

รายการอ้างอิง

1. ประสม สุขสว่าง. การศึกษาวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
2. นิวัฒน์ ตะโพนทอง. การศึกษาวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรก-เอกซ์. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2531.
3. ศศิพันธุ์ ณ สงขลา. การพัฒนาฉากสังกะสีชนิดโฟลด์ (เงิน) เพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
4. Swinth, K. L. , Low-flux neutron imaging. British Journal of NDT (1974) : 133.
5. Baheti, G. L. et al. Optimization techniques in low flux neutron radiography. The Third World
Conference on Neutron Radiography, Osaka, Japan, 1989, pp. 1-12. Japan, 1989.
6. Domanus, J. C. , ed. Practical Neutron Radiography. Dordrecht, Netherlands : Kluwer
Academic Publishers, 1992.
7. Garrett, D. A. and Berger, H. , The technological development of neutron radiography.
Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977) :125-141.
8. Chadwick, J. , Proc. R. Soc. A136, 1932, p.692. Cited in Garrett D.A. and Berger H. The
technological development of neutron radiography. Atomic Energy Review 15 No.2
(June 1977) :127.
9. Lamarsh, J. R. , Introduction to Nuclear Engineering. 2nd ed. Massachusetts : Addison-
Wesley Publishing Company, Inc. , 1983.
10. Curtiss, L. F. , Introduction to Neutron Physics. New York : Van Nostrand, 1959. cited in
Garrett D.A. and Berger H. The technological development of neutron radiography.
Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977) :128.
11. Knoll, G. F. , Radiation Detection and Measurement. 2nd ed. New York : John Wiley &
Sons, 1989.

12. Matfield, R. , Atom. London, 1971. cite in Garrett D.A. and Berger H. The technological development of neutron radiography. Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977) : 131.
13. Koester, L. and Yelon, W. B. , Summary of low energy neutron scattering lengths and cross-sections. Neutron Diffraction Newsletter. , 1982. cited in Domanus, J. C. , ed. Practical Neutron Radiography. Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1992.
14. Hawkesworth, M. R. , Neutron radiography : Equipment and methods. Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977) : 169-220.
15. Ikeda, Y. , Ando, A. , Ohkubo, K. , Yokoi, M. , and Kobayashi, H. , A new imaging device for neutron CT. The Third World Conference on Neutron Radiography, Osaka, Japan, 1989, p. 482. Japan, 1989.
16. Ross, A. M. , Neutron radiographic inspection of nuclear fuels. Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977) : 225.
17. ASM International, Nondestructive evaluation and quality control. Metals Handbook 17 (1989) : 387-395.
18. นเรศร์ จันทน์ขาว. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2541. (อดัฒานา)
19. Berger, H. , Neutron Radiography. Amsterdam : Elsevier Publishing Company, 1975.
20. วิเชียร รัตนขงขัย. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนบีเอ-10. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัฒชาติวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
21. Barton, J.P. ,Divergent beam collimator for neutron radiography. Material Evaluation 45A, 1967. cited in Domanus J.C. and Greim L. Collimators Practical Neutron Radiography. Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1992.
22. Harms, A. A. , Physical process and mathematical methods in neutron radiography. Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977) : 147.
23. Hawkesworth, M. R. , Radiography with low intensity neutron beams : some reciprocity failure characteristic of films used with light-emitting intensifying screens. Journal of Physics E 2 (1970) : 673.

24. Bloch, P. and Hale, J. , Calibration of potential of x-ray generators in the diagnostic energy region . *Phys Med Biol.* 11, 1966, pp. 577-587. อ้างถึงใน จิตต์ชัย สุริยะไพชยากร, มานัส มงคลสุข, มาลินี ชนารุณ และ ชวทิศ วงษ์เอก. การควบคุมคุณภาพของภาพเอกซเรย์. กรุงเทพมหานคร : พี. เอ. ทีฟวิง, 2538.
25. อรุณัตถ์ กิตติกุล. การพัฒนาระบบวัดเทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์โดยใช้ท่อนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
26. Richard, B. F. and Virginia, S. S. , eds. Table of Isotopes. 2 vols. 8th ed. New York : Jonh Wiley & Sons , 1998.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



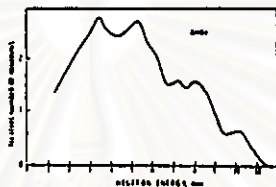
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

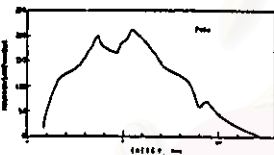
รายละเอียดของต้นกำเนิดนิวตรอน พอลโเนียม-210/เบริลเลียม และอะเมริเซียม-241/เบริลเลียม

Po-210, Am-241, and Pu-238 Neutron Sources Model 2720

The Model 2720 series of neutron sources encompasses eight sizes of capsules which use Po-210, Am-241, or Pu-238 as the alpha emitter. Several target elements are available; the highest neutron-yielding target element is beryllium.



	PoBe	AmBe	PuBe
Half-life	138.4 d	453 y	87.4 y
Form of alpha emitter	metal	oxide	oxide
Yield, $n \times 10^6$ /sec/Ci	2.4	2.2	2.2
Calibration	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$
Maximum source strength, Ci	450	40	200
Internal volume requirements, cm^3 /Ci	0.03	1.5	0.5
Gamma Radiation, $mr/hr/Ci-m$	0.12	10	0.01



Neutron sources are commonly produced by double encapsulation in 304 stainless steel. However, other metals such as steel, nickel, tantalum, or aluminum may be substituted. Where sources will be subjected to extreme conditions (in an atomic reactor) modifications in design are required to meet specifications for welding. Therefore, butt weld designs may be replaced by step (circumferential) welds. Welded plugs may be used instead of solid bottoms. Lengths and diameters may also be altered without changing other specifications.

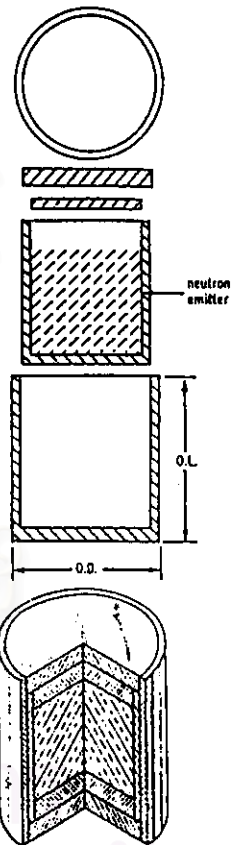
Approximate Neutron Yield for Alternate Targets

Isotope	Neutrons $\times 10^6$ /sec/Ci		
	B (metal)	F (CaF ₂)	Li (Li ₂ O)
Po-210	0.8	0.2	0.04
Am-241	0.7	0.1	0.03
Pu-238	0.5	0.1	0.02

The average reported⁽¹⁾ neutron energies for (α, n) reactions with these alternate targets are:

Boron	3 MeV
Fluorine	1.5 MeV
Lithium	0.4 MeV

(1) Ref: J. B. Marion and J. L. Fowler, "Fast Neutron Physics," Part I, Interscience Publishers, Inc., N. Y., 1960.



Testing—Standard neutron sources have been tested and classified by ANSI procedures. Leak testing is by 7-day wipe test and pressure bubble or hot water bubble test. Optional tests are mass spectrometer leak test, dye penetrant, and X-radiography.

Maximum Curie Content					
		00		0L	
Am-241	Pu-238	Po-210	(in.)	(in.)	(in.)
0.1	0.4	4	0.50	0.50	
0.25	1	12	0.50	0.70	
1	6	60	0.75	0.87	
1	20	200	1.00	1.12	
6	30	300	1.00	1.50	
10	50	450	1.00	2.00	
25	125	—	1.50	2.50	
40	200	—	1.50	3.50	

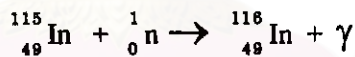
ภาคผนวก ข.

การวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์โดยวิธี Foil Activation

แผ่นโลหะที่ใช้ในการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. เป็นธาตุที่มีภาคตัดขวางสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนสูง เพื่อให้เกิดไอโซโทปรังสีได้ดี
2. มีค่าครึ่งชีวิตที่เหมาะสม ทำให้ใช้เวลาไม่นานในการอบนิวตรอนเพื่อให้ได้ความแรงรังสีสูงสุด และมีอัตราการสลายตัวของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นไม่เร็วหรือช้าจนเกินไป
3. แผ่นโลหะควรมีความหนาน้อยๆ เพื่อลดปัญหาในด้านการกำบังตัวเอง (self-shielding) อย่างไรก็ตาม โดยปกติต้องมีการแก้ค่าการกำบังตัวเองเสมอ เนื่องจากแผ่นโลหะที่ใช้มีค่าภาคตัดขวางนิวตรอนสูง

ในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นอินเดียมสำหรับวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ เมื่อนำแผ่นอินเดียมไปอบรังสีจากต้นกำเนิดนิวตรอนที่บริเวณปลายนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างแผ่นอินเดียมและเทอร์มัลนิวตรอนแบบ (n,γ) ดังสมการ



$$\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอนที่ทุกพลังงาน} = N\sigma_a\phi = A_0$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \phi = \frac{A_0}{N\sigma_{act}} \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ N = จำนวนอะตอมทั้งหมดของแผ่นอินเดียมที่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้วเกิดเป็นธาตุกัมมันตรังสี

σ_{act} = ภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืนนิวตรอนมีหน่วยเป็นบารน์

ϕ = นิวตรอนฟลักซ์ มีหน่วยเป็นนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

เมื่อนำแผ่นอินเดียมไปอบรังสีเป็นเวลานานเพียงพอที่จะเกิดสภาวะคงที่ คืออัตราการเกิดและการสลายตัวของรังสีมีค่าเท่ากัน เรียกว่า ความแรงรังสีอิ่มตัว (Saturation activity) ซึ่งเป็นความแรงรังสีสูงสุด

ดังนั้น อัตราการแผ่รังสีของอินเดียมที่อบรังสีในเวลา T เท่ากับ

$$A_T = A_0(1 - e^{-\lambda T})$$

เมื่อ A_0 = อัตราการแผ่รังสีของอินเดียมเมื่ออบรังสีจนอิ่มตัว

T = เวลาที่ใช้ในการอบรังสี มีหน่วยเป็นวินาที

λ = ค่าคงที่การสลายตัวของอินเดียม

เมื่อนำแผ่นอินเดียมที่อบรังสีแล้วออกมาจากต้นกำเนิดนิวตรอน แล้วนำเข้าสู่ระบบวัดในเวลา t ต่อมา รังสีบางส่วนจะสลายตัวไป ดังนั้นค่าที่วัดได้จะน้อยกว่าความเป็นจริง จึงแก้ด้วยเทอม $e^{-\lambda t}$

$$A_T = A_0(1 - e^{-\lambda T})e^{-\lambda t} \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ t = เวลาระหว่างนำแผ่นอินเดียมออกจากการอบนิวตรอนจนถึงเริ่มทำการนับวัดรังสี มีหน่วยเป็นวินาที

จากสมการ
$$\phi = \frac{A_0}{N\sigma_{act}}$$

ดังนั้น
$$\phi = \frac{A_T}{N\sigma_a (1 - e^{-\lambda T}) e^{-\lambda t}}$$

ในกรณีที่ใช้เวลาในการอบรังสีนานมาก ค่า $e^{-\lambda T}$ จะมีค่าน้อยลงจนใกล้ศูนย์ เนื่องจากไม่มีการสลายอีกต่อไป

ประสิทธิภาพของเครื่องมือ ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมา ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดกับหัววัด รูปร่างของต้นกำเนิดรังสี ชนิดและขนาดของหัววัด

ประสิทธิภาพของหัววัดคำนวณได้จาก

$$E = \frac{\text{cps} \times 100}{\text{dps}}$$

เมื่อ E = ประสิทธิภาพของเครื่องมือ

cps = net area มีหน่วยเป็น count/sec

dps = ความแรงของต้นกำเนิดรังสี ณ เวลาทำการวัดมีหน่วยเป็น disintegration per

second

นอกจากนี้ความแรงรังสีของแผ่นอินเดียม (A_T) ยังขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นอินเดียมด้วย เนื่องจากอินเดียมมีภาคตัดนิวตรอนสูง ฟลักซ์นิวตรอน (ϕ) ในแผ่นอินเดียมลดลงตามความหนา กล่าวคืออะตอมอินเดียมส่วนที่อยู่ลึกๆ จากผิวเข้าไปจะทำปฏิกิริยากับนิวตรอนน้อยกว่าส่วนที่อยู่ผิวทำให้ A_T มีค่าน้อยกว่าที่เป็นจริงจึงต้องแก้ค่า ϕ ที่ได้ด้วยค่าแฟกเตอร์กำบังตัวเอง (Self-Shielding Factor (f_m)) ซึ่งขึ้นอยู่กับ ความหนาของแผ่นอินเดียม ดังนี้

$$\phi_m = f_m \phi$$

เมื่อ ϕ_m คือนิวตรอนฟลักซ์ที่วัดได้

$$f_m = \frac{1}{2\xi} (1 - e^{-2\xi})$$

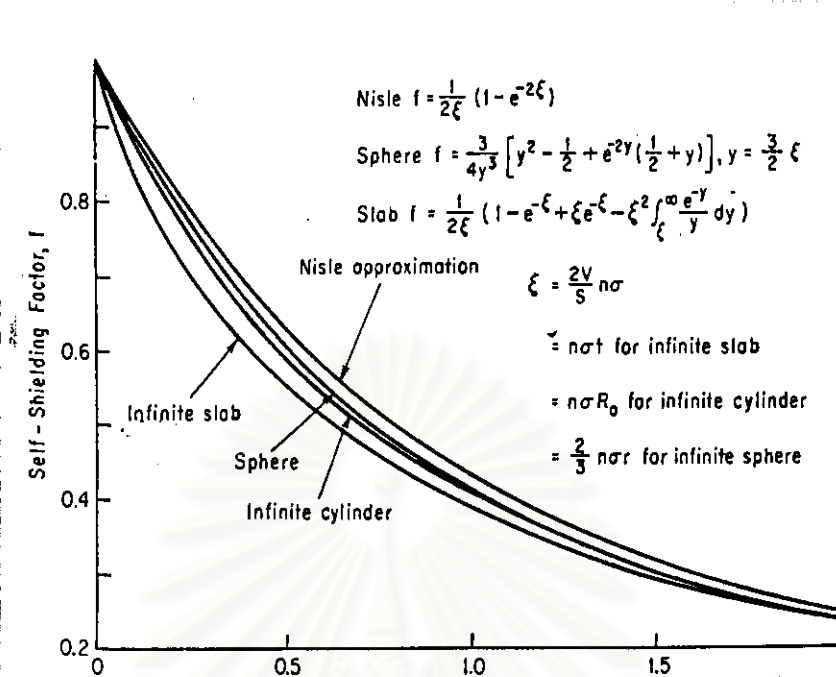
โดยที่

$$\xi = \left(\frac{2V}{S} \right) \Sigma_a$$

เมื่อ V = ปริมาตรของแผ่นอินเดียม

S = พื้นที่ผิวของแผ่นอินเดียม

Σ_a = ภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืน



รูปที่ ข.1 ค่า self-shielding factor ตามสมการของ Nisle และสมการสำหรับ slab , cylinder และ sphere^[25]

(ในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นอินเดียมแบบ slab)

การคำนวณประสิทธิภาพหัววัด

ทำการคำนวณโดยใช้พื้นที่ได้กราฟจากโซเดียม-22 (Na-22) ผลิตเมื่อวันที่ 1 เมษายน 1988 มีความแรงรังสี 1.055 ไมโครคูรี (μCi) นับวัดรังสีเมื่อวันที่ 27 มกราคม 1999 โดยใช้หัววัดโซเดียมไอโอไดค์ (ทลเลียม) [NaI(Tl)] เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว มีระยะห่างจากหัววัดประมาณ 1 เซนติเมตร ทำการวัดเป็นเวลา 2000 วินาที

เมื่อ t เป็นเวลาที่รังสีบางส่วนจากต้นกำเนิดครึ่งสลายตัว ตั้งแต่วันที่ผลิตจนถึงวันที่ทำการวัด

$$\begin{aligned}
 t &= (10 \times 365.25) + (9 \times 30) + 26 \\
 &= 3948.5 \text{ วัน} \\
 &= 3948.5 \times 24 \times 60 \times 60 \\
 &= 341,150,400 \text{ วินาที}
 \end{aligned}$$

$$\text{เมื่อ } A_0 = 1.055 \times 10^{-6} \times 3.7 \times 10^{10} = 39,035 \text{ dps}$$

$T_{1/2}$ ของ Na-22 เท่ากับ 2.60 ปี

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{(2.6 \times 365.25 \times 24 \times 60 \times 60)} = 8.446 \times 10^{-9} \text{ วินาที}^{-1}$$

จะได้ความแรงรังสีดังนี้

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\lambda t} \\ &= 39,035 \times e^{-(8.446 \times 10^{-9} \times 3.411504 \times 10^8)} \\ &= 2188.251 \end{aligned}$$

เมื่อ % abundance ของ Na-22 เป็น 99.95%

transmission factor เป็น 0.996

$$\begin{aligned} A &= 2188.251 \times 0.9995 \times 0.996 \\ &= 2178.408 \end{aligned}$$

ที่พลังงาน 1.275 MeV มีค่า area = 216,698/2000 วินาที = 108.349

ดังนั้นประสิทธิภาพของหัววัดโดยใช้ Na-22 ที่พลังงาน 1.275 MeV เท่ากับ

$$\% \text{ Efficiency} = \frac{\text{cps} \times 100}{\text{dps}}$$

$$= \frac{108.349 \times 100}{2178.408}$$

$$= 4.974 \%$$

การคำนวณเทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์

อินเดียมฟอสฟอรัสขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น

น้ำหนักอินเดียมฟอสฟอรัสรวม = 0.29404 กรัม

ทำการอบนิวตรอนเป็นเวลา 2 วัน จนแผ่นอินเดียมมีความแรงรังสีอิ่มตัวแล้วปล่อยให้รังสีสลายตัว 10 นาที หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการวัด นาน 2,000 วินาที

$$\text{AREA} = 2,803 \text{ counts}/2,000 \text{ sec}$$

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{3,252} = 2.131 \times 10^{-4}$$

$T_{1/2}$ ของ In-116 = 54.2 นาที = 54.2x60 = 3,252 วินาที

$$\begin{aligned} N_{600 \approx 2600} &= \int_{600}^{2600} N_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{-N_0}{\lambda} \left[e^{-\lambda t} \right]_{600}^{2600} \\ &= \frac{-N_0}{2.131 \times 10^{-4}} \left[e^{-2.131 \times 10^{-4} \times 2600} - e^{-2.131 \times 10^{-4} \times 600} \right] \\ &= \frac{-N_0}{2.131 \times 10^{-4}} [0.5746 - 0.8800] \\ &= 1433.13 N_0 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$N_0 = \frac{N_{600 \approx 2600}}{1433.13} = \frac{2803}{1433.13} = 1.9559 \text{ cps}$$

จากสมการ (4)

$$\text{dps} = \frac{\text{cps}}{\gamma(\%) \times E(\%)}$$

$$= \frac{1.9559}{(0.56 + 0.84) \times 0.053} = 26.3598$$

เทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์ (ϕ_{th}) เท่ากับ

$$\begin{aligned}\phi_{th} &= \frac{A \times M}{W \times k \times N_A \times \sigma_{act} \times (1 - e^{-\lambda t})} \\ &= \frac{26.3598 \times 114.82}{0.29404 \times 0.957 \times 6.02 \times 10^{23} \times 162.37 \times 10^{-24}} \\ &= 110.037 \text{ n/cm}^2/\text{sec}\end{aligned}$$

เมื่อ A = Activity (dps)

k = % abundance ของ In-115

$\sigma_{act} = 162.37$ บาร์น ^[26]

การคำนวณแก้ค่า Self-Shielding factor

ความหนาของอินเดียมฟอสฟอรัส (t) หาได้จาก

$$\begin{aligned}t &= \frac{m}{A \times \sigma} \left[\frac{g}{\text{cm}^2 \times \left(\frac{g}{\text{cm}^3} \right)} \rightarrow \text{cm.} \right] \\ &= \frac{0.29404}{3 \times 7.28} = 0.01346\end{aligned}$$

เมื่อ m = มวลของอินเดียมฟอสฟอรัสมีหน่วยเป็น g

A = พื้นที่หน้าตัดของอินเดียม มีหน่วยเป็น cm^2

ρ = ความหนาแน่นของอินเดียม มีหน่วยเป็น g/cm^3

$$\begin{aligned}\xi &= \frac{2V}{S} n\sigma \\ &= n\sigma t \text{ สำหรับ infinite slab} \\ &= \sum_a t \\ &= 7.75 \times 0.01346 = 0.1043\end{aligned}$$

แทนค่า ξ ลงในสมการ (5)

$$\begin{aligned} f_{th} &= \frac{1}{2\xi} (1 - e^{-2\xi}) \\ &= \frac{1}{2 \times 0.1043} (1 - e^{-2(0.1043)}) \\ &= 0.9026 \end{aligned}$$

ดังนั้นเทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์จะเท่ากับ

$$\phi_{th} = \frac{110.037}{0.9026} = 121.9111 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นางสาวทิพาพร อติกานต์กุล เกิดวันที่ 11 พฤศจิกายน พ.ศ. 2516 ที่ อำเภอเมือง จังหวัด
ชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขารังสีเทคนิค คณะรังสีเทคนิค
มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2537 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2538



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย