

PEMBUATAN DAN UJI COBA AWAL DETEKTOR NEUTRON SWADAYA DENGAN BAHAN EMITER PERAK LOKAL

Agus Baskoro, Widarto, Mudjijono

Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PEMBUATAN DAN UJI COBA AWAL DETEKTOR NEUTRON SWADAYA DENGAN BAHAN EMITER PERAK LOKAL. Dicoba dibuat detektor neutron swadaya dari bahan-bahan lokal, sebagai bahan emiter diambil perak yang ada dipasaran Kota Gede Yogyakarta dengan kemurnian 82 %, sebagai bahan isolator digunakan teflon dan sebagai kolektor digunakan *stainless steel* dari pasaran lokal. Untuk bahan emiter yang dibuat berbentuk silindris dengan diameter 0,77 cm dan panjang 15 cm, dari hasil pengujian detektor sebagai pengukur fluks neutron di Reaktor Kartini menunjukkan bahwa besarnya perubahan daya reaktor berbanding linier dengan perubahan arus yang dihasilkan detektor.

ABSTRACT

FABRICATION AND PRE TEST OF SELF POWERED NEUTRON DETECTOR WITH LOCAL SILVER EMITTER. A Self Power Neutron Detector (SPND) has been constructed. The detectors consists of silver as a neutron sensitive metallic emitter, surrounded by teflon insulator and the resulting cylindrical assembly is enclosed by an stainless steel sheath as its collector. All the detector materials can be found from local market. The results of measurement for SPND with 0.77 cm diameter and 15 cm long cylindrical silver emitter in Kartini reactor showed that the detector current will increase linearly with increase the reactor power.

PENDAHULUAN

Menurut Bock [1] saat ini detektor swadaya pegang peranan penting dalam instrumentasi reaktor khususnya reaktor daya. Fungsi detektor swadaya tidak hanya untuk pemetaan distribusi fluks neutron perbagian di teras reaktor pada kondisi tetap, tetapi karena detektor swadaya juga mempunyai tanggap yang handal (reliable) yang akan serentak memberikan sinyal jika ada perubahan fluks neutron yang cepat maka detektor swadaya bisa langsung dikopel dengan rangkaian sistem keselamatan reaktor ke sistem *scram* atau ke rangkaian pengontrol untuk mengatur kedudukan batang kendali secara otomatis.

Pada dasarnya detektor neutron swadaya adalah detektor aktivasi yang tidak memerlukan catu daya seperti jenis detektor radiasi lainnya. Umumnya detektor neutron swadaya terdiri dari logam emiter silindris yang diisolasi dari selubung kolektor logam. Adapun mekanisme terjadinya arus detektor yang sebanding dengan fluks neutron yang ditangkap oleh detektor menurut Gebureck [2], adalah oleh karena bahan emiter yang menangkap neutron akan serentak memancarkan radiasi γ . Karena interaksi foto listrik, efek Compton, produksi pasangan dan tangkapan elektron, antara γ serentak dengan

bahan emiternya sendiri maka akan timbul elektron. Elektron-elektron ini akan menembus isolator dan terkumpul pada kolektor yang selanjutnya terukur pada meter Keithley sebagai arus detektor. Sedang menurut Sovka [3] pelapukan β bahan emiter dan pelapukan radiasi lainnya yang menimbulkan β secara tidak langsung, dan selanjutnya tertangkap pada kolektor juga, akan memberikan kontribusi arus detektor.

Menurut Jaschik dan Seifritz [4,5] bila dilihat dari respons detektor, ada dua jenis SPND yaitu : yang pertama adalah *prompt* SPND (detektor swadaya serentak) adalah detektor swadaya yang bahan emiternya karena menangkap neutron akan serentak memancarkan γ , sehingga arus yang terbaca pada meter adalah serentak, bahan emiter umumnya digunakan cobalt, erbium dan hafnium. Sedangkan yang kedua adalah *delayed* SPND (detektor swadaya kasip), adalah detektor swadaya yang bahan emiternya karena menangkap neutron akan menjadi aktif dan meluruh memancarkan β , sehingga arus yang terbaca pada meter akan terlambat (kasip). Bahan emiter yang digunakan pada umumnya adalah rhodium, vanadium dan gadolinium.

Menurut Emelyanov [6] perak yang mempunyai unsur stabil ^{107}Ag dan ^{109}Ag juga mempunyai kemungkinan untuk dapat digunakan sebagai bahan emiter detektor swadaya. Karena perak dijual pada pasaran lokal dengan harga yang murah, dan dari analisis secara kualitatif menunjukkan bahwa perak lokal tidak mengandung unsur-unsur penyerap sehingga perak lokal dapat digunakan sebagai bahan reaktor, maka dipandang perlu adanya penelitian apakah bahan perak lokal dapat digunakan sebagai bahan emiter detektor swadaya. Dengan tujuan tersebut maka dilakukan pembuatan detektor swadaya dengan bahan emiter perak yang dibeli dari pasaran Kota Gede Yogyakarta dengan kemurnian 82 %, sedang teflon sebagai isolator dan *stainless steel* sebagai kolektor juga dibeli dari pasar lokal. Selanjutnya detektor yang dibuat tersebut diuji untuk mengukur fluks neutron reaktor Kartini yang dilakukan secara periodis selama kurang lebih satu tahun.

PRINSIP KERJA DETEKTOR SWADAYA

Prinsip kerja dan model perhitungan arus detektor swadaya didasarkan pada:

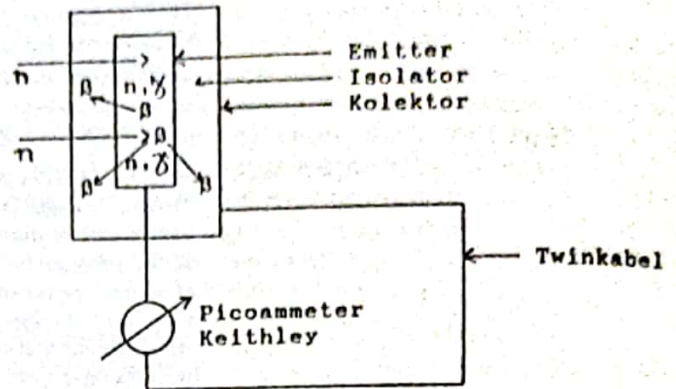
1. Sumbangan arus serentak yaitu arus detektor yang ditimbulkan karena bahan emiter menangkap neutron dan serentak memancarkan γ . Karena interaksi γ serentak tersebut dengan bahan emiter maka akan timbul elektron. Selanjutnya elektron-elektron ini akan terkumpul pada kolektor sebagai penyumbang arus serentak (I_p).
2. Sumbangan arus latar yaitu arus detektor yang ditimbulkan karena radiasi bukan neutron dari teras reaktor berinteraksi dengan bahan emiter yang selanjutnya menimbulkan elektron dan terkumpul pada kolektor sebagai penyumbang arus latar (I_b).
3. Sumbangan arus kasip yaitu arus detektor yang ditimbulkan karena aktivasi neutron. Bahan emiter akan mengalami pelapukan β , yang selanjutnya akan terkumpul di kolektor sebagai penyumbang arus kasip (I_d).

Prinsip kerja detektor neutron swadaya dapat dilihat pada Gambar 1.

Dengan demikian besarnya arus total detektor adalah : $I_{tot} = I_p + I_b + I_d$ (1)

Karena kabel yang digunakan juga memberikan kontribusi arus (I_k), maka arus yang ter baca pada picoammeter Keithley (I_t) adalah :

$$I_t = I_{tot} + I_k \quad (2)$$



Gambar 1. Prinsip kerja detektor neutron swadaya

PEMBUATAN DETEKTOR SWADAYA DAN CARA PENGUJIAN

Rancangan Detektor Neutron Swadaya

Secara sederhana besar arus detektor yang dihasilkan $I(t)$ adalah berbanding langsung dengan banyaknya atom emiter yang menangkap neutron [7]:

$$I(t) = C q \sigma N \phi (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

C adalah konstanta yang bergantung pada: geometri detektor, serapan β bahan emiter dan isolator, dan efisiensi koleksi muatan dari kolektor, q adalah jumlah elektron yang timbul per neutron yang diserap emiter (jumlah β kali muatan elementer), σ adalahampang lintang aktivasi bahan emiter N adalah banyaknya atom bahan emiter, ϕ adalah fluks neutron, λ adalah konstanta peluruhan dari isotop pemancar β dalam bahan emiter akibat aktivasi neutron.

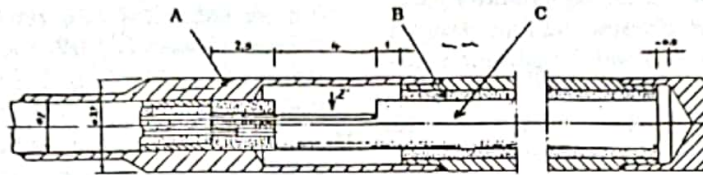
Sehingga semakin besar bahan emiter maka arus yang dihasilkan juga akan semakin besar atau dengan kata lain sensitivitas detektor akan semakin besar, tetapi dengan semakin besarnya bahan emiter maka ekonomi neutron di reaktor akan terganggu. Sehingga rancangan dari bahan emiter yang baik adalah sekecil mungkin tapi sudah cukup memberikan arus yang bisa diukur oleh picoammeter.

Menurut Bertz [8] pada umumnya desain dari detektor swadaya yang dijual untuk digunakan di reaktor daya adalah sudah standar, ukuran dimensi yang digunakan harus menyesuaikan dengan pipa pengarah yang sudah standar ukurannya untuk reaktor daya, dan biasanya detektor didesain berbentuk silindris supaya tidak banyak memakan tempat dan secara mekanis mudah diselipkan ke pipa pengarah. Gambar 2 adalah bagan dan ukuran dimensi dari detektor swadaya yang umum digunakan di reaktor daya. Diameter terluar detektor 3,7 mm sedang panjang detektor bervariasi dari 10 cm hingga 1 m. Biasanya sebagai kolektor digunakan Inconel 600, sebagai isolator digunakan MgO atau Al_2O_3 dan sebagai emiter dari C_o , R_h atau V.

jangkau β dalam bahan isolator masih lebih besar dari diameter isolator, sehingga semua β yang timbul pada emiter masih bisa sampai pada kolektor. Secara empiris untuk $E_b = 0,5$ MeV (peluruhan perak mempunyai tenaga β tertinggi 2,84 MeV dan terendah 0,53 MeV) akan didapatkan ketebalan maksimum bahan teflon yang digunakan agar tidak ada penyerapan β adalah sebesar 0,175 cm. Sehingga untuk bahan kolektor *stainless steel* yang sudah ada dengan diameter dalam 1,12 cm didapatkan besar diameter emiter perak = $(1,12 - 2 \times 0,175)$ cm = 0,77 cm.

Pembuatan Detektor

Sebelum dilakukan pembuatan detektor swadaya, bahan-bahan yang akan digunakan diuji terlebih dahulu, apakah bahan-bahan ter-



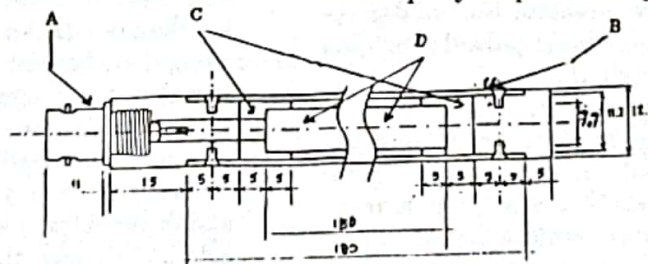
Gambar 2. Rancangan detektor swadaya yang umum di pasaran

Keterangan :

- A = kolektor dari inconel 600 tebal 0,5 mm
- B = isolator dari MgO atau Al_2O_3 tebal 0,35 mm
- C = emiter dari V, Co, Rh diameter 2 mm

Dalam merancang detektor yang akan dibuat (Gambar 3) besarnya diameter bahan emiter perak lokal harus disesuaikan dengan besar diameter dalam selongsong kolektor *stainless steel* yang sudah ada. Dengan memperhitungkan faktor serapan β pada bahan isolator, dipilih diameter perak sekecil mungkin sehingga

sebut *nuclear grade* yang bisa digunakan di reaktor. Pengujian dilakukan secara kualitatif dengan menggunakan analisis pengaktifan neutron. Dari hasil pengujian bahan emiter perak yang dibeli dari Kota Gede dengan kadar 82% menunjukkan adanya kandungan unsur-unsur ^{107}Ag , ^{109}Ag , ^{27}Al , ^{197}Au , ^{209}Bi , ^{52}Cr , ^{63}Cu , ^{59}Co , dan ^{56}Fe dan tidak mengandung unsur-unsur penyerap. Hasil pengujian bahan



Gambar 3. Konstruksi detektor swadaya yang dibuat

Keterangan :

- A = sambungan BNC
- B = kolektor dari *stainless steel* diameter 12,7 mm
- C = isolator dari teflon tebal = 0,175 mm
- D = emiter perak kadar 82% diameter 7,7 mm

kolektor SS, bahan isolator teflon dan sambungan BNC juga menunjukkan tidak adanya kandungan unsur-unsur penyerap. Pembuatan detektor swadaya sebanyak 10 buah dilakukan sendiri di bengkel PPNY BATAN, rancangan dari ketebalan bahan emiter diambil dengan menyesuaikan bahan selongsong *stainless steel* yang sudah ada. Konstruksi detektor swadaya yang dibuat ditunjukkan dalam Gambar 3.

Pengujian Awal Karakter Detektor

Sebelum diuji di reaktor, 10 detektor yang dibuat diuji apakah mungkin sambungannya terlepas, dengan cara mengukur tahanan antara *ader* (elektrode dalam) sambungan BNC dengan emiter, dan antara *ground* (elektrode luar) BNC dengan kolektor, selain itu juga dilakukan pengukuran tahanan isolator detektor.

Mekanisme pengukuran daya reaktor yang dilakukan di reaktor Kartini, adalah dengan cara mengukur fluks neutron dengan menggunakan detektor FC dan CIC yang selanjutnya ditampilkan pada meter daya. Oleh sebab itu daya reaktor yang terbaca pada meter daya adalah berbanding lurus dengan besarnya fluks neutron yang diinformasikan oleh detektor tersebut. Karena informasi detektor yang digunakan tersebut cukup dapat dipercaya, maka untuk pengujian awal karakter detektor yang dibuat terhadap perubahan fluks neutron yang akan dilakukan adalah cukup dengan membaca meter daya saja. Pengujian unjuk kerja detektor dilakukan di reaktor Kartini di daerah Lazy Susan. Pada waktu pengujian digunakan dua buah kabel koaksial. Yang satu buah disambung ke detektor dan yang lainnya digunakan untuk kalibrasi. Juga digunakan dua buah picoammeter Keithley untuk mengukur besar arus detektor dan besar arus kabel.

Karena kesibukan reaktor Kartini dan optimasi waktu pengujian maka jadwal pengujian dilakukan sebagai berikut :

P₁ : pengujian pertama dilakukan dengan mengukur arus detektor terhadap perubahan daya reaktor, selanjutnya dilakukan iradiasi selama 3 x 24 jam terus menerus pada daya reaktor 100 kW. Sesudahnya detektor dikeluarkan dari reaktor selama 3 hari, selanjutnya dilakukan pengujian P₂.

P₂ : pengujian karakter detektor kedua, dilakukan dengan mengukur arus detektor pada daya 100 kW. Iradiasi dilakukan selama 4 jam terus menerus. Sesudah detektor

dikeluarkan dari reaktor selama 4 hari selanjutnya dilakukan pengujian P₃.

P₃ : pengujian karakter detektor ketiga, dilakukan dengan mengukur arus detektor pada daya 100 kW. Iradiasi dilakukan selama 4 jam terus menerus. 7 hari sesudah detektor dikeluarkan dari reaktor dilakukan pengujian P₄.

P₄ : pengujian karakter detektor keempat, dilakukan dengan mengukur arus detektor pada daya 100 kW. Iradiasi dilakukan selama 4 jam terus menerus. 7 hari sesudah detektor dikeluarkan dari reaktor selama 7 hari, selanjutnya dilakukan pengujian P₅.

P₅ : pengujian kelima dilakukan dengan mengukur arus detektor terhadap perubahan daya reaktor. Selanjutnya dilakukan iradiasi selama 4 jam terus menerus pada daya reaktor 100 kW. 14 hari sesudah detektor dikeluarkan dari reaktor dilakukan pengujian P₆.

P₆ : pengujian karakter detektor keenam, dilakukan dengan mengukur arus detektor pada daya 100 kW. Iradiasi dilakukan selama 4 jam terus menerus. 14 hari sesudah detektor dikeluarkan dari reaktor dilakukan pengujian P₇.

P₇ : pengujian karakter detektor ketujuh, dilakukan dengan mengukur arus detektor pada daya 100 kW. Iradiasi dilakukan selama 4 jam terus menerus. 28 hari sesudah detektor dikeluarkan dari reaktor dilakukan pengujian P₈.

P₈ : pengujian karakter detektor kedelapan, dilakukan dengan mengukur arus detektor pada daya 100 kW. Iradiasi dilakukan selama 4 jam terus menerus. 66 hari sesudah detektor dikeluarkan dari reaktor dilakukan pengujian P₉.

P₉ : pengujian kesembilan dilakukan dilakukan dengan mengukur arus detektor terhadap perubahan daya reaktor. Selanjutnya dilakukan iradiasi selama 4 jam terus menerus pada daya reaktor 100 kW. Sesudah detektor dikeluarkan dari reaktor selama 112 hari, dilakukan pengujian P₁₀.

P₁₀ : pengujian karakter detektor kesepuluh, dilakukan dengan mengukur arus detektor pada daya 100 kW. Iradiasi dilakukan selama 4 jam terus menerus. 175 hari sesudah detektor dikeluarkan dari reaktor selanjutnya dilakukan pengujian P₁₁.

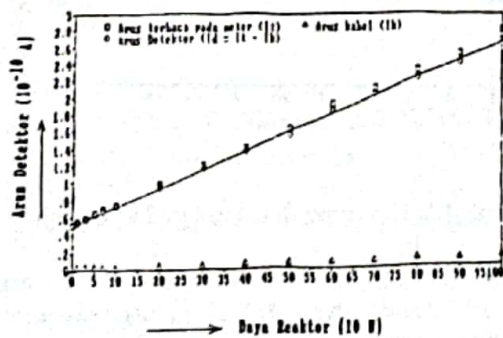
P₁₁ : pengujian kesebelas dilakukan dengan mengukur arus detektor terhadap perubahan daya reaktor, selanjutnya dilakukan iradiasi selama 4 jam terus menerus pada daya reaktor 100 kW.

HASIL DAN PEMBAHASAN

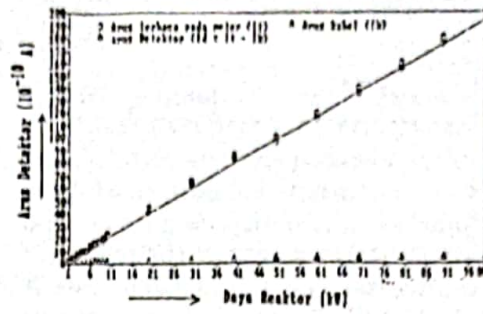
Hasil pengukuran tahanan dengan menggunakan multimeter antara elektrode dalam BNC dengan emiter perak, antara elektrode luar BNC dengan kolektor *stainless steel*, untuk 10 buah detektor yang dibuat besarnya hampir mendekati nol ohm. Hal ini menunjukkan bahwa kontak ohmig detektor cukup baik. Sedang hasil pengukuran tahanan isolator dengan menggunakan meter Keithley untuk 10 buah detektor yang dibuat besarnya $(5 \pm 0,6)10^9$ ohm.

Hasil dari pengujian tanggap detektor swadaya yang dibuat terhadap perubahan daya reaktor Kartini di posisi Lazy Susan pada waktu *start up* maupun *shut down*, menunjukkan bahwa tanggap dari detektor dapat mengikuti tanggap detektor FC ataupun CIC yang disambung dengan meter daya linier maupun daya log. Sedang hasil pengukuran harga arus sebagai fungsi daya reaktor untuk lima buah detektor yang dipasang pada posisi di Lazy Susan (Gambar 4 dan 5) adalah linier.

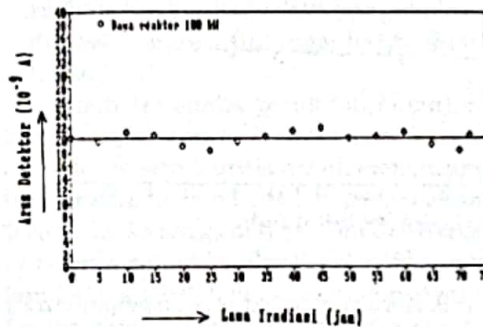
Dari hasil pengujian P₁ sampai dengan P₁₁ untuk lima buah detektor yang diuji karakternya, diambil harga rata-rata arus detektor yang dihasilkan. Untuk harga daya reaktor 100 kW dan waktu pengukuran yang sama, maka didapatkan karakter sebagai berikut : (Gambar 6 sampai dengan Gambar 16).



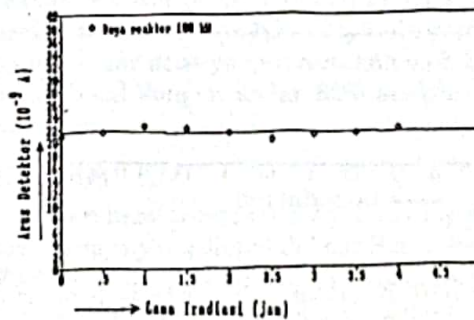
Gambar 4. Karakter detektor untuk variasi harga daya reaktor dari 3 W sampai 1 kW (harga daya sebanding dengan harga fluks neutron)



Gambar 5. Karakter detektor untuk variasi harga daya reaktor dari 1 kW sampai 100 kW (harga daya sebanding dengan harga fluks neutron)

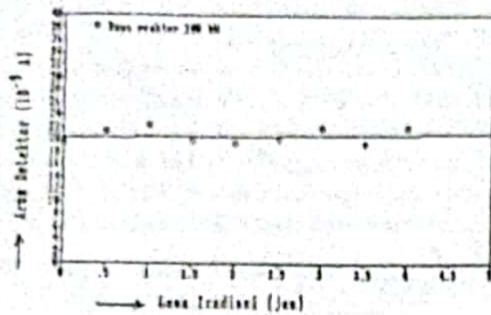


Gambar 6. Karakter detektor pada pengujian P₁

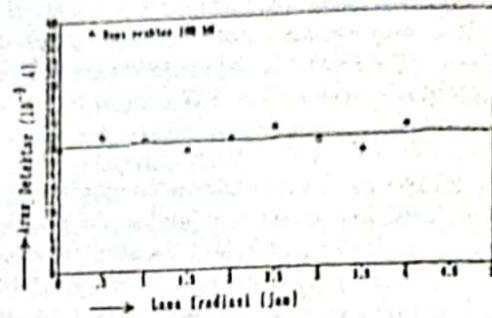


Gambar 7. Karakter detektor pada pengujian P₂

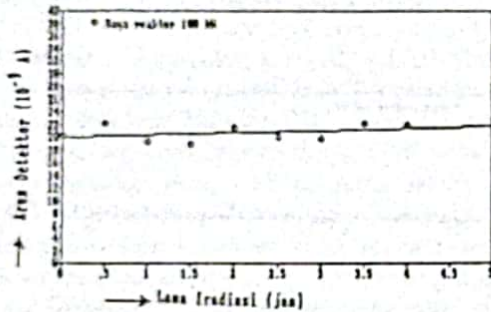
Karena penelitian ini dimaksudkan untuk meneliti karakter perak lokal dan kemungkinannya untuk bisa digunakan sebagai bahan emiter detektor swadaya, maka bahan pendukung lainnya diambil bahan-bahan yang mudah didapat dan mudah dibuat. Detektor komersial



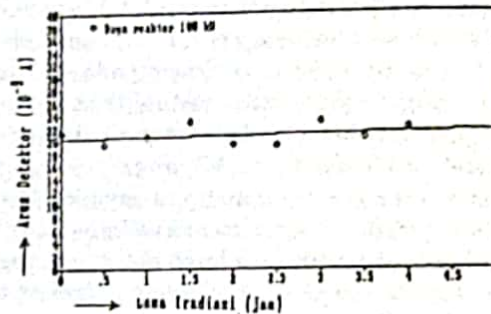
Gambar 8. Karakter detektor pada pengujian P₃



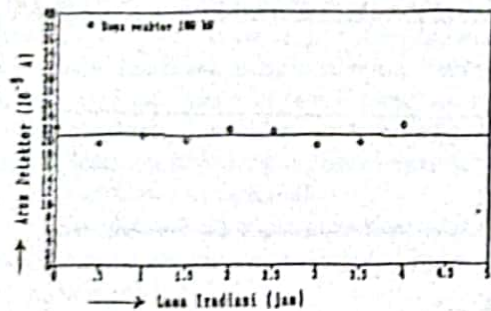
Gambar 11. Karakter detektor pada pengujian P₆



Gambar 9. Karakter detektor pada pengujian P₄



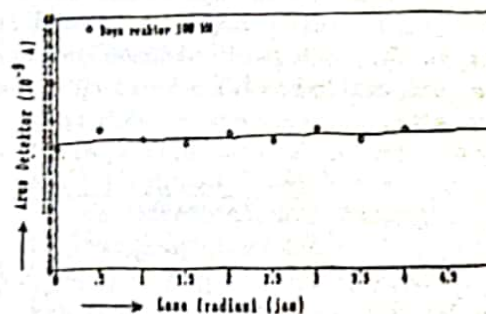
Gambar 12. Karakter detektor pada pengujian P₇



Gambar 10. Karakter detektor pada pengujian P₅

biasanya menggunakan Inconel 600 sebagai bahan kolektor sedangkan MgO_2 , Al_2O_3 digunakan sebagai bahan isolator. Sehingga untuk pengujian operasi detektor pada suhu yang tinggi, perlu diganti bahan isolator teflon dengan yang lain.

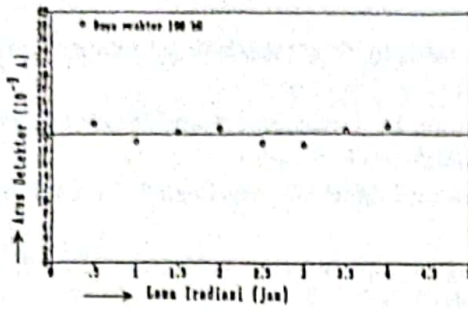
Dari data hasil pengujian pada daya 100 kW tersebut di atas, besarnya fluktuasi harga arus yang dihasilkan detektor dari harga rata-



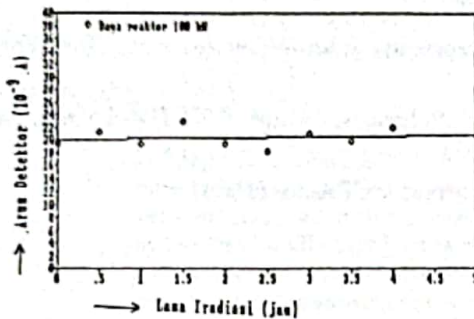
Gambar 13. Karakter detektor pada pengujian P₈

ratanya (harga arus rata-rata yang dihasilkan $1,98 \cdot 10^{-8} A$) adalah sekitar 20%. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi fluktuasi harga arus detektor ini, yaitu:

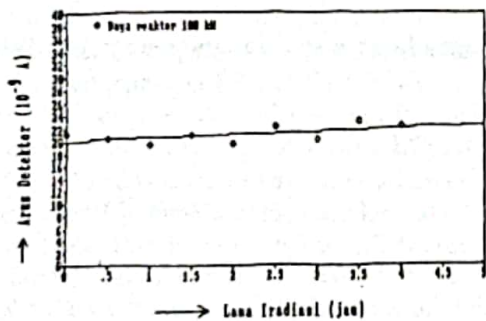
1. Perubahan dari arus serentak detektor karena berkurangnya konsentrasi atom-atom pemancar γ serentak ^{107}Ag dan ^{109}Ag yang sudah menangkap neutron berubah menjadi ^{108}Ag dan ^{110}Ag . Besar perubahan konsen-



Gambar 14. Karakter detektor pada pengujian P₉



Gambar 15. Karakter detektor pada pengujian P₁₀



Gambar 16. Karakter detektor pada pengujian P₁₁ trasinya terhadap konsentrasi mula-mula (C₀) menurut Jaschik [4]:

$$(C_{7,9}) = C_0 \exp(-\sigma \phi t) \text{ atom/cc} \quad (4)$$

- Perubahan dari sumbangan arus kasip akibat peluruhan β ^{108}Ag dan ^{110}Ag . Besarnya perubahan terhadap waktu menurut Seifritz (5):

$$\frac{dC_{8,10}(t)}{dt} = C_{7,9}(t) \phi - \lambda_{8,10} C_{8,10}(t) - C_{8,10}(t) \sigma_{8,10} \phi \quad (5)$$

$C_{8,10}(t)$ = konsentrasi atom ^{108}Ag atau ^{110}Ag pada saat t (atom/cc); $C_{7,9}(t)$: konsentrasi atom ^{107}Ag atau ^{109}Ag pada saat t (atom/cc); ϕ = fluks neutron (nv) = (n/cm²det); σ = tampang lintang serapan (cm²); λ = konstanta peluruhan (detik⁻¹).

- Kesulitan dalam membuat harga fluks neutron tetap, pada daya yang tetap. Hasil pengukuran fluks neutron di reaktor Kartini dengan menggunakan detektor swadaya dengan emiter cobalt buatan Fa. Thermocoax, memberikan fluktuasi 15%. Padahal menurut buku manualnya [9] laju perubahan arus 2% per tahun. Sehingga kemungkinan besar fluktuasi harga arus detektor yang diteliti di reaktor Kartini pada daya yang sama adalah disebabkan oleh fluktuasi harga fluks neutronnya.

Diameter emiter perak (=0,77 cm) disesuaikan dengan besar diameter kolektor yang sudah ada. Secara teoritis untuk mengurangi faktor serapan diri partikel β pada bahan emiternya, maka harga diameter emiter harus dibuat sekecil mungkin. Emil'yanov [6] menunjukkan bahwa SPNDnya yang mempunyai bahan emiter terbuat dari perak yang diperkaya ^{109}Ag sampai 85 %, dan berdiameter 0,21 cm pada fluks neutron 2.10^{11} nv dihasilkan besar arus detektor $1,9.10^{-9}$ A. SPND dengan emiter perak lokal berdiameter 0,77 cm, pada daya 100 kW di reaktor Kartini di Lazy Susan mampu menghasilkan arus sebesar $1,98.10^{-8}$ A. Disimpulkan bahwa besar arus yang dihasilkan oleh SPND perak lokal dengan kadar 82% adalah cukup memadai.

KESIMPULAN:

Dari hasil pengujian awal terhadap detektor swadaya yang dibuat di Lazy Susan Reaktor Kartini menunjukkan bahwa respon terhadap perubahan daya adalah sebanding dengan respon kanal daya log maupun linier yang disambung dengan detektor FC maupun CIC. Pada daerah pengukuran tersebut karakter arus detektor swadaya yang dibuat adalah berbanding linier dengan naiknya daya reaktor. Untuk itu disimpulkan bahwa perak lokal dapat dibuat sebagai bahan emiter detektor swadaya, meskipun untuk selanjutnya masih perlu diuji untuk tingkat daya yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Bock, H., Miniature detectors for reactor incore neutron flux monitorin, *Atomic Energy Review* 141 (1976).
2. Gebureck, P., Hofman, W., Seifritz, W., dan Stegemann, D, Development and incore application of self powered neutron detectors, IAEA SM-168/G-8.
3. Sovka, J.A., Response of Cobalt Neutron Flux Detectors, Mathematics Branch Chalk River Nuclear Laboratories, AECL-3368 (June 1969).
4. Jaschik, W., and Seifritz, W., Model for calculating prompt response self-powered neutron detectors, *Nuclear Science and Engineering* 53, (1974) 61-78.
5. Seifritz, W., Measurement of the ratio of the prompt to the delayed neutronic response of a self-powered neutron detector by cross-correlation techniques, *Nuclear Science Engineering* 49, (1972) 358-369.
6. Emelyanov Ya., Volod'ko Yu. I., Egorov, O. K., Konstantinov, L. V., and Postnikov V. V., Some Characteristics of electron-emission neutron detectors with ^{107}Ag , ^{109}Ag , Rh and Gd emitters, *Atomnaya Energiya*, vol 34 No. 3 (March 1973).
7. Glenn, F., Knoll Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, New York (1981).
8. Dressler, Frystatter, Bertz Metallografie, Fullgrad, Schweissqualitet, SPN Detektoren. Arbeits Bericht Siemens Karlstein UB KWU (10.11.1988).
9. Manual buch Self Power Neutron Detector 5503, Thermocoax France (1986).

DISKUSI:

ASZ. Abidin:

1. Apakah detektor ini diisi gas?
2. Tegangan kerja detektor?

Agus Baskoro:

1. Detektor SPND tidak memerlukan gas isian. Arus detektor dihasilkan oleh penangkapan elektron (β) yang diemisikan oleh emiter karena berinteraksi dengan neutron secara serempak dan kasip.
2. Detektor swadaya tidak memerlukan catu daya sehingga tidak memerlukan tegangan kerja.