

ANALISIS KESELAMATAN RADIASI KOLIMATOR BAHAN NIKEL PADA BEAMPORT TEMBUS RADIAL REAKTOR KARTINI

Faizal Akbar¹, Toto Trikasjono², Widarto³

1) STTN-BATAN, Yogyakarta, Indonesia, feibar28@gmail.com

2) STTN-BATAN, Yogyakarta, Indonesia, tototrik@batan.go.id

3) PSTA-BATAN, Yogyakarta, Indonesia, widarto_widarto@yahoo.com

ABSTRAK

ANALISIS KESELAMATAN RADIASI KOLIMATOR BAHAN NIKEL PADA BEAMPORT TEMBUS RADIAL REAKTOR KARTINI. Metode aktivasi foil yang digunakan pada pengukuran fluks neutron dilakukan dengan meletakkan materi tertentu di dalam medan neutron sehingga akan terjadi reaksi antara inti atom dengan neutron. Reaksi tersebut akan menyebabkan materi menjadi radioaktif sehingga memancarkan radiasi. Analisis keselamatan radiasi berupa penentuan laju dosis gamma yang dihasilkan kolimator jika dimasukkan ke dalam beamport tembus radial reaktor Kartini selama enam jam. Hasil analisis menunjukkan laju dosis gamma yang dihasilkan kolimator pada jarak 50 cm dari ujung kolimator sebesar $1,5328E-03$ mR/jam. Laju dosis tersebut masih dibawah nilai batas dosis yang ditetapkan oleh BAPETEN sebesar 1 mR/jam.

Kata kunci: Kolimator, iradiasi, laju dosis

ABSTRACT

ANALYSIS OF RADIATION SAFETY ON NICKEL MATERIALS COLLIMATOR AT RADIAL PIERCING BEAMPORT KARTINI REACTOR. The foil activation method used in neutron flux measurements is carried out by placing certain materials in neutron field so that there will be a reaction between atomic nuclei with neutrons. The reaction will cause the materials become radioactive to emit radiation. Analysis of radiation safety to the determination of the gamma dose rate which was generated by collimator when inserted into radial piercing beamport Kartini reactor for six hours. Results of the analysis showed gamma dose rate which was generated by collimator at a distance of 50 cm from the end of the collimator is $1,5328E-03$ mR/hours. The dose rate are still below the dose limit value which was determined by BAPETEN is 1 mR/hour.

Keywords: Collimator, irradiation, dose rate

PENDAHULUAN

Penggunaan teknologi nuklir semakin meningkat di berbagai bidang seperti bidang industri, kedokteran, pertanian, dan penelitian. Selain keuntungan yang diperoleh, teknologi nuklir menimbulkan radiasi yang mengandung potensi bahaya bagi manusia dan lingkungan, maka perlu dilakukan usaha yang berhubungan dengan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) bagi pekerja radiasi, masyarakat, dan lingkungannya. Ada dua macam pemantauan untuk dapat memberikan perlindungan kepada manusia dari paparan radiasi yaitu pemantauan

paparan radiasi terhadap tempat kerja dan pemantauan paparan radiasi terhadap personil yang bekerja. [1]

Dalam pemanfaatan teknologi nuklir mensyaratkan agar penerimaan dosis radiasi seseorang tidak boleh melampaui nilai batas dosis yang ditetapkan oleh BAPETEN (Badan Pengawas Tenaga Nuklir). Nilai Batas Dosis (NBD) pekerja radiasi yang berlaku saat ini yaitu dosis efektif rata-rata sebesar 20 mSv per tahun dalam periode lima tahun, sehingga dosis yang terakumulasi dalam 5 tahun tidak boleh melebihi 100 mSv, sedangkan NBD anggota

masyarakat yang berlaku saat ini yaitu dosis efektif sebesar 1 mSv per tahun. [2]

Reaktor Kartini didesain untuk daya maksimum 250 kW namun hanya dioperasikan pada daya nominal 100 kW termal. Reaktor Kartini mempunyai beberapa fasilitas iradiasi. Salah satu contoh fasilitas iradiasi reaktor Kartini yang berada di daerah reflektor yaitu *beamport* tembus, *beamport* tangensial, *beamport* radial, kolom termal, dan kolom termalisasi. [3]

Produk kolimator yang telah dibuat oleh Mujiyono akan dimasukkan ke dalam *beamport* tembus radial reaktor Kartini. Ketika kolimator tersebut dimasukkan ke dalam *beamport* tembus radial reaktor Kartini, maka akan terjadi interaksi antara neutron dengan kolimator di sepanjang *beamport* tembus radial reaktor Kartini. Interaksi tersebut menyebabkan kolimator menjadi radioaktif sehingga memancarkan radiasi.

DASAR TEORI

Efek Radiasi Terhadap Manusia

Efek biologi utama dari radiasi adalah merusak sel dan jaringan tubuh manusia. Jenis efek biologi radiasi dapat digolongkan menjadi dua jenis, yaitu: [4]

1. *Stokastik* adalah efek radiasi yang keparahannya tidak bergantung pada besarnya dosis dan probabilitas terjadinya tanpa dosis ambang tertentu.
2. *Deterministik* adalah efek radiasi yang keparahannya bergantung pada besar dosis.

Massa Kolimator

Untuk mengetahui massa kolimator, cuplikan kolimator di iradiasi terlebih dahulu untuk mengetahui unsur-unsur yang ada di dalamnya. Dengan menentukan massa setiap unsur cuplikan, massa total cuplikan dan massa total kolimator akan diperoleh massa setiap unsur kolimator. Massa setiap unsur kolimator dapat ditentukan menggunakan persamaan (1). [5]

$$\frac{m_{uc}}{m_{tc}} = \frac{m_{up}}{m_{tp}} \quad (1)$$

dengan:

m_{uc} = massa unsur cuplikan (gram)
 m_{tc} = massa total cuplikan (gram)

m_{up} = massa unsur kolimator (gram)

m_{tp} = massa total kolimator (gram)

Metode Aktivasi

Pengertian aktivasi adalah meletakkan materi tertentu di dalam medan neutron sehingga akan terjadi reaksi antara inti atom dengan neutron. Dari reaksi tersebut akan terjadi inti dalam keadaan tereksitasi yang bersifat radioaktif dan memancarkan zarah α , β , γ atau α dan γ , β , dan γ secara serentak. [6]

Aktivitas suatu unsur yang telah di aktivasi dapat ditentukan menggunakan persamaan (2). [6]

$$A = \sum_{act} \phi V (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (2)$$

dengan:

A = Aktivitas (Bq)

\sum_{act} = Tampang lintang makroskopis (cm^{-1})

ϕ = Fluks neutron ($\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

V = Volume materi teraktivasi (cm^3)

λ = Konstanta peluruhan (detik)

t_i = Waktu iradiasi (detik)

Setelah proses iradiasi dihentikan maka aktivitas suatu unsur akan meluruh. Besarnya aktivitas suatu unsur setelah proses iradiasi dihentikan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3). [7]

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t_d} \quad (3)$$

dengan:

A_t = Aktivitas setelah meluruh (Bq)

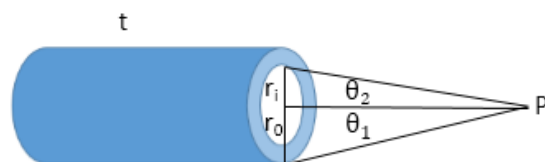
A_0 = Aktivitas mula-mula (Bq)

λ = Konstanta peluruhan (detik)

t_d = Waktu tunda (detik)

Laju Dosis

Gambar 1 menunjukkan sumber radiasi gamma berbentuk silinder berongga.



Gambar 1. Sumber Gamma Berbentuk Silinder Berongga

Untuk menentukan laju dosis pada titik P dapat menggunakan persamaan (4). [8]

dengan:

$$D = \Gamma C_V 2\pi \{ -\ln(\cos\theta_1) \} - \{ -\ln(\cos\theta_2) \} \quad (4)$$

r = Faktor gamma ($\text{R.m}^2/\text{Ci.jam}$)

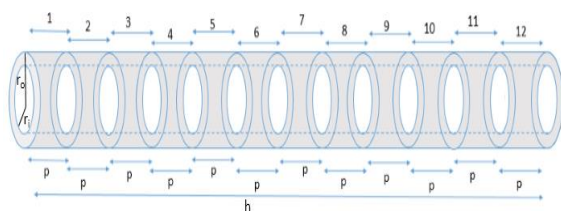
- C_v = Aktivitas (Ci/m^3)
- t = Panjang silinder (m)
- r_i = Jari-jari dalam silinder (m)
- r_o = Jari-jari luar silinder (m)

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

1. Kolimator

Gambar 2 menunjukkan dimensi produk kolimator yang telah dibuat oleh [9].



Gambar 2. Dimensi Koliamtor Bahan Nikel

Kolimator bahan nikel mempunyai spesifikasi sebagai berikut: [9]

1. Panjang total (h) = 156 cm
2. Diameter dalam (r_i) = 16 cm
3. Diameter luar (r_o) = 19 cm
4. Tebal = 3 cm
5. Panjang segmen (p) = 13 cm
6. Jumlah segmen (n) = 12
7. Massa tiap segmen = 8 kg
8. Massa total = 96 kg

2. Konsentrasi Kolimator

Data konsentrasi kolimator bahan nikel kemurnian 95% di dapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh Khoirunisa, (2015) dengan judul “Analisis Jenis Dan Kadar Unsur Pada Bahan Kolimator Neutron Sebelum Dan Sesudah Manufaktur Menggunakan Metode Analisis Aktivasi Neutron (AAN)”. [10]

3. Fluks Neutron

Data fluks neutron sepanjang *beamport* tembus radial saat reaktor Kartini beroperasi 100 kW di dapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh Widarto dkk, (2014) dengan judul “Status Saat Ini Pengembangan Teknologi Dan Aplikasi *Boron Neutron*

Capture Cancer Therapy Dengan Compact Neutron Generator”. [11]

Teknik Analisis Data

Penentuan massa setiap unsur penyusun kolimator menggunakan persamaan (1).

Penentuan aktivitas setiap unsur penyusun kolimator ditentukan ketika proses iradiasi menggunakan persamaan (2).

Aktivitas setiap unsur penyusun kolimator setelah proses iradiasi dihentikan digunakan persamaan (3).

Laju dosis yang dihasilkan kolimator ditentukan dengan persamaan (4).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Unsur Penyusun Kolimator

Penelitian yang dilakukan oleh Khoirunisa, (2015) dengan judul “Analisis Kandungan Unsur Pada Bahan Kolimator Neutron Sebelum Dan Setelah Manufaktur Menggunakan AAN” diperoleh konsentrasi unsur penyusun kolimator sebelum dan sesudah manufaktur. Pada Tabel 1 menunjukkan konsentrasi unsur penyusun kolimator setelah manufaktur.

Tabel 1. Konsentrasi Unsur Penyusun Kolimator

Unsur	Konsentrasi (mg/g)
Ni-65	6,6506E-02
Mn-56	3,8558E-03
Cr-51	5,3670E-04
Hg-197m	1,5047E-04
W-187	1,6252E-05
Co-60	4,4206E-05
Cu-64	1,7392E-05

Tabel 2. Massa Unsur Kolimator di Setiap Segmen

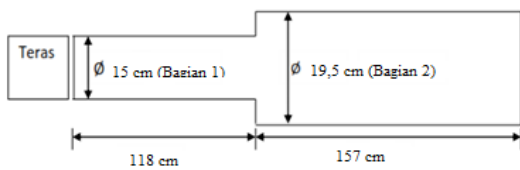
Unsur	Massa (gram)
Ni-65	5,3205E-01
Mn-56	3,0846E-02
Cr-51	4,2936E-03
Hg-197m	1,2037E-03
W-187	1,3002E-04
Co-60	3,5365E-04
Cu-64	1,3913E-04

Karena kolimator homogen, maka massa setiap unsur kolimator disetiap segmen sama. Jika data dalam Tabel 1 diolah menggunakan Persamaan (1), maka akan diperoleh massa setiap unsur penyusun kolimator di setiap segmen. Pada Tabel 2 menunjukkan massa

setiap unsur penyusun kolimator di setiap segmen.

Fluks Neutron

Penelitian yang dilakukan oleh Widartro dkk, (2014) dengan judul “Status Saat Ini Pengembangan Teknologi Dan Aplikasi *Boron Neutron Capture Cancer Therapy Dengan Compact Neutron Generator*” diperoleh besarnya fluks neutron termal dan cepat sepanjang *beamport* tembus radial saat Reaktor Kartini dioperasikan pada daya 100 kW [11]. Tabel 3 menunjukkan besarnya fluks neutron yang diperoleh dalam penelitian ini, sedangkan Gambar 3 menunjukkan dimensi kolimator.



Gambar 3. Dimensi Beamport Tembus Radial [12]

Tabel 3. Fluks Neutron Pada Beamport Tembus radial Reaktor Kartini.

Jarak dari Teras (cm)	Fluks Neutron ($n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	
	Termal	Cepat
0	1,3264E+09	1,3130E+09
25	4,1366E+08	3,3393E+08
50	4,0303E+08	3,9220E+08
75	1,0511E+08	8,3272E+07
100	2,0128E+07	1,4682E+07
120	8,3678E+06	3,3553E+06
140	8,3082E+06	1,5311E+06
160	3,0194E+06	3,1597E+06
180	5,9255E+06	4,5900E+05
200	5,2844E+06	4,7344E+05
220	3,6433E+06	1,2849E+06
240	4,4010E+06	5,2958E+05
260	3,0691E+06	9,8243E+05

Berdasarkan data pada Tabel 3. dapat dibuat hubungan antara panjang beamport dengan fluks neutron. Gambar 4 menunjukkan hubungan antara panjang beamport dengan fluks neutron termal, sedangkan Gambar 5 menunjukkan hubungan anatar panjang beamport dengan fluks neutron cepat.

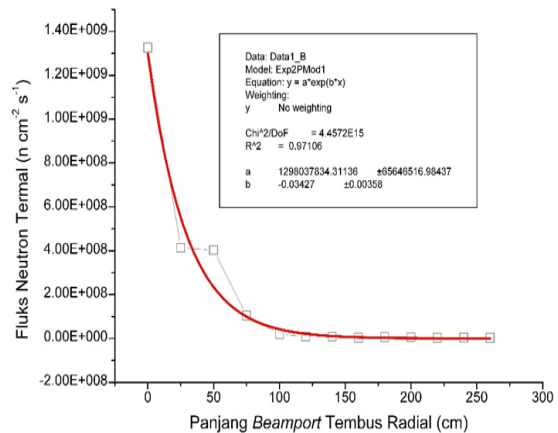
Dari Gambar 4 diperoleh distribusi persamaan (5) distribusi fluks neutron termal dengan y menyatakan fluks neutron termal dan x menyatakan panjang beamport.

$$y = 1,298.10^9 e^{-0,0342x} \quad (5)$$

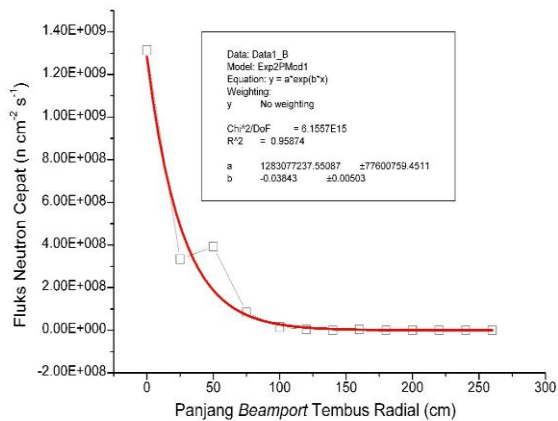
Dari Gambar 5 diperoleh persamaan (6) distribusi fluks neuron cepat dengan y

menyatakan fluks neutron cepat dan x menyatakan panjang beamport.

$$y = 1,283.10^9 e^{-0,0384x} \quad (6)$$



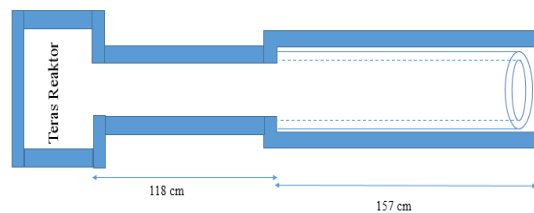
Gambar 4. Grafik Panjang Beamport Vs Fluks Neutron Termal



Gambar 5. Grafik Panjang Beamport Vs Fluks Neutron Cepat

Pemetaan Fluks Neutron Termal

Kolimator akan ditempatkan pada beamport tembus radial pada jarak 118 cm dari teras reaktor. Gambar 6 menunjukan penempatan kolimator di dalam beamport tembus radial Reaktor Kartini.



Gambar 6. Penempatan Kolimator di Beamport Tembus Radial

Fluks neutron yang berinteraksi dengan kolimator adalah fluks neutron termal [13]. Besarnya fluks neutron termal yang berinteraksi di setiap segmen kolimator berbeda-beda. Besarnya fluks neutron termal yang berinteraksi di setiap segmen kolimator dapat ditentukan menggunakan persamaan (5). Tabel 4 menunjukkan besarnya fluks neutron termal yang berinteraksi di setiap segmen kolimator.

Tabel 4. Fluks Neutron Termal di Setiap Segmen kolimator

Segmen	Panjang (cm)		Fluks neutron termal (ncm ⁻² s ⁻¹)
	x ₁ (cm)	x ₂ (cm)	
1	118	131	2,2942E+07
2	131	144	1,4708E+07
3	144	157	9,4289E+06
4	157	170	6,0447E+06
5	170	183	3,8751E+06
6	183	196	2,4843E+06
7	196	209	1,5926E+06
8	209	222	1,0210E+06
9	222	235	6,5454E+05
10	235	248	4,1961E+05
11	248	261	2,6901E+05
12	261	274	1,7245E+05

Laju Dosis Kolimator Saat Iradiasi

Aktivitas setiap unsur penyusun kolimator adalah akumulasi aktivitas dari setiap segmen kolimator. Pada Tabel 5 menunjukkan besarnya aktivitas setiap unsur penyusun kolimator saat diiradiasi.

Tabel 5. Aktivitas Unsur Penyusun Kolimator Saat Iradiasi

Unsur	Aktivitas (Ci)		
	ti = 2 jam	ti = 4 jam	ti = 6 jam
Ni-65	5,4251E-06	8,5547E-06	1,0360E-05
Mn-56	4,4649E-07	7,0749E-07	8,6006E-07
Cr-51	2,1143E-08	4,2242E-08	6,3297E-08
Hg-197m	4,3165E-08	8,3888E-08	1,2231E-07
W-187	1,5413E-09	2,9957E-09	4,3682E-09
Co-60	6,9119E-12	1,3824E-11	2,0735E-11
Cu-64	1,0606E-09	2,0119E-09	2,8651E-09

Hasil yang ditampilkan pada Tabel 5 menunjukkan semakin lama waktu iradiasi maka semakin besar aktivitas setiap unsur penyusun kolimator. Hal ini dikarenakan semakin banyak fluks neutron termal yang diserap.

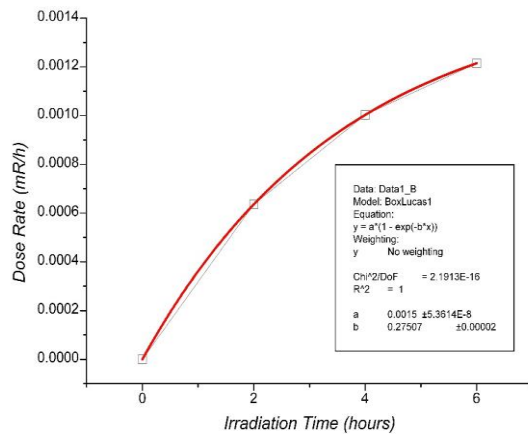
Ketika kolimator di iradiasi, maka setiap unsur penyusun kolimator akan teraktivasi sehingga akan menjadi radioaktif dan memancarkan radiasi. Tabel 6 menunjukan besarnya laju dosis yang dihasilkan kolimator

pada jarak 50 cm dari ujung kolimator. Laju dosis yang dihasilkan kolimator merupakan akumulasi laju dosis setiap unsur penyusun kolimator di setiap segmen.

Tabel 6. Laju Dosis Kolimator Saat Iradiasi

Unsur	Laju dosis (mR/jam)		
	ti = 2 jam	ti = 4 jam	ti = 6 jam
Ni-65	6,3609E-04	1,0030E-03	1,2147E-03
Mn-56	1,6256E-04	2,5759E-04	3,1314E-04
Cr-51	1,9492E-07	3,8943E-07	5,8353E-07
Hg-197m	1,2964E-06	2,5195E-06	3,6734E-06
W-187	1,9978E-07	3,8831E-07	5,6621E-07
Co-60	3,7335E-09	7,4669E-09	1,1200E-08
Cu-64	5,5171E-08	1,0465E-07	1,4903E-07
Jumlah	8,0040E-04	1,2640E-03	1,5328E-03

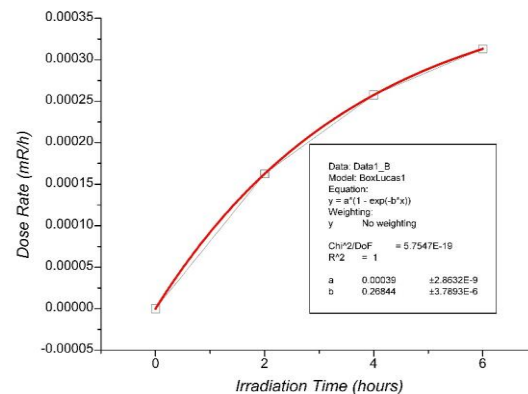
Hasil yang ditampilkan pada Tabel 6 menunjukkan bahwa semakin lama waktu iradiasi maka laju dosis yang dihasilkan kolimator semakin besar.



Gambar 7. Grafik Waktu Iradiasi Vs Laju Dosis Ni-65

Dari Gambar 7 diperoleh persamaan (7) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu iradiasi.

$$y = 1,5 \cdot 10^{-3} (1 - e^{-0,275x}) \quad (7)$$

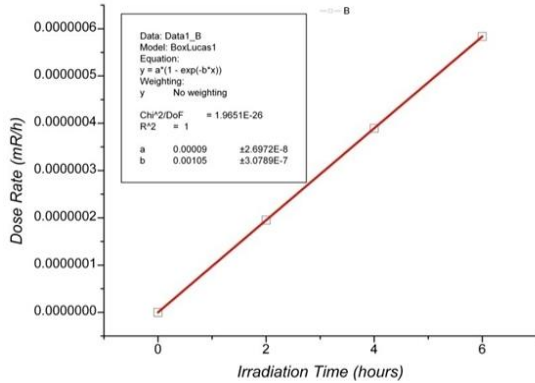


Gambar 8. Grafik Waktu Iradiasi Vs Laju Dosis Mn-56

Data pada Tabel 6 dapat dibuat hubungan antara waktu iradiasi dengan laju dosis. Gambar 7 sampai dengan Gambar 13 menunjukkan hubungan lama waktu iradiasi dengan laju dosis setiap unsur penyusun kolimator.

Dari Gambar 8 diperoleh persamaan (8) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu iradiasi.

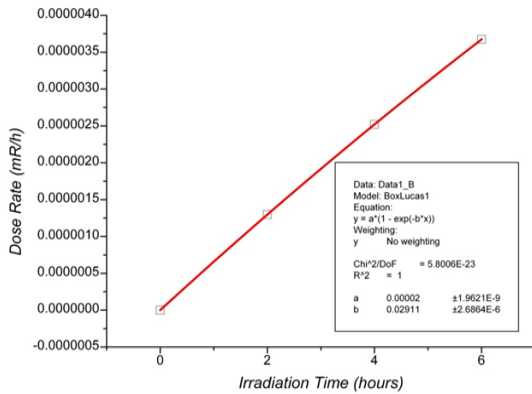
$$y = 3,9 \cdot 10^{-4} (1 - e^{-0,268x}) \quad (8)$$



Gambar 9. Grafik Waktu Iradiasi Vs Laju Dosis Cr-51

Dari Gambar 9 diperoleh persamaan (9) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu iradiasi.

$$y = 9 \cdot 10^{-5} (1 - e^{-1,05 \cdot 10^{-3}x}) \quad (9)$$



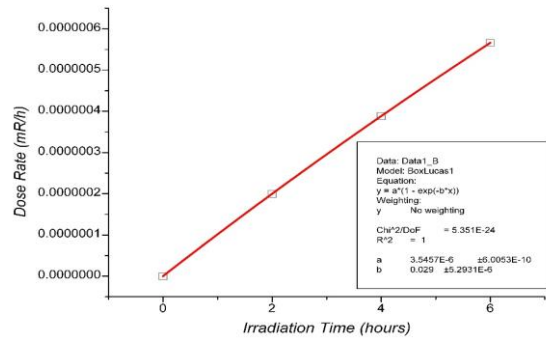
Gambar 10. Grafik Waktu Iradiasi Vs Laju Dosis Hg-197m

Dari Gambar 10 diperoleh persamaan (10) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu iradiasi.

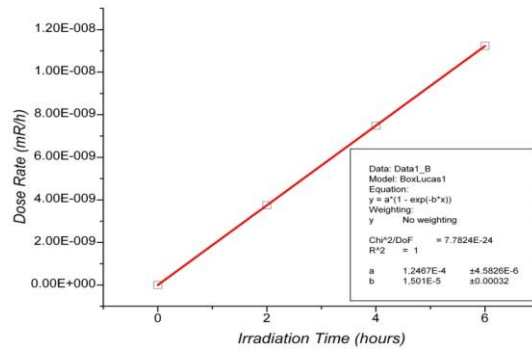
$$y = 2 \cdot 10^{-5} (1 - e^{-0,029x}) \quad (10)$$

Dari Gambar 11 diperoleh persamaan (11) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu iradiasi.

$$y = 3,5457 \cdot 10^{-6} (1 - e^{-0,029x}) \quad (11)$$



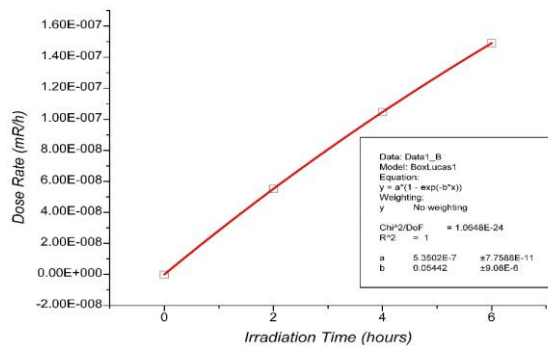
Gambar 11. Grafik Waktu Iradiasi Vs Laju Dosis W-187



Gambar 12. Grafik Waktu Iradiasi Vs Laju Dosis Co-60

Dari Gambar 12 diperoleh persamaan (12) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu iradiasi.

$$y = 1,2467 \cdot 10^{-4} (1 - e^{-1,501 \cdot 10^{-5}x}) \quad (12)$$



Gambar 13. Grafik Waktu Iradiasi Vs Laju Dosis Cu-64

Dari Gambar 13 diperoleh persamaan (13) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu iradiasi.

$$y = 5,3502 \cdot 10^{-7} (1 - e^{-0,054x}) \quad (13)$$

Laju Dosis Kolimator Pasca Iradiasi 6 Jam

Setelah proses iradiasi selama 6 jam dihentikan maka aktivitas setiap unsur penyusun kolimator meluruh. Aktivitas setiap unsur penyusun kolimator adalah akumulasi aktivitas dari setiap segmen kolimator. Pada Tabel 7 menunjukkan besarnya aktivitas setiap unsur penyusun kolimator pasca iradiasi 6 jam, sedangkan pada Tabel 8 menunjukkan laju dosis yang dihasilkan oleh kolimator pada jarak 50 cm dari ujung kolimator pasca iradiasi 6 jam. Laju dosis yang dihasilkan kolimator merupakan akumulasi laju dosis setiap unsur penyusun kolimator di setiap segmen.

Tabel 7. Aktivitas Unsur Penyusun Kolimator Pasca Iradiasi 6 jam

Unsur	Aktivitas (Ci)		
	td = 3 jam	td = 6 jam	td = 9 jam
Ni-65	4,5394E-06	1,9890E-06	8,7148E-07
Mn-56	3,8438E-07	1,7179E-07	7,6778E-08
Cr-51	6,3099E-08	6,2902E-08	6,2706E-08
Hg-197m	1,1207E-07	1,0270E-07	9,4105E-08
W-187	4,0042E-09	3,6706E-09	3,3647E-09
Co-60	2,0734E-11	2,0733E-11	2,0732E-11
Cu-64	2,4336E-09	2,0671E-09	1,7558E-09

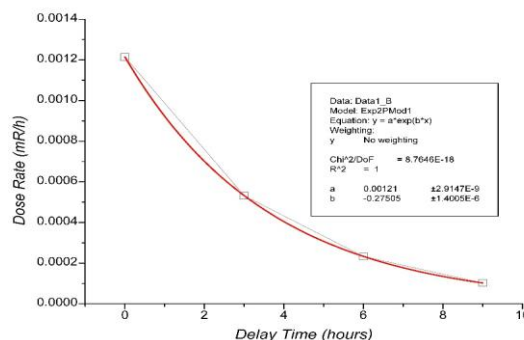
Hasil yang ditampilkan pada Tabel 7 menunjukkan bahwa semakin lama waktu tunda maka aktivitas setiap unsur penyusun kolimator akan semakin kecil.

Tabel 8. Laju Dosis Kolimator Pasca Iradiasi 6 jam

Unsur	Laju dosis (mR/jam)		
	td = 3 jam	td = 6 jam	td = 9 jam
Ni-65	5,3224E-04	2,3321E-04	1,0218E-04
Mn-56	1,3995E-04	6,2547E-05	2,7954E-05
Cr-51	5,8171E-07	5,7989E-07	5,7808E-07
Hg-197m	3,3661E-06	3,0845E-06	2,8264E-06
W-187	5,1903E-07	4,7578E-07	4,3613E-07
Co-60	1,1200E-08	1,1199E-08	1,1199E-08
Cu-64	1,2659E-07	1,0753E-07	9,1333E-08
Jumlah	6,7680E-04	3,0001E-04	1,3408E-04

Hasil yang ditampilkan pada Tabel 8 menunjukkan bahwa semakin lama waktu tunda maka laju dosis yang dihasilkan oleh kolimator semakin kecil.

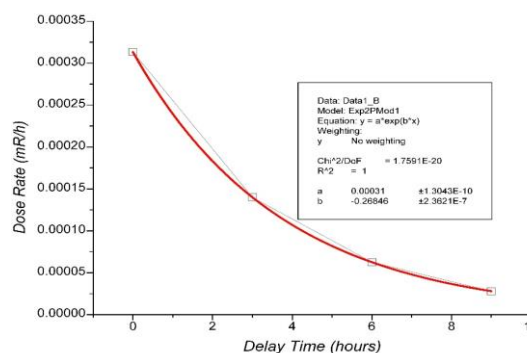
Data yang ditampilkan pada Tabel 8 dapat dibuat hubungan antara waktu tunda vs laju dosis setiap unsur penyusun kolimator. Gambar 14 sampai dengan Gambar 20 menunjukkan hubungan antara waktu tunda dengan laju dosis setiap unsur penyusun kolimator.



Gambar 14. Grafik Waktu Tunda Vs Laju Dosis Ni-65

Dari Gambar 14 diperoleh persamaan (14) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu tunda.

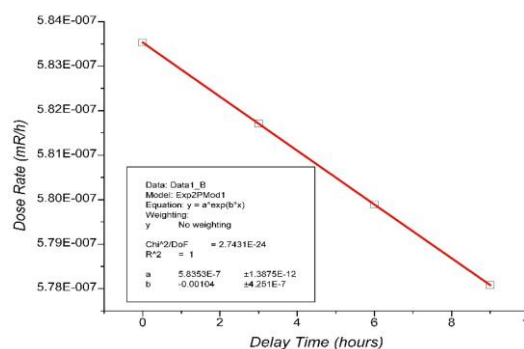
$$y = 1,21 \cdot 10^{-3} e^{-0,275x} \quad (14)$$



Gambar 15. Grafik Waktu Tunda Vs Laju Dosis Mn-56

Dari Gambar 15 diperoleh persamaan (15) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu tunda.

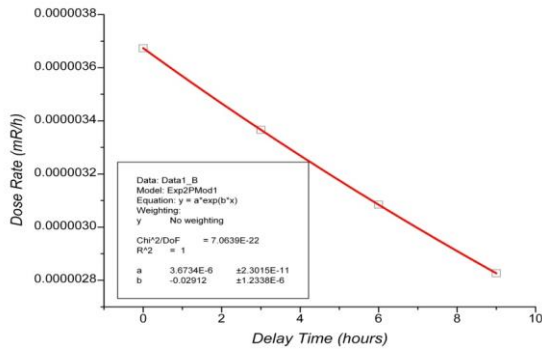
$$y = 3,1 \cdot 10^{-4} e^{-0,268x} \quad (15)$$



Gambar 16. Grafik Waktu Tunda Vs Laju Dosis Cr-51

Dari Gambar 16 diperoleh persamaan (16) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu tunda.

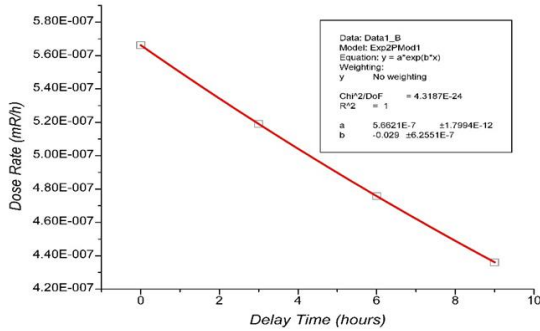
$$y = 5,8353.10^{-7} e^{-1,04.10^{-3}x} \quad (16)$$



Gambar 17. Grafik Waktu Tunda Vs Laju Dosis Hg-197m

Dari Gambar 17 diperoleh persamaan (17) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu tunda.

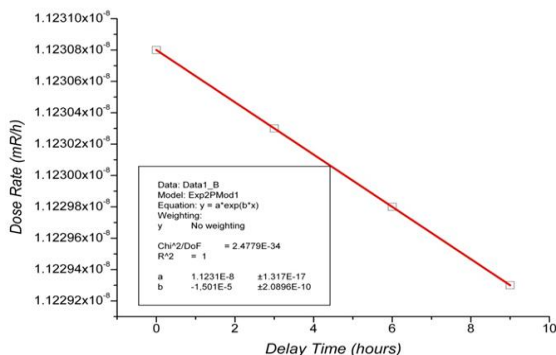
$$y = 3,6734.10^{-6} e^{-0,029x} \quad (17)$$



Gambar 18. Grafik Waktu Tunda Vs Laju Dosis W-187

Dari Gambar 18 diperoleh persamaan (18) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu tunda.

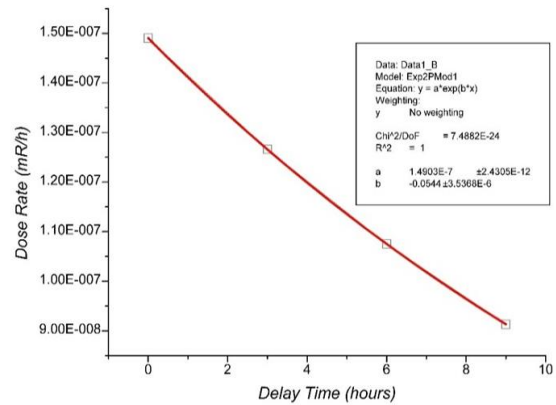
$$y = 5,6621.10^{-7} e^{-0,029x} \quad (18)$$



Gambar 19. Grafik Waktu Tunda Vs Laju Dosis Co-60

Dari Gambar 19 diperoleh persamaan (19) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu tunda.

$$y = 1,1231.10^{-8} e^{-1,501.10^{-5}x} \quad (19)$$



Gambar 20. Grafik Waktu Tunda Vs Laju Dosis Cu-64

Dari Gambar 20 diperoleh persamaan (20) dengan y menyatakan laju dosis dan x menyatakan waktu tunda.

$$y = 1,4903.10^{-7} e^{-0,054x} \quad (20)$$

KESIMPULAN

Laju dosis yang dihasilkan kolimator pada jarak 50 cm dari ujung kolimator setelah di iradiasi selama enam jam sebesar $1,5328E-03$ mR/jam. Laju dosis tersebut masih dibawah NBD yang diizinkan BAPETEN 1 mR/jam.

SARAN

Diperlukan spektroskopi α dan β untuk mengetahui setiap unsur penyusun kolimator yang akan menghasilkan radiasi α dan β jika dimasukkan atau diletakkan dalam medan neutron.

DAFTAR PUSTAKA

1. Trikasjono, T., Supriyatni, E., dan Budiyo, H., 2008, *Studi Penerimaan Dosis Eksterna Pada Pekerja Radiasi di Kawasan Batan Yogyakarta*, Prosiding Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir, Yogyakarta.
2. BAPETEN, 2013, *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan*

- Tenaga Nuklir*, Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Jakarta.
3. Wahyono, P., I., dkk, 2012, *Laporan Analisis Keselamatan (Rev.7)*, PTAPB-BATAN: Yogyakarta.
 4. Umbara, R.H., 2011, *Pedoman Keselamatan dan Proteksi Radiasi Kawasan Nuklir Serpong (Revisi 1)*, PUSPIPTEK Serpong: Tangerang Selatan.
 5. Amiruddin, A., 2008, *Kimia Inti & Radiokimia*, PPIN-BATAN: Kawasan Puspipstek Serpong-Tangerang.
 6. Suparman, L., Y., 2011, *Penentuan Karakteristik Distribusi Fluks Neutron Thermal Fasilitas Iradiasi Lazy Susan (LS) Arah Horizontal Reaktor Kartini*, Skripsi Jurusan FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta.
 7. Awaludin, R., 2009, *Pembuatan Nanopartikel Emas Radioaktif dengan Aktivasi Neutron*, PRR-BATAN: Kawasan Puspipstek Serpong-Tangerang.
 8. Stabin, M.G., 2007, *Radiation Protection and Dosimetry*, Springer, New York.
 9. Mujiyono, M., Suharto, S., Mukhammad, A.F.H., Nurhadiyanto, D., dan Sumowidagdo, A.I., 2014, *Manufaktur Collimator BNCT Berbahan Nikel dengan Metode Gravity Casting dan Analisis Potensi Centrifugal Casting Sebagai Metode Alternatif*, Jogja Bangkit Publisher: Yogyakarta.
 10. Khoirunisa, 2015, *Analisis Kandungan Unsur Pada Bahan Kolimator Neutron Sebelum Dan Setelah Manufaktur Menggunakan Metode AAN*, Tugas Akhir, STTN-BATAN: Yogyakarta.
 11. Widarto., dkk, 2014, *Status Saat Ini Pengembangan Teknologi Dan Aplikasi Boron Neutron Capture Cancer Therapy Dengan Compact Neutron Generator*, Jogja Bangkit Publisher: Yogyakarta.
 12. Novitasari., I., S., 2015, *Analisis Fluks Neutron Pada Beamport Tembus Radial Reaktor Kartini Untuk Fasilitas Uji in Vivo Dan In Vitro Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)*, Skripsi Jurusan FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta.
 13. Erdtmann Gerhard, *Neutron Activation Tables*, Weinheim Nem York: Verlag Chemie, 1976.

