รายการอ้างอิง

1. นเรศร์ จันทน์ขาว. *การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน*. เอกสารการสอนวิชาการประยุกต์ใช้รังสีและไอโซโทปรังสีในทางอุตสาหกรรม. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; **2541**.
2. Kenneth T. Faler, Pocatello.; Castable Neutron Shield.; US Patent 3471414.; (1969).
3. Reactor Experiments, Inc. [online] Aviable from: http://www.reax.com/; [2002, Aug 15].
4. John Caunt Scientific Limted. [online] Avialable from: http://dspace.dial.pipex.com/johncaunt/neutron_shielding.htm/; [2002, Aug 15].
5. S. I. Bhuiyan., F. U. Ahmed., A. S. Mollard., M.A. Rahman.; Studies of the Neutron Transport and Shielding Prpperties of Locally Developed Shielding material : Poly-boron.; *Health Phys.*, **57**, (1989) 819-824.
6. Samir abdul-Majid., Fadel Othman.; Neutron Attenuation Characteristics of Polyethylene, Polyvinyl Chloride, and Heavy Aggregate concrete and Mortars.; *Health Phys.*, **66**, (1994) 327-338.
7. Waleed H. Abulfaraj.; Special Concrete Shield Selection Using the Analytic Hierarchy Process.; *Nucl. Tech.*, **107**, (1994) 215-226.
8. Reinhard Erast Vogel.; Shaped Polymeric Shield Againt Neutron and Gamma Radiation.; US Patent 3609372.; (1968).
9. L. F. Curtiss.; *Introduction to Neutron Physics*.; D.Van Nostrand Company, Inc.; (1995).
10. Edward L. Alpen.; *Radiation Biophysics*.; Prentice-Hall International, Inc.; (1990).
11. International Atomic Energy Agency.; *Atomic Energy Review*., **15(2)**, (1977) 123-368.
12. Arthur B. Chilton., J.Kenneth Shultis., Richard E. Faw.; *Principles of Radiation Shielding*.; Prentice-Hall, Inc.; (1984).
13. Alan Munter.[online] Avialable from: http://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/. NIST Center for Neutron Research; [2002 ,Aug 15].
14. Han-Georg Elias.; *An Introduction to polymer Science*.; VCH Publishers, Inc.; (1997).
15. Malcolm P. Stevens.; *Polymer Chemistry an Introduction*.; Oxford University Press.; (1999).
16. R. H. Burgess.; *Manufacture and Processing of PVC*.; Macmillan.; (1982).
17. F. Albert Cotton., Geoffrey Wilkinson., Paul L. Gaus.; *Basic Inorganic Chemistry 3rd edit.*; John Wiley&Sons, Inc.; (1995).

18. Glenn F. Knoll.; *Radiation Detection and Measurement 2nd edit.*; John Wiley&Sons, Inc.; (1989).

19. John R. Lamarsh.; *Introduction to Nuclear Engineering 2nd edit.*; Addision-Wesley Publishing company.; (1983).

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเตรียมชิ้นงาน K1-K8 ในหัวข้อ 4.1.6 มีส่วนประกอบของพีวีซี พลาสติไซเซอร์และกรดบอริก ต่างๆกัน สามารถคำนวณองค์ประกอบและค่าภาคตัดขวางของชิ้นงานได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้ชิ้นงาน K6

เนื่องจากชิ้นงาน K6 ประกอบด้วยกรดบอริก 70 กรัม พีวีซี 100 กรัม และ DOP 61.5 กรัม

จะได้ว่า ชิ้นงานมีองค์ประกอบของกรดบอริก 30.21 %

พีวีซี 43.20 %

DOP 26.59 %

น้ำหนักของชิ้นงานที่บรรจุในภาชนะอะลูมิเนียมเท่ากับ 30.395 กรัม

น้ำหนักของกรดบอริกเท่ากับ $\frac{30.395 \times 30.21}{100} = 9.182$ กรัม

มวลโมเลกุลของกรดบอริกเท่ากับ 390 กรัม

จำนวนโมลกรดบอริกเท่ากับ $\frac{9.182}{390} = 0.177$ โมล

ปริมาตรของภาชนะอะลูมิเนียม เท่ากับ $\pi (2.725)^2 \times 1 = 23.33\ cm^3$

จำนวนอะตอมโบรอน $\frac{0.177 \times 6.02 \times 10^{23}}{23.33} = 4.573 \times 10^{21}$ อะตอม/cm^3

จำนวนอะตอมออกซิเจน $\frac{3 \times 0.177 \times 6.02 \times 10^{23}}{23.33} = 1.372 \times 10^{22}$ อะตอม/cm^3

จำนวนอะตอมไฮโดรเจน $\frac{3 \times 0.177 \times 6.02 \times 10^{23}}{23.33} = 1.372 \times 10^{22}$ อะตอม/cm^3

ค่าภาคตัดขวางมหภาคการกระเจิงจากผลของโบรอน $= 4.573 \times 10^{21} \times 5.24 \times 10^{-24}$

$= 0.024\ cm^{-1}$

ค่าภาคตัดขวางมหภาคการกระเจิงจากผลของออกซิเจน $= 1.372 \times 10^{22} \times 4.232 \times 10^{-24}$

$= 0.058\ cm^{-1}$

ค่าภาคตัดขวางมหภาคการกระเจิงจากผลของไฮโดรเจน $= 1.372 \times 10^{22} \times 82.02 \times 10^{-24}$

$= 1.125\ cm^{-1}$

เพราะฉะนั้นค่าภาคตัดขวางมหภาคการกระเจิงจากผลของพีวีซีมีค่าเท่ากับ 1.207 cm^{-1}

และจะได้ว่า

ค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนจากผลของโบรอน $= 4.573 \times 10^{21} \times 767 \times 10^{-24}$

$= 3.508\ cm^{-1}$

ค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนจากผลของออกซิเจน $= 1.372 \times 10^{22} \times 0.00019 \times 10^{-24}$

ประมาณ $0\ cm^{-1}$

ค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนจากผลของไฮโดรเจน $= 1.372 \times 10^{22} \times 0.3326 \times 10^{-24}$

$= 0.005\ cm^{-1}$

เพราะฉะนั้นค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนจากผลของพีวีซีมีค่าเท่ากับ $3.513\ cm^{-1}$

และค่าภาคตัดขวางมหภาครวมของทั้งชิ้นงานมีค่าเท่ากับ $4.720\ cm^{-1}$

เมื่อคิดวิธีเดียวกันนี้กับชิ้นงานอื่นๆ ได้ผลดังตาราง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

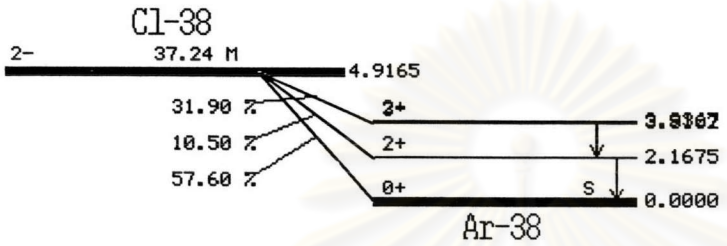
องค์ประกอบและค่าภาคตัดขวางมหภาคของชิ้นงาน K1-K8

ชิ้นงาน	กรดบอริก (กรัม)	พีวีซี (กรัม)	DOP (กรัม)	ค่าภาคตัดขวางมหภาคการกระเจิงจาก				ค่าภาคตัดขวางมหภาคการดูดกลืนจาก				รวม
				กรดบอริก (cm^{1-})	พีวีซี (cm^{1-})	DOP (cm^{1-})	ชิ้นงาน (cm^{1-})	กรดบอริก (cm^{1-})	พีวีซี (cm^{1-})	DOP (cm^{1-})	ชิ้นงาน (cm^{1-})	
K1	0.000	17.103	10.519	0.000	1.936	2.274	4.210	0.000	0.258	0.009	0.267	4.477
K2	1.459	17.164	10.556	0.192	1.943	2.282	4.417	0.558	0.259	0.009	0.826	5.243
K3	2.953	16.456	10.120	0.388	1.863	2.188	4.439	1.130	0.248	0.009	1.386	5.825
K4	4.452	15.623	9.608	0.585	1.769	2.077	4.431	1.703	0.236	0.008	1.947	6.378
K5	5.951	14.740	9.065	0.783	1.669	1.960	4.411	2.277	0.222	0.008	2.506	6.917
K6	9.182	13.135	8.078	1.207	1.487	1.746	4.440	3.512	0.198	0.007	3.717	8.157
K7	10.364	12.959	7.970	1.363	1.467	1.723	4.552	3.964	0.195	0.007	4.167	8.719
K8	12.839	11.616	7.144	1.688	1.315	1.544	4.547	4.911	0.175	0.006	5.092	9.639

พีวีซีมีส่วนประกอบของ Cl-37 ซึ่งในธรรมชาติมี 24.23 % จากคลอรีนทั้งหมด Cl-37 สามารถเกิดอันตรกิริยาแบบจับนิวตรอนดังสมการ

$$^{37}Cl(n,\gamma)\,^{38}Cl \qquad \sigma = 432.9 \text{ mbarn}$$

ซึ่ง Cl-38 เป็นไอโซโทปที่ไม่เสถียร มีค่าครึ่งชีวิต 37.24 นาที สลายตัวให้รังสีเบตาพลังงาน 4.917 MeV และ รังสีแกมมาพลังงาน 1.643 และ 2.167 MeV ดังรูป



เนื่องจากรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นมีพลังงานสูงและค่าครึ่งชีวิตของ Cl-38 ไม่นาน (37.24 นาที) และมีค่าภาคตัดขวางนิวตรอน 432.9 mbarn ดังนั้นหากวัสดุกำบังโดนกระตุ้นให้เป็นไอโซโทปรังสี จึงอาจเกรงว่าจะเป็นอันตรายแก่ผู้ปฏิบัติงาน แต่สามารถคำนวณปริมาณของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นได้ ดังสมการ

$$A = N\sigma\phi\left(1 - e^{-\lambda T}\right)$$

เมื่อ A = ความแรงรังสี

N = จำนวนนิวไคลด์ของตัวกลาง

σ = ค่าภาคตัดขวางของนิวไคลด์

ϕ = ฟลักซ์ของนิวตรอน

$\lambda = \dfrac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}}$ = ค่าคงที่การสลายตัว

T = เวลาที่ได้รับรังสี

เมื่อฉายรังสีเป็นเวลานานมากๆ จะได้ว่า

$$A = N\sigma\phi$$

ในที่นี้ N สำหรับชิ้นงาน K6 สามารถคำนวณได้โดย

น้ำหนักพีวีซีในชิ้นงาน K6 เท่ากับ (ภาคผนวก ก) 13.135 กรัม

จำนวน Cl-37 อะตอม เท่ากับ $\frac{13.135 \times 6.02 \times 10^{23} \times 24.23}{62.453 \times 100} = 3.068 \times 10^{22}$ อะตอม

เนื่องจากภาชนะอะลูมิเนียมมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 23.33 cm^2

จะได้ว่า $N = \frac{3.068 \times 10^{22}}{23.33} = 1.315 \times 10^{21}$ อะตอม/cm^2

สำหรับการใช้งานกำบังนิวตรอนนอกเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ค่า ϕ ของนิวตรอนปกติมีค่าสูงสุด ไม่เกิน 10^6 n/cm^2-s เช่นในกรณีของลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่นำมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ดังนั้นจึงใช้ค่า $\phi = 10^6$ n/cm^2-s ในการคำนวณ

จะได้ว่า ความแรงรังสีของ Cl-38 ที่เกิดขึ้น $= 1.315 \times 10^{21} \times 432.9 \times 10^{-27} \times 10^6$

$= 569$ Bq/cm^2

แต่เนื่องจากในภาชนะอะลูมิเนียมมีพีวีซีอยู่ $\frac{13.135}{23.33} = 0.563$ g/cm^2

จะได้ว่าความแรงรังสีของ Cl-38 $\frac{569}{0.563} = 1011$ Bq/g $\approx$ 1.011 kBq/g

หรือ 1011 kBq/kg

หรือ $\frac{1011}{3.7 \times 10^{10}} = 2.733 \times 10^{-8}$ Ci/g $\approx 0.027\ \mu$Ci/g

หรือ 27 μCi/kg

และความแรงรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาคือ $1011 \times (0.319+0.424)$

$= 751$ Bq/g $\approx$ 0.751 kBq/g

หรือ 751 Bq/kg

ซึ่งค่าที่ได้ถือว่าเป็นค่าที่ประมาณการเกินความจริง เนื่องจากในการคำนวณสมมติว่าชิ้นงาน K6 ทำปฏิกิริยากับนิวตรอนสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงานโดยไม่มีการกำบังในตัวเอง (self shielding)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต้นทุนของวัสดุสามารถคำนวณได้โดยอาศัยราคาของวัสดุดังนี้

พีวีซี ไฮบริด ดิสเพอร์ชัน เรซิน เกรด 74GP*	40	บาท/กิโลกรัม
Dioctyl phthalate : DOP**	33	บาท/กิโลกรัม
กรดบอริก***	37.70	$/2 กิโลกรัม
หรือ (45 บาท/$)	848.25	บาท/กิโลกรัม

ชิ้นงาน K6 ประกอบไปด้วยพีวีซี 100 กรัม DOP 61.5 กรัม และ กรดบอริก 70 กรัม รวม 231.5 กรัม คิดเป็นราคาวัสดุได้

$$\text{ราคา} = \frac{100x40}{1000} + \frac{61.5x33}{1000} + \frac{70x848.25}{1000} \quad \text{ประมาณ } 65.50 \text{ บาท}$$

หรือ $\frac{65.50x1000}{231.5}$ ประมาณ 283 บาท/กิโลกรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* ข้อมูลจาก บริษัททีพีซี เพส์ท เรซิน จำกัด. 2545

** ข้อมูลจาก บริษัทเอ็มซีสยามโลจีสติกส์จำกัด. 2545

*** ข้อมูลจาก CATALOG HANDBOOK OF FINE CHEMICAL 1996-1997

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสราวุฒิ พรหมเมศร เกิดวันที่ 1 เดือนกันยายน พ.ศ. 2519 จังหวัดชุมพร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย