รายการอ้างอิง

1. วิเชียร รตนธงชัย. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนบีอี-10. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
2. นเรศร์ จันทน์ขาว. เอกสารประกอบการสอนการถ่ายภาพด้วยรังสีในงานอุตสาหกรรม. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
3. Beniaminov, A.A. Atomic Energy Review. International Atomic Energy Agency, 1977.
4. American Society for Testing and Materials. Standard Practices for Thermal Neutron Radiography of Materials ASTM Designation E 748-95. Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 2000.
5. สมยศ ศรีสถิตย์, อรรถพร ภัทรสุมันต์. การคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์มเพื่อการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย. สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
6. Domanus, J.C.,ed. Practical Neutron Radiography. Netherlands: Kluwer Acadimic Publishers, 1992.

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

ทิพาพร อติกานต์กุล. การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

ธีรวัฒน์ ประกอบผล. การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2540.

ธีรวัฒน์ ประกอบผล. การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลด้วยเทคนิคโทรทัศน์สำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

นพดล นาคเงิน. การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

นิวร ศรีคุณ. การพัฒนาระบบเก็บข้อมูลโพรไฟล์จากภาพถ่ายรังสีบนฟิล์มสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

พรรณี เสถียรศรี. การวิเคราะห์ธาตุหลักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

ภาณุพันธุ์ เข็มหนู. การพัฒนาระบบสแกนด้วยนิวตรอนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

มานัส มงคลสุข. พื้นฐานทางฟิสิกส์ของ CT และ MRI. กรุงเทพฯ : ไพศาลศิลป์การพิมพ์, 2532.

วัลยา เอี่ยมสุรนันท์. การพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปแบบคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีเพื่อการตรวจสอบชิ้นงานอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ศศิพันธุ์ ณ สงขลา. การพัฒนาฉากรังสีซัลไฟด์(เงิน)เพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ภาษาอังกฤษ

Adams, F. and Dams, R. Applied Gamma-ray Spectrometry. 2nd ed. Hungary: Pergamon Press, 1970.

Dendy, P.P. and Heaton, B. Physics for Radiologists. Austria: Blackwell Scientific Publications, 1987.

Honda S., and others. Fine Neutron CT with Film Method. Department of Nuclear Engineering Nagoya University, 1989.

Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement. 2nd ed. Singapore : John Wiley&Sons Company, 1989.

Lamarsh, J.R. Introduction to Nuclear Engineering. 2nd ed. Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, 1983.

Thomas S.C. and others. Christensen's Introduction to the Physics of Diagnostic Radiology. Philadelphia : Lea & Febiger, 1984.

Von Der Hardt, P. and Rottger, Neutron Radiography Handbook. Netherlands : D.Reidel Publishing Company, 1981.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การกำบังนิวตรอนและรังสีแกมมา

ในการทดลองได้ออกแบบกำบังนิวตรอนและรังสีแกมมา เพื่อลดปริมาณรังสีดังกล่าวและให้เข้าไปรบกวนฟิล์มน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนี้

1. แผ่นพาราฟินผสมโบรอน หนา 60 มิลลิเมตร
2. กล่องโบรอนภายในบรรจุกรดบอริก หนา 6 มิลลิเมตร
3. แผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตร
4. แผ่นตะกั่วหนา 5 มิลลิเมตร

1. การกำบังรังสีด้วยแท่งพาราฟินผสมโบรอน หนา 60 มิลลิเมตร

ใช้แท่งพาราฟินผสมโบรอนขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตรความยาว 30 เซนติเมตร ความหนา 6 เซนติเมตร วางไว้ด้านหน้าชิ้นทดสอบและเปิดช่องว่างขนาด 5 เซนติเมตรเพื่อปล่อยให้นิวตรอนส่วนที่ต้องการถ่ายภาพทะลุผ่านไปยังชิ้นทดสอบสำหรับใช้ในการถ่ายภาพ และกั้นนิวตรอนส่วนที่เลยบริเวณทดสอบออกไปไม่ให้เข้าสู่ฟิล์ม ในการกำบังนิวตรอนนี้สามารถคำนวณหานิวตรอนส่วนที่ทะลุผ่านแท่งพาราฟินผสมโบรอนได้ดังนี้

จากภาพที่ ก.1 ความเข้มนิวตรอนที่ทะลุผ่านแผ่นดูดกลืนเป็นไปตามสมการที่ (ก.1)

$$I = I_0 e^{-\Sigma_t \cdot x} \qquad \text{(ก.1)}$$

เมื่อ I คือ ความเข้มนิวตรอนที่ทะลุผ่านแผ่นดูดกลืน

I_0 คือ ความเข้มนิวตรอนที่ตกกระทบแผ่นดูดกลืน

Σ_t คือ ค่าภาคตัดขวางรวมของนิวตรอน

x คือ ความหนาของแผ่นดูดกลืน

อัตราส่วนระหว่างความเข้มนิวตรอนที่ทะลุผ่านแผ่นดูดกลืนกับความเข้มนิวตรอนที่ตกกระทบแผ่นดูดกลืน ดังสมการที่ (ก.2)

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\Sigma_t \cdot x} \qquad \text{(ก.2)}$$

เมื่อใช้แท่งพาราฟินหนา 6 เซนติเมตร x = 6 เซนติเมตร

ค่าภาคตัดขวางรวมของนิวตรอน Σ_t มีค่า 3.15 ซม. $^{-1}$ ดังนั้นอัตราส่วนของนิวตรอนที่ทะลุผ่านแท่งพาราฟิน คือ

$$T = \exp(-3.15\ cm^{-1})(6\ cm)$$

$$\approx 0\ \%$$

แท่งพาราฟินหนา 6 เซนติเมตร สามารถกั้นนิวตรอนได้เกือบ 100 %

แต่ในแท่งพาราฟินนี้ผสมโบรอนซึ่งมีค่าภาคตัดขวางการรวมของนิวตรอน Σ_t มีค่า 104.8 ซม. $^{-1}$ จะช่วยในการดูดจับนิวตรอนได้มากขึ้น ดังนั้นแท่งพาราฟินผสมโบรอนจึงกั้นนิวตรอนได้ทั้งหมด

2. การกำบังรังสีด้วยกล่องโบรอนภายในบรรจุกรดบอริก หนา 6 มิลลิเมตร

กรดบอริก (boric acid) เป็นสารประกอบ มีสูตรทางเคมี คือ $H_3\ BO_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 61.84 กรัม ความหนาแน่น 1.4347 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในหนึ่งโมเลกุลมีโบรอนเป็นองค์ประกอบอยู่ 1 อะตอม ซึ่งนำมาใช้ในการลดทอนนิวตรอนได้ สามารถคำนวณหาค่าภาคตัดรวมของนิวตรอนของสารประกอบได้จากสมการที่ (ก.3) ดังต่อไปนี้

$$\Sigma_C = \rho \frac{N_A}{A} \sum \sigma_i \qquad \text{(ก.3)}$$

เมื่อ Σ_C คือ ค่าภาคตัดรวมของนิวตรอนของสารประกอบ

ρ คือ ความหนาแน่นของสารประกอบ

N_A คือ เลขอะโวกาโดร 6.023 X 10^{23} อะตอม กรัม โมล$^{-1}$

A คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบ

$\Sigma\sigma_i$ คือ ผลรวมค่าภาคตัดรวมของนิวตรอนของสารประกอบ

ไฮโดรเจน 3 อะตอมมีค่าภาคตัดรวมของนิวตรอน = 3 (20.49 + 0.333) = 62.469 บาร์น

โบรอน 1 อะตอมมีค่าภาคตัดรวมของนิวตรอน = (4.27 + 767) = 771.27 บาร์น

ออกซิเจน 3 อะตอมมีค่าภาคตัดรวมของนิวตรอน = 3(3.761 + 0.0019) = 11.2887 บาร์น

ดังนั้น กรดบอริก 1 โมเลกุล มีค่าภาคตัดรวมของนิวตรอน = 62.469 + 771.27 + 11.2887 บาร์น

= 845.0277 บาร์น

$\Sigma\sigma_i \approx$ 845 บาร์นต่อโมเลกุล

แทนค่าในสมการที่ (ก.3) กรดบอริก จะมีค่าภาคตัดรวมของนิวตรอน

$$\Sigma_c = 1.4347 \times \frac{6.023 \times 10^{23}}{61.84} \times 845 \times 10^{-24}$$

$$= 1.4347 \times 8.23$$

$$= 11.81 \text{ ซม}^{-1}$$

แทนค่าในสมการที่ (ก.2) จะได้ค่าการทะลุผ่านของนิวตรอน ดังนี้

$$T = \exp(-11.81 \text{ cm}^{-1})(0.6 \text{ cm})$$

$$= 0.08 \%$$

ดังนั้น กล่องโบรอนสามารถกั้นนิวตรอนได้ประมาณ 99.92%

3. การกำบังรังสีด้วยแผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตร

แคดเมียมมีค่าภาคตัดรวมของนิวตรอน Σ_t = 117.0 ซม.$^{-1}$

ความหนา x = 0.05 เซนติเมตร

แทนค่าในสมการที่ (ก.2) จะได้ค่าการทะลุผ่านของนิวตรอน ดังนี้

$$T = \exp(-117.0 \text{ cm}^{-1})(0.05 \text{ cm})$$

$$= 0.29 \%$$

ดังนั้น แคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตร สามารถกั้นนิวตรอนได้ประมาณ 99.7 %

4. การกำบังรังสีด้วยแผ่นตะกั่วหนา 5 มิลลิเมตร

ก. การกำบังนิวตรอน

ตะกั่วมีมีค่าภาคตัดรวมของนิวตรอน Σ_t = 0.369 ซม.$^{-1}$

ความหนา x = 0.5 เซนติเมตร

แทนค่าในสมการที่ (ก.2) จะได้ค่าการทะลุผ่านของนิวตรอน ดังนี้

$$T = \exp(-0.369 \text{ cm}^{-1})(0.5 \text{ cm})$$

$$= 83 \%$$

ดังนั้น ตะกั่วหนา 5 มิลลิเมตร สามารถกั้นนิวตรอนได้ประมาณ 17 %

ข. การกำบังรังสีแกมมา

เมื่อนิวตรอนเข้าชนกับวัสดุที่ใช้งานแล้วเกิดอันตรกิริยา (n, γ) แล้วปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ ออกมา ในการทดลองนี้มีวัสดุที่ใช้งาน ได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็ก ทองแดง ทองเหลือง ตะกั่ว พาราฟิน โบรอนและแคดเมียม จะคิดพลังงานสูงสุดของรังสีแกมมาที่ 2 MeV เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้น

สำหรับพลังงาน 2 MeV ตะกั่วมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น μ 0.516 ซม. $^{-1}$

อัตราการทะลุผ่านของรังสีแกมมาเป็นดังนี้

$$T = \exp(-0.516\ cm^{-1})(0.5\ cm)$$

$$= 77\ \%$$

ดังนั้น ตะกั่วหนา 5 มิลลิเมตร สามารถกั้นรังสีแกมมาพลังงาน 2 MeV ได้ 23 %

รังสีแกมมาพลังงาน 2 MeV ไม่มีผลกับฟิล์มมาก เนื่องจากโอกาสที่รังสีแกมมาทำอันตรกิริยากับฟิล์มโดยตรงเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ จึงมีผลกระทบต่อฟิล์มน้อยมาก

ดังนั้นชุดกำบังรังสีแกมมาและนิวตรอนที่ได้ออกแบบไว้ สามารถกั้นลำนิวตรอนและรังสีแกมมาไม่ให้ทำปฏิกิริยากับฟิล์มในส่วนที่ไม่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาคผนวก ข

โปรแกรมคำสั่งการตัดความดำของรังสีแกมมาจากภาพถ่ายด้วยนิวตรอน

```
REM*********************************************************
REM                        $DYNAMIC              ********
REM    ********    GAMMA   SUBTRACTION      ********
REM*********************************************************
REM
DIM     NG0(50,300), G0(50,300), NG(50,300), G(50,300), N(50,300)
CLS
LOCATE 5,30: PRINT "Gamma   Subtraction"
LOCATE 10,10: INPUT "Neutron & Gamma without object   : ",NeuGam0$
LOCATE 11,10: INPUT "Gamma without object file name     : ", Gam0$
LOCATE 12,10: INPUT "Neutron & Gamma with object file name  : ", NeuGam$
LOCATE 13,10: INPUT "Gamma  with object file name : ", Gam$
LOCATE 14,10: INPUT "Target  file name   : ", target$
REM
REM**********************************
REM****          read data         ****
REM**********************************
REM
OPEN NeuGam0$ FOR INPUT AS #1
INPUT#1, name$
INPUT#1, NRAY
INPUT#1, NPRO
INPUT#1, PIXEL
INPUT#1, ANGLE
FOR i = 1 TO NPRO
        FOR j = 1 TO NRAY
```

```
                INPUT #1, A
                NG0(i, j) = A
        NEXT j
NEXT i
CLOSE #1
OPEN Gam0$ FOR INPUT AS #1
INPUT#1, name$
INPUT#1, NRAY
INPUT#1, NPRO
INPUT#1, PIXEL
INPUT#1, ANGLE
FOR i = 1 TO NPRO
        FOR j = 1 TO NRAY
                INPUT #1, A
                G0(i, j) = A
        NEXT j
NEXT i
CLOSE #1
OPEN NeuGam$ FOR INPUT AS #1
INPUT#1, name$
INPUT#1, NumRAY
INPUT#1, NumPRO
INPUT#1, PIXEL
INPUT#1, ANGLE
FOR i = 1 TO NumPRO
        FOR j = 1 TO NumRAY
                INPUT #1, A
                NG(i, j) = A
        NEXT j
NEXT i
CLOSE #1
```

```
OPEN Gam$ FOR INPUT AS #1
INPUT#1, name$
INPUT#1, NumRAY
INPUT#1, NumPRO
INPUT#1, PIXEL
INPUT#1, ANGLE
FOR i = 1 TO NumPRO
        FOR j = 1 TO NumRAY
                INPUT #1, A
                G(i, j) = A
        NEXT j
NEXT i
CLOSE #1

FOR i = 1 TO NPRO
        FOR j = 1 TO NRAY
                N(i, j) = LOG((NG0(i,j) – G0(i, j)) / (NG(i, j) - G(i, j)))
        NEXT j
NEXT i
OPEN target$ FOR OUTPUT AS #1
WRITE#1, target$
WRITE#1, NRAY
WRITE#1, NPRO
WRITE#1, PIXEL
WRITE#1, ANGLE
FOR i = 1 TO NPRO
        FOR j = 1 TO NRAY
                WRITE #1, N(i, j)
        NEXT j
NEXT i
CLOSE #1
```

ประวัติผู้วิจัย

นางเสมอใจ ศุภรเชาว์ สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อ พ.ศ.2527 รับราชการเป็นอาจารย์สอนฟิสิกส์ระดับมัธยมศึกษา สังกัดกรมสามัญศึกษา เมื่อ พ.ศ.2528-2533 ย้ายมาเป็นนักวิชาการมาตรฐาน ทดสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย สังกัดศูนย์ทดสอบ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ.2534-2542 และสังกัดส่วนรับรองห้องปฏิบัติการ 1 สำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติว่าด้วยการรับรองระบบงาน ตั้งแต่ พ.ศ. 2543 เข้าศึกษาในภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี เมื่อ พ.ศ. 2540