron yang makin mendekati sejajar. Untuk kebutuhan kolimator yang direncanakan dalam PGNAA dengan sumber neutron teras reaktor Kartini ditetapkan nilai D/L sebesar 0,015, dengan mengacu nilai D/L tersebut dapat ditetapkan diameter kolimator apabila telah ditetapkan panjang kolimator. Diameter kolimator berkaitan dengan luas kolimator dan arus neutron yang direncanakan.

3. TATA KERJA

Sistem PGNAA ini dirancang menggunakan sumber neutron dari teras reaktor Kartini yang tersalur melalui saluran berkas (*beamport*) untuk radiasi sampel. Spektrum energi neutron hasil pembelahan di dalam teras reaktor tersebut adalah majemuk seperti terlihat dari hasil perhitungan MCNP yang dilakukan oleh Tegass S (11) dan ditampilkan pada Tabel 1

menunjukkan bahwa spektrum energi neutron pada *beamport* terdistribusi merata pada kelompok energi termal, epitermal dan cepat. Sedangkan sistem PGNAA membutuhkan sumber neutron termal dengan jangkauan energi (12 meV - 100 meV), sehingga neutron dari sumber teras reaktor Kartini memerlukan media untuk proses moderasi neutron sedemikian rupa sehingga jangkauan energi neutron dapat turun dan memenuhi kriteria sistem PGNAA.

Dirancang sistem PGNAA dengan susunan komponen utama meliputi : moderator, kolimator 1 dan kolimator 2, *beam shutter*, perisai neutron dan gamma, ruang sampel, dan *beam stopper*. Diagram skematik rancangan sistem PGNAA dengan sumber neutron *beamport* reaktor Kartini dilukiskan pada Gambar 2 di mana sistem PGNAA terbagi dalam 3 zona yaitu zona teras, zona *beamport* dan zona instrumentasi.



Gambar 2. Diagram konstruksi PGNAA dengan sumber neutron dari *beamport* reaktor Kartini

Pada zona teras, berkas neutron mempunyai energi majemuk. Selanjutnya pada zona *beamport* berkas dibuat mengalami proses moderasi menjadi neutron termal, kemudian dilewatkan kolimasi 1 untuk mendapatkan berkas neutron yang sejajar dalam spektrum energi neutron yang mayoritas telah menjadi termal. *Shutter* digunakan sebagai gerbang untuk menutup atau membuka berkas neutron termal dari teras reaktor Kartini guna pemanfaatan dalam PGNAA. Dalam zona PGNAA berkas neutron dilewatkan kolimasi 2 untuk mengarahkan neutron sejajar menuju ruang pencacahan PGNAA. Berkas neutron yang lolos dari ruang pencacahan diteruskan kedalam *beam stopper* untuk diserap sehingga tidak menyebabkan *noise* dalam sistem pencacahan.

Konstruksi dan ukuran salah satu *beamport* reaktor Kartini yang akan digunakan untuk fasilitas PGNAA ini dilukiskan pada Gambar 3. Pada reaktor Kartini tersedia 4 *beamport* terdiri dari sebuah *beamport* tangensial dan dua buah *beamport* radial tidak tembus dan sebuah *beamport* radial tembus. *Beamport* radial tembus menghasilkan neutron yang langsung dari teras tanpa melalui medium

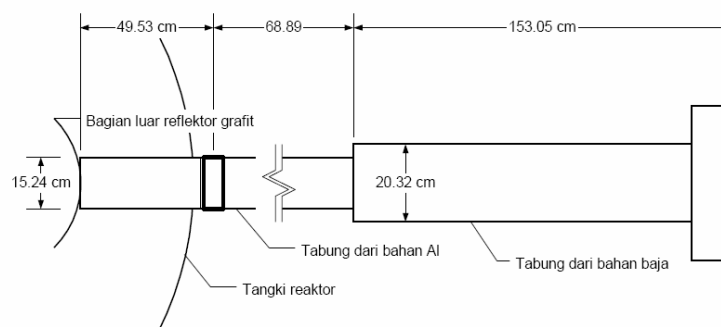
grafit sedangkan *beamport* radial tidak tembus menghasilkan neutron dari teras dengan melalui medium grafit reflektor.

Dilakukan analisis pemilihan *beamport* untuk sumber neutron PGNAA dan pada rancangan ini dipilih *beamport* radial tembus karena memiliki fluks neutron yang paling tinggi, dibanding *beamport* singgung seperti hasil simulasi yang dilakukan oleh Tegas S (1116). Dilakukan perhitungan dan analisis terhadap flux neutron pada permukaan dalam *beamport* radial tembus dengan MCNP dengan hasil sesuai penelitian Tegas S dan Syarip (11) seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Fluks neutron pada permukaan bagian dalam *beamport* radial tembus (11).

Jangkauan energi	Fluks n ($n/cm^2 s$)
0 – 0.5 eV	$6,0 \cdot 10^{11}$
0.5 eV – 1 MeV	$5,0 \cdot 10^{11}$
> 1 MeV	$4,0 \cdot 10^{11}$
total	$1,5 \cdot 10^{12}$

Terlihat dari Tabel 1 bahwa distribusi energi neutron sebagian berada pada zona termal, epitermal dan cepat dengan distribusi rata. Dibutuhkan moderator untuk menghasilkan neutron termal yang dominan untuk kebutuhan PGNAA.



Gambar 3. *Beamport* radial tembus reaktor Kartini (11)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Konstruksi PGNAA menggunakan sumber neutron dari *beamport* reaktor Kartini dibuat mengikuti ketentuan dalam Gambar 2., dengan nilai L1, L2 dan L3 sedemikian rupa sehingga sesuai dengan konstruksi *beamport* reaktor Kartini. Dari hasil penyesuaiannya diperoleh ukuran geometri subkomponen penyusun PGNAA seperti pada Tabel 2. Sebagai pengendali arus neutron dalam ruang pencacahan PGNAA digunakan *shutter* untuk memutuskan berkas neutron dari sumber dan *beam stopper* untuk menyerap berkas neutron yang tidak terpakai dalam ruang pencacahan PGNAA. Komponen moderator dan kolimator neutron dipasang pada kolom *beamport* sedangkan sebagai *shutter* neutron digunakan jendela penutup *beamport*. Sebagian penggal kolimator yang menyambungkan berkas neutron ke ruang aktivasi PGNAA dipasang di muka jendela *shutter* neutron. Ruang aktivasi dan *beam stopper* neutron dipasang sesudah kolimator. Untuk mengurangi *noise* pencacahan, dipasang perisai neutron dan perisai gamma pada sekitar kolimator.

Bahan moderator yang dipertimbangkan pada rancangan fasilitas PGNAA ini adalah: air berat, air, grafit, berilium, polyethylen dan parafin. Dilakukan perbandingan parameter neutronik dari masing-masing material tersebut dalam menjaga neutron tidak tertangkap dalam medium selama proses moderasi dari energi 1 MeV sampai menjadi neutron termal. Pada rancangan model PGNAA ini, moderator dibuat sebagai medium lintasan neutron

sumber menuju ke kolimator seperti pada Gambar 2, dimana dalam menembus medium diperhitungkan terjadi proses moderasi yang akan menurunkan energi kinetik neutron yang berhasil melintasi medium. Dengan menggunakan formulasi parameter neutronik yang dideskripsikan di atas yaitu persamaan (1) s/d (10) selanjutnya dihitung dan dibandingkan nilai parameter neutronik dalam menghasilkan neutron termal. Hasil perhitungan selengkapnya ditampilkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Untuk mendapatkan moderator yang baik digunakan kriteria komparasi parameter neutronik sbb: tampang lintang absorpsi relatif kecil, tampang lintang hamburan relatif besar, penurunan energi logaritmik per tumbukan besar, jumlah tumbukan neutron menuju termal kecil, jarak jelajah rerata relatif kecil, efisiensi moderasi besar, daya moderasi besar, dan kebolehjadian bebas tangkapan atom moderator relatif besar

Berdasar hasil perbandingan parameter neutronik diatas diperoleh air berat, grafit dan berilium sebagai bahan moderator yang kompetitif karena bahan lainnya gagal dalam memberikan kebolehjadian bebas serapan neutron relatif tinggi selama melintasi medium moderator yang ditetapkan 90 cm. Dari ketiga bahan tersebut grafit dapat dijadikan pilihan bahan moderator karena mudah didapat dibandingkan bahan moderator lainnya, hal ini sesuai dengan hasil penelitian Hashem Miri-Hakimabad (10). Grafit memberikan keuntungan sedikit menyerap neutron dan

memberikan kebolehjadian menghamburkan neutron lebih besar dari bahan lainnya, sehingga jika menjadi moderator akan menghasilkan kebolehjadian neutron termal yang lebih banyak. Perancangan kolimator ditetapkan berdasar perbandingan nilai D/L yang merepresentasikan kemampuan menyaring berkas jejak neutron yang bersifat koheren/sejajar. Nilai D/L makin kecil akan menghasilkan kualitas berkas yang makin koheren akan tetapi berakibat intensitas berkas yang makin kecil.

Ditetapkan dalam desain konstanta D/L = 0,015 akan menghasilkan berkas neutron koheren dengan intensitas memenuhi syarat kebutuhan analisis dalam PGNAA. Udara dalam kolimator dapat mengurangi kualitas kinerja kolimator karena terjadi proses hamburan oleh molekul udara dalam kolimator. Untuk menghindari ini dilakukan analisis perubahan tekanan udara terhadap karakteristik neutroniknya. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 2. Ukuran Geometri komponen pengendali neutron PGNAA

Sub komponen	Geometri	Ukuran
Moderator (L1))	Silinder	L1: 90 cm, Ø :15 cm
Kolimator I (L2)	Pipa	L2: 113 cm, Ø :5cm
Kolimator II (L4)	Pipa	L4: 60 cm, Ø:3 cm

Tabel 3. Hasil perhitungan parameter neutronik material bahan moderator

Moderator	ρ (g/cc)	Σ_a (cm ⁻¹)	Σ_s (cm ⁻¹)	Σ_t (cm ⁻¹)	ξ	N	λ (cm)
Air berat	1,1	0,000034	0,64	0,64	0,74	23	1,56
Air	1,0	0,02220	5,59	5,61	0,98	18	0,18
Grafit	1,6	0,00027	0,38	0,39	0,28	62	2,60
Berilium	1,85	0,00120	0,87	0,87	0,36	49	1,15
Polyethylen	0,94	0,03150	7,89	7,92	0,98	18	0,13
Parafin	0,8	0,04660	11,60	11,60	0,99	18	0,09

Keterangan: Σ_a , Σ_s dan Σ_t masing-masing adalah tampang makroskopis absorpsi, hamburan dan total. ξ adalah penurunan energi logaritmik/ tumbukan, N adalah jumlah tumbukan neutron dari energi cepat sampai ke termal, dan λ adalah jarak jelajah rerata.

Tabel 4. Hasil perhitungan parameter neutronik material bahan moderator

Moderator	Efisiensi moderasi	Daya moderasi	Panjang moderator (cm)	Kebolehjadian neutron bebas tangkapan atom moderator
Air berat	14000.	0,48	90	0,99
Air	2470.	5,48	90	0,13
Grafit	401.	0,11	90	0,98
Berilium	265	0,31	90	0,90
Polyethylen	246	7,75	90	0,06
Parafin	246	11,5	90	0,01

Tabel 5. Hasil perhitunganampang lintang makroskopis fungsi tekanan udara

Komposisi udara standard P = 1 atm, T = 27 ^o C	Massa jenis udara (gr/cc)	Tampang lintang makroskopis (cm ⁻¹)		
		absorpsi	hamburan	total
Argon: 0,93%				
N2: 78,08%	1,17.10 ⁻³	2,90.10 ⁻⁴	2,28.10 ⁻³	2,5.10 ⁻³
O2: 20,95%				

Tabel 6. Hasil perhitungan kebolehjadian bebas tumbukan neutron dengan molekul udara dalam kolimator

Komposisi udara	Panjang kolimator	Tekanan udara dlm kolimator	Kebolehjadian neutron bebas tumbukan dengan atom udara
Argon: 0,93%		1 atm	0,64
N2: 78,08%	173 cm	0,1 atm	0,96
O2: 20,95%		1 torr	0,999

Tabel 7. Data hasil perhitungan karakteristik sumber neutron pada *beamport* radial tembus untuk PGNAA

Paremeter	Nilai/ spesifikasi	Keterangan
Sumber neutron	Intensitas: 1,5.10 ¹² n/cm ² s	Spesifikasi: neutron cepat. Berkas neutron menyebar, isotrop. Geometri sumber: luasan
Moderator	Diameter: 15 cm Panjang: 90 cm	Bahan: Grafit
Intensitas neutron termoderasi	1,76.10 ⁸ n/cm ² s	Neutron termal, berkas neutron menyebar, isotrop
Kolimator	D/L = 0,015, L = 173 cm,	Tekanan udara = 1 torr
Intensitas neutron terkolimasi	1,76.10 ⁸ n/cm ² s	Neutron termal, berkas neutron sejajar
Luas penampang	5,29 cm ²	∅ = 2,6 cm
Arus berkas	9,29.10 ⁸ n/s	Spesifikasi: neutron termal. Berkas sejajar

Tampak bahwa tekanan udara dalam kolimator mempengaruhi lintasan neutron. Untuk menghindari gangguan tersebut, kolimator PGNAA direncanakan terbuat dari bahan pipa aluminium yang rapat pada kedua ujungnya dan kedap udara. Permukaan fisik pipa bagian dalam dibuat halus dan dihampakan hingga tekanan udara mendekati 1 torr untuk membuat

attenuasi neutron udara menjadi minimal. Ketetapan kolimasi D/L = 0,015 dan diameter berkas neutron dari kolimator ditetapkan sebesar 2,6 cm. Arus neutron diperoleh sebagai hasil kali antara intensitas berkas dengan luas permukaan kolimator. Intensitas berkas diperoleh dari hasil perhitungan untuk bahan moderator grafit dan tetapan kolimator D/L = 0,015

ditampilkan pada Tabel 7. Berdasar hasil perhitungan perancangan PGNAA dengan sumber neutron dari *beamport* radial tembus reaktor Kartini dapat menghasilkan intensitas pada permukaan sample sebesar $1,79 \cdot 10^8$ n/cm²s dan arus berkas neutron $9,48 \cdot 10^8$ n/s. Diharapkan berkas neutron tersebut mayoritas adalah neutron termal.

Berdasarkan data IAEA (1) intensitas (fluks) neutron dari beberapa fasilitas PGNAA di beberapa negara seperti India (BARC), Korea (KAERI), Vietnam (*Nuclear Research Institute, Dalat*), Hongaria (*Budapest Research Reactor*), menunjukkan bahwa fluks neutron termal yang layak untuk PGNAA adalah berkisar pada orde 10^6 s/d 10^8 n/cm²s. Hasil serupa untuk disain dan konstruksi fasilitas PGNAA di reaktor *In-Hospital Neutron Irradiator (IHNI)* di Beijing dengan fluks neutron termal $3 \cdot 10^6$ n/cm²s pada daya penuh 30 kW Zizhu Zhang et.al. (17). Sedangkan pada fasilitas PGNAA di reaktor TRIGA *Oregon State University* memberikan fluks neutron termal pada permukaan sample $2,8 \cdot 10^7$ n/cm²s seperti yang dilaporkan oleh Robinson J.A., et.al. (18). Bahkan fasilitas PGNAA di reaktor RA-3 Argentina fluks neutron bisa mencapai orde 10^9 n/cm²s seperti yang ditulis oleh Manuel L. (13). Demikian pula sistem PGNAA yang telah diaplikasikan di industri batubara memiliki nilai fluks neutron berkisar seperti pada nilai fluks di atas seperti yang dilaporkan oleh Qian Zhu (2) dan Henry Kurth (3). Untuk menghindari radiasi gamma sekunder yang berasal dari interaksi neutron dengan material perisai maka perisai gamma ditambahkan pada bagian luar perisai neutron yang terpasang. Perisai

gamma direncana dari bahan timah yang dikonstruksi sesuai dengan geometri ruang yang membutuhkannya. Nilai tampang lintang serapan neutron yang besar pada perisai neutron dapat diperoleh dengan membuat komposit dari bahan penyerap neutron dan moderator. Sebagai bahan perisai neutron pada PGNAA dipertimbangkan penggunaan bahan yang mudah didapat yaitu: campuran parafin (C_n-H_{2n+2}) dengan borax (Na₂B₄O₇·10H₂O), bahan ini terbukti cukup baik digunakan pada sistem NAA *invivo* sesuai hasil penelitian Rezaei Moghaddam (14).

Beam stopper, perisai neutron dan *shutter* pada PGNAA berfungsi untuk menutup berkas neutron yang tidak dikehendaki. Bahan yang digunakan untuk kebutuhan ini adalah komposit yang banyak mengandung penyerap neutron sehingga dapat diperoleh ukuran tebal yang dapat diminimumkan. *Shutter* digunakan untuk menutup berkas pada kolimator apabila tidak digunakan. Perisai neutron digunakan untuk menutup berkas neutron yang keluar dari, sela antara dinding kolimator dengan kolom *beamport* dan *beam stopper* digunakan untuk menyerap berkas neutron yang tidak termanfaatkan dalam ruang iradiasi dalam sistem PGNAA. Posisi komponen *beam stopper*, perisai neutron dan *shutter* dalam sistem PGNAA dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasar hasil perhitungan tampang lintang makroskopis komposisinya diperoleh data sifat attenuasi neutron yang makin tinggi konsentrasi borax dalam komposit parafin-borax menghasilkan sifat attenuasi neutron yang makin baik tetapi menghasilkan sifat komposit yang

makin rapuh. Oleh karena itu ditetapkan komposit perisai parafin-borax menggunakan konsentrasi borax 25 % berat dari berat kompositnya. Pada perisai komposit parafin 25 % berat borax tebal 30 cm terhitung menghasilkan attenuasi neutron atau kebolehjadian meloloskan neutron tanpa interaksi tumbukan sebesar $8,7 \cdot 10^{-88}$, nilai ini sangat kecil dibandingkan dengan nilai 1 yang mengindikasikan medium tanpa perisai. Bahan perisai lainnya yang dibutuhkan dalam komponen PGNAA adalah plat LiF sebagai penyekat ruang pencacahan sampel PGNAA yang mempunyai sifat dapat menangkap neutron tidak menghasilkan radiasi gamma dan timah hitam (Pb) sebagai bahan perisai gamma perangkat pencacahan yang digunakan dalam sistem PGNAA.

Hasil perhitungan komposisi bahan dan geometri komponen untuk konstruksi

PGNAA dengan sumber neutron reaktor Kartini ditampilkan pada Tabel 8. Untuk sistem pencacahan telah tersedia sistem spektrometri gama dengan detektor neutron HPGe yang telah digunakan untuk uji coba sistem PGNAA berbasis sumber neutron PuBe seperti yang dilaporkan Syarip (15). Sistem PGNAA berbasis sumber neutron dari reaktor ini diharapkan dapat dijadikan sarana pembanding hasil analisis unsur dengan sistem PGNAA berbasis sumber neutron isotopik maupun generator neutron yang telah banyak diaplikasikan untuk analisis limbah industri, medis, sampel lingkungan maupun bahan peledak seperti beberapa laporan penelitian a.l. Muhammad Saleem (5), D. L. Chichester (8), dan Dariush Rezai (9)

Tabel 8. Spesifikasi hasil analisis awal rancangan konstruksi komponen PGNAA dengan sumber neutron dari *beamport* reaktor Kartini (lihat Gambar 2)

Komponen	Geometri	Ukuran	Bahan
Perisai neutron (1)	Silinder berlubang	L:30 cm, $\varnothing_{\text{luar}}$:20 cm, $\varnothing_{\text{dalam}}$:5,5cm	Komposit parafin 25% berat borax
Perisai neutron (2)	Bujur sangkar berlubang silinder	L:20 cm, $\varnothing_{\text{lobang}}$:3 cm, rusuk a: 20 cm	Komposit parafin 25% berat borax
Perisai gamma (1)	Silinder berlubang	L:20 cm, $\varnothing_{\text{luar}}$: 20 cm, $\varnothing_{\text{dalam}}$:5,5cm	Timah hitam (Pb)
Perisai gamma (2)	Bujur sangkar berlubang silinder	L:10 cm, $\varnothing_{\text{lobang}}$: 3 cm, rusuk a: 20 cm:	Timah hitam (Pb)
Shutter	Balok pejal	L3: 8 cm, P: 22 cm, L: 22 cm	Komposit parafin 25% berat borax
Beam stopper	Balok pejal berongga silinder	Balok: 30cm x 30cm x 30cm Rongga \varnothing :5 cm, L:8 cm	Komposit parafin 25% berat borax
	Pelat tebal 2 cm	30cm x 30 cm	Timah hitam (Pb)
Perisai pencacah gamma PGNAA	Susunan <i>lead brick</i> membentuk ruang	Geometri dan volume bergantung pada ukuran detektor yang digunakan	Timah hitam (Pb)
Ruang aktivasi PGNAA	Pelat tebal 2 cm	15 x 15 x 15 cm	LiF

5. KESIMPULAN

Menurut hasil analisis awal rancangan sistem PGNAA untuk sampel lingkungan dengan sumber neutron dari *beamport* reaktor Kartini cukup layak, dan perlu dilakukan analisis ulang yang lebih rinci sebelum direalisasikan. Sebagai moderator neutron digunakan bahan grafit dengan panjang 90 cm. Kolimator neutron berbentuk pipa aluminium panjang 173 cm dengan tetapan $D/L = 0,015$ dan dihampakan dengan tekanan ≤ 1 torr. Berkas neutron dari *beamport* yang tidak melalui kolimator dihentikan menggunakan perisai neutron disekitar kolimator yang terbuat dari bahan komposit parafin 25 % berat borax. Sedangkan radiasi gamma dihentikan menggunakan perisai timah hitam. Berdasar hasil perhitungan disimpulkan bahwa dari intensitas neutron total *beamport* radial bagian dalam yang menempel pada teras reaktor Kartini sebesar $1,5 \cdot 10^{12}$ n/cm²s dapat menghasilkan berkas neutron dengan arus sebesar $9,29 \cdot 10^8$ n/s dan intensitas neutron termal $1,76 \cdot 10^8$ n/cm²s di ruang aktivasi PGNAA. Intensitas neutron termal tersebut sudah memenuhi persyaratan untuk suatu sistem PGNAA yaitu berada pada orde 10^6 s/d 10^8 n/cm²s.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), Database of prompt gamma rays from slow neutron capture for elemental analysis, Vienna, IAEA, STI/PUB/1263, 2007.
2. Qian Zhu, Coal sampling and analysis standards, IEA Clean Coal Centre, Park House 14 Northfields London SW18 1DD, 2014. 93p.
3. Henry Kurth, Real time on-belt elemental analysis using PGNAA for mineral processing plant control, Scantech International Pty Ltd, Australia; 2014. Available from: http://web.cim.org/push_file.cfm
4. Darrel Leetham, PGNAA improves process and quality control in cement production, Thermo Fisher Scientific, June 2014. Available from: <http://acceleratingscience.com>
5. Muhammad Saleem, Determination of cadmium concentration in water samples using prompt gamma neutron activation technique, PHYS 505 Graduate Lab, ID # G200902830, 2010.
6. Massimo Rogante, et al., Feasibility study for a neutron-based investigation of polymer cement concretes, Universal Journal of Applied Science. 2013; 1(1): 11-17.
7. Naqvi AA, et al., Optimization of a prompt gamma setup for analysis of environmental samples, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, April 2013; 296(1): 215-221.
8. Chichester DL, Caffrey AJ, Twomey TR. Nondestructive identification of chemical warfare agents and explosives by neutron generator-driven PGNAA, SciTech Connect; 2007; Technical Meeting - Neutron Generators for Activation Analysis Purposes, Vienna, Austria.
9. Dariush Rezai, Mohammad Mohammadi. Prompt gamma neutron activation

- analysis of carbon bulk samples with an Am-Be neutron source, Journal of Theoretical Physics and Cryptography, JPTC, November 2012; 1(1).
10. Hashem Miri-Hakimabad, et al.: An optimum landmine detection system using polyethylene moderator and ^{241}Am -Be as a neutron source, Asian J. Exp. Sci., 2008; 22(1): 153-158.
11. Tegas Sutondo, Syarip, Karakteristik berkas pada *beamport* tembus dan singgung reaktor Kartini, Jurnal Iptek Nuklir Ganendra, Juli 2014; 17(2): 83-90.
12. Glasstone S, Sesonske A, Nuclear Reactor Engineering, Fourth Edition, Volume One, Springer, 1994.
13. Manuel L. et al.: Development of a prompt gamma neutron activation analysis facility for ^{10}B concentration measurements at RA-3: Design Stage, Applied Radiation and Isotopes, December 2011; 69(12): 1928-1931.
14. Rezaei Moghaddam Y. et al.: Optimization of body composition analyzer facility considering operator dosimetry, J Biomed Phys Eng. 2012; 2(4).
15. Syarip, Eksperimen pembuatan sistem penganalisis unsur dengan metode gama serentak menggunakan sumber neutron Pu-Be. Jurnal Iptek Nuklir Ganendra, 2002; 5(1): 23-30.
16. Tegas Sutondo, Beam modeling for PGNAA experimental facility at Kartini reactor, J. Iptek Nuklir Ganendra, Juli 2015; 18(2): 107-113.
17. Zizhu Zhang, Yizheng Chong, Xinru Chen, Congjun Jin, Lijun Yang, Tong Liu, PGNAA system preliminary design and measurement of In-Hospital Neutron Irradiator for boron concentration measurement, Applied Radiation and Isotopes, December 2015; 106: 161–165.
18. Robinson J.A., Hartman M.R. and Reese S. R. (2010). Design, construction and characterization of a prompt gamma activation analysis facility at the Oregon State University TRIGA reactor. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2010; 283(2): 359-369.