# บทที่3

# การทดลอง

## 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

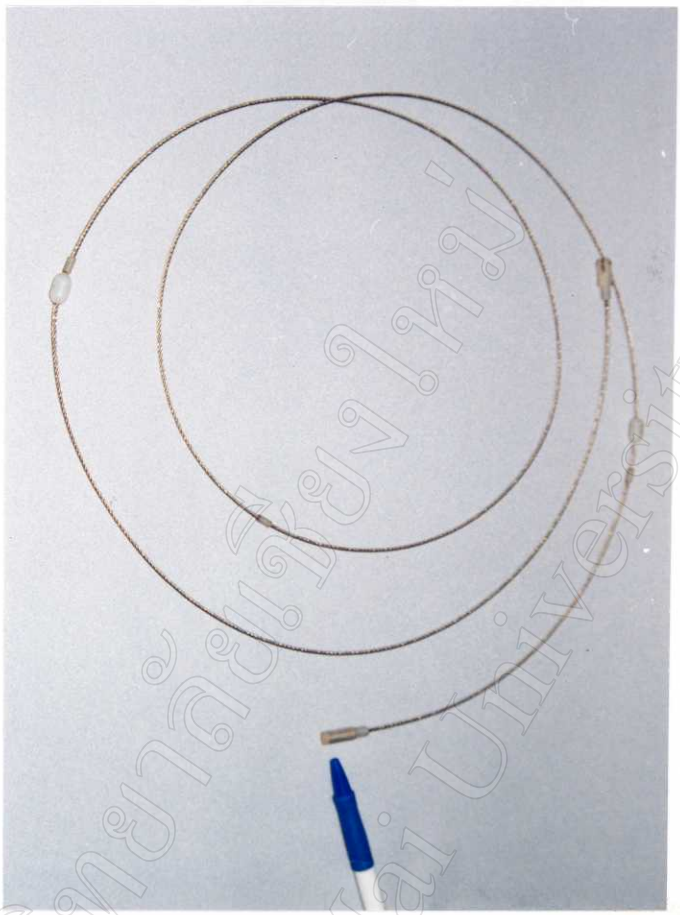
### 3.1.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอน

แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือไอโซโทปกัมมันตรังสี $^{252}Cf$ มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1 (Hoste,1988) มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร สูง 22 มิลลิเมตร มี $^{252}Cf$ 114.15 $\mu g$ ณ. วันที่ 5 มีนาคม 2542 มีลักษณะดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของแหล่งกำเนิดนิวตรอน $^{252}Cf$

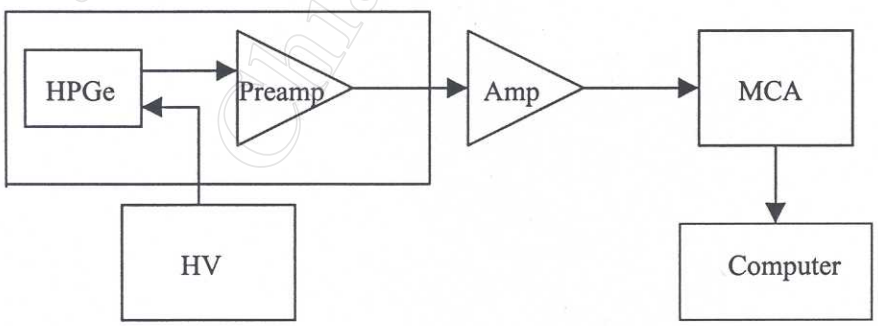
| | |
|---|---|
| Decay mode | |
| $\alpha$-emission | 96.9% |
| spontaneous fission | 3.1% |
| Half life | |
| $\alpha$-decay | 2.37 y |
| spontaneous fission | 85.5 y |
| effective | 2.63 y |
| neutron emission rate | $2.34 \times 10^{12}$ $n.s^{-1}.g^{-1}$ |
| neutron emission per fission | 3.75 n |
| average neutron energy | 2.14 MeV |

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University



รูปที่ 3.1 Dummy ของแหล่งกำเนิดนิวตรอน $^{252}Cf$

### 3.1.2 ระบบการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา




รูปที่ 3.2 แสดงระบบเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University

ในการวัดสเปกตรัมของแกมมา ซึ่งมีหลายระดับพลังงาน ที่ปล่อยออกมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสี ระบบการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา จำเป็นต้องจำแนกปริมาณรังสีแกมมาที่ระดับพลังงานค่าต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดีโดยระบบหัววัดสเปกตรัมของรังสีแกมมาประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

(ก) หัววัดรังสีแกมมา เป็นหัววัดสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ซึ่งผลิตจากผลึกเจอร์มาเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูงเรียกว่าหัววัด high purity germanium (HPGe) รุ่น 10175GEM ใช้แรงดันไฟฟ้าแบบไบแอสกลับ (reward bias) 3000 โวลต์ เมื่อมีรังสีแกมมาซึ่งมีพลังงานมากกว่าพลังงานแตกตัว (ionization energy) ของเจอร์มาเนียมซึ่งมีค่าประมาณ 3 eV ตกกระทบหัววัดอาจจะทำให้เกิดปฏิกิริยาแบบใดแบบหนึ่ง คือ photoelectric effect , compton effect , pair production หรือทั้งสามแบบ มีผลทำให้เกิด current pulse ขึ้นในหัววัด โดยระหว่างการใช้งานหัววัด HPGe จะต้องแช่อยู่ในไนโตรเจนเหลวซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 77 F เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่หัววัดใช้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูง

(ข) ภาคขยายส่วนหน้า เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งรับสัญญาณ current pulse ที่ปล่อยมาจากขั้วอาโนดของหัววัดรังสีแกมมา แล้วเปลี่ยนสัญญาณให้เป็นแบบ voltage pulse

(ค) ภาคขยายหลักเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งรับสัญญาณแบบ voltage pulse มาจาก preamplifier แล้วนำสัญญาณนั้นมาผ่านวงจร shaping ทำให้ได้สัญญาณที่มีแอมปริจูดที่ถูกต้องและมี pulse wide ที่แน่นอนและสัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังภาคขยายเพื่อทำการขยายสัญญาณให้มีแอมปริจูดสูงขึ้นรุ่น Ortec 673

(ง) เครื่องจ่ายไฟโวลต์เตจสูง ( high voltage power supply ) ทำหน้าที่ให้ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +3000 โวลต์ ให้แก่หัววัด HPGe รุ่น Canberra model 3105

(จ) เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง ( multichannel analyzer ) หรือ MCA เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งรับสัญญาณ voltage pulse มาจากภาคขยายหลัก และทำการวัดแอมปลิจูดของสัญญาณแต่ละสัญญาณแล้วทำการเปลี่ยนสัญญาณให้อยู่ในรูปของ channel address โดยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่องนี้ต่ออยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์ในรูปแบบของ computer card ผลิตโดยบริษัท Aptec nuclear ใช้ร่วมกับโปรแกรม Aptec

(ฉ) เครื่องคอมพิวเตอร์รุ่น 386 DX2 ทำหน้าที่เก็บข้อมูลผลการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา และแสดงผลการวัดทาง mornitor

**3.1.3 แผ่น detectors**

detectors เป็นโลหะบางเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สูงผลิตโดยบริษัท Goodfellow (i) ใช้สำหรับตรวจวัดปริมาณรังสีนิวตรอน โดยเทคนิคการก่อกัมมันต์ในแผ่นโลหะแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.2 แสดงความหนาและเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของแผ่นโลหะ

| Nuclide | Thickness (mm) | Purity (%) |
|---|---|---|
| Al | 1 | 99.00 |
| Ti | 1 | 99.6 |
| Fe | 1 | 99.5 |
| Ni | 1 | 99.99 |
| Co | 1 | 99.99 |
| In | 1 | 99.99 |

(i) Goodffellow Cambridge Limited
Cambridge Science Park
CAMBRIDGE, CB44DJ,England

ตารางที่ 3.3 แสดงมวลอะตอมของ Nuclide

| Nuclide | Atomic Mass (amu) |
|---|---|
| $^{27}Al$ | 26.981538 |
| $^{46}Ti$ | 45.952630 |
| $^{54}Fe$ | 53.939613 |
| $^{58}Ni$ | 57.935346 |
| $^{59}Co$ | 58.933198 |
| $^{115}In$ | 114.903876 |

**3.1.4 ไอโซโทปกัมมันตรังสีมาตรฐาน**

ไอโซโทปกัมมันตรังสีมาตรฐาน สำหรับใช้ในการสอบเทียบพลังงาน (energy calibration) และการหาค่าประสิทธิภาพ (absolute photo peak efficiency) ของหัววัดมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของไอโซโทปกัมมันตรังสีมาตรฐาน

| แหล่งที่ผลิต | ไอโซโทป | วัน/เดือน/ปี ที่ผลิต | ค่ากัมมันตภาพ (dps) |
|---|---|---|---|
| Burbank California USA | $^{22}Na$ | 01/08/88 | 3.99E+4 |
| | $^{60}Co$ | 01/04/88 | 3.94E+4 |
| | $^{133}Ba$ | 01/04/88 | 3.32E+4 |
| | $^{137}Cs$ | 01/04/88 | 3.57E+4 |
| | $^{241}Am$ | 01/04/88 | 4.12E+4 |
| IAEA Vienna Austria | $^{152}Eu$ | 01/07/84 | 3.93E+5 |

### 3.1.5 อุปกรณ์การทดลองอาบสารตัวอย่างในน้ำ

อุปกรณ์การทดลองอาบสารตัวอย่างในน้ำ มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนของ phantom และ sample holder มีรายละเอียดดังนี้

(ก) phantom ประกอบด้วยพลาสติกใสที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร มีความจุ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.2

(ข) sample holder ประกอบด้วยพลาสติกใสดังรูป 3.3 ส่วนขาตั้งมีความสูง 20 เซนติเมตร กว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร หลอดใส่สารรังสีมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.2 มิลลิเมตร มีความสูง 5 เซนติเมตร อุปกรณ์สำหรับติดแผ่น detectors มีรัศมี 2.9 , 5 และ 10.5 เซนติเมตร ตามลำดับ

รูปที่ 3.3 Phantom ขนาด 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

รูปที่ 3.4 Sample holder

**3.1.6 เครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล**

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อคำนวณหาสเปกตรัมของนิวตรอนอาศัย software ดังนี้

(ก) compiler ภาษา Fortran 77 บนระบบ Unix และเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

(ข) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

**3.2 วิธีดำเนินการทดลอง**

**3.2.1 การสอบเทียบพลังงานของระบบหัววัด HPGe (energy calibration)**

ทำการติดตั้งระบบการวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา ดังรูป 2.7 และ ทำการสอบเทียบพลังงานของระบบหัววัด HPGe เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีแกมมากับหมายเลขแชลแนล (channel number) ของ MCA โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีมาตรฐานได้แก่ $^{24}Na$ , $^{60}Co$, $^{137}Cs$ , $^{241}Am$ ได้ผลการสอบเทียบพลังงานดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงการสอบเทียบพลังงานของระบบหัววัดรังสีแกมมาแบบ HPGe

| Gamma source | $E_\gamma$ (keV) | Channel Number |
|---|---|---|
| $^{22}Na$ | 511.006 | 946.58 |
| | 1274.540 | 2415.91 |
| $^{60}Co$ | 1173.236 | 2220.66 |
| | 1332.501 | 2527.46 |
| $^{137}Cs$ | 661.645 | 1236.92 |
| $^{241}Am$ | 59.537 | 77.58 |

หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีแกมมาและ channel number จากข้อมูลในตารางที่ 3.5 โดยใช้สมการโพลิโนเมียลลำดับที่สอง ได้กราฟการสอบเทียบ พลังงานดังรูปที่ 3.5

$$Y = A + BX + CX^2 \qquad (3.1)$$

เมื่อ

X คือ channel number

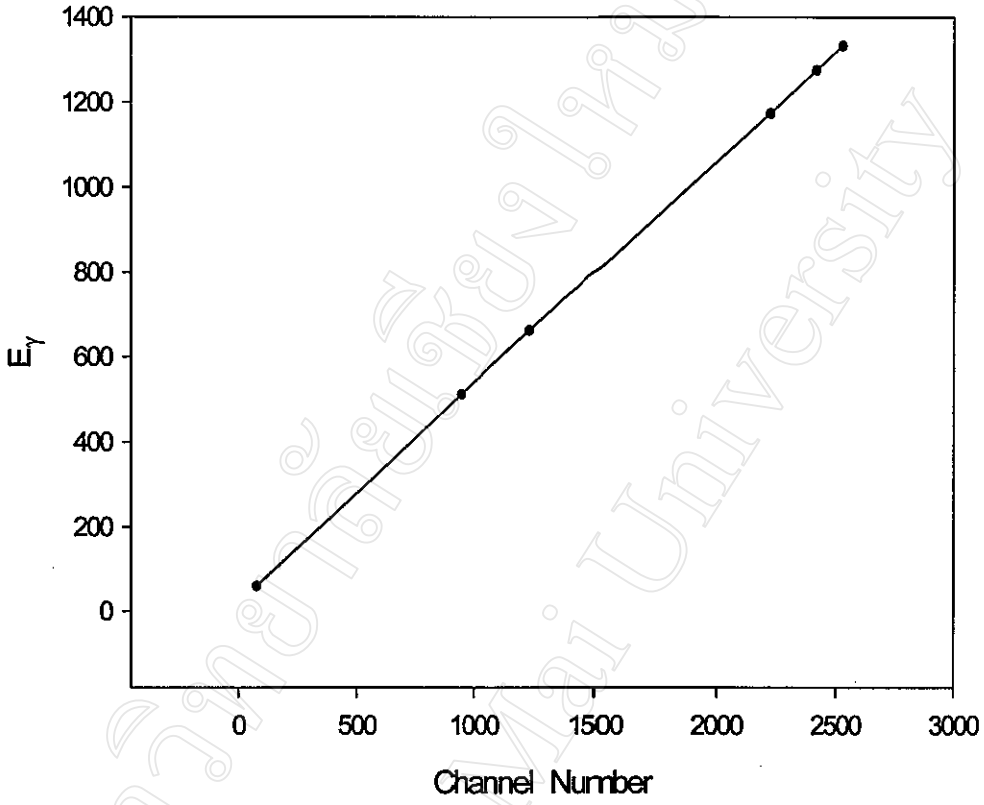
Y คือ พลังงานของรังสีแกมมา (keV)

ได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับสมการ (3.1) ดังนี้

A = 19.294

B = 0.518

C = 7.351E-7




รูปที่ 3.5 กราฟแสดงการสอบเทียบพลังงานของระบบหัววัด HPGe

**3.2.2 การหาค่าประสิทธิภาพ ของระบบหัววัด HPGe (absolute photo peak efficiency)**

ค่า ประสิทธิภาพของหัววัด คืออัตราส่วนของการวัดอัตราการสลายตัว ของสารกัมมันตรังสีโดยวัดจากจำนวนนับใน photo peak ต่ออัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ซึ่งสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของหัววัดได้จากสมการที่ (3.2)

$$\varepsilon\,(\%) = \frac{\text{peak area} \times 100}{I_g \times A} \qquad (3.2)$$

เมื่อ

ε คือค่า absolute photo peak efficiency ของหัววัด (%)

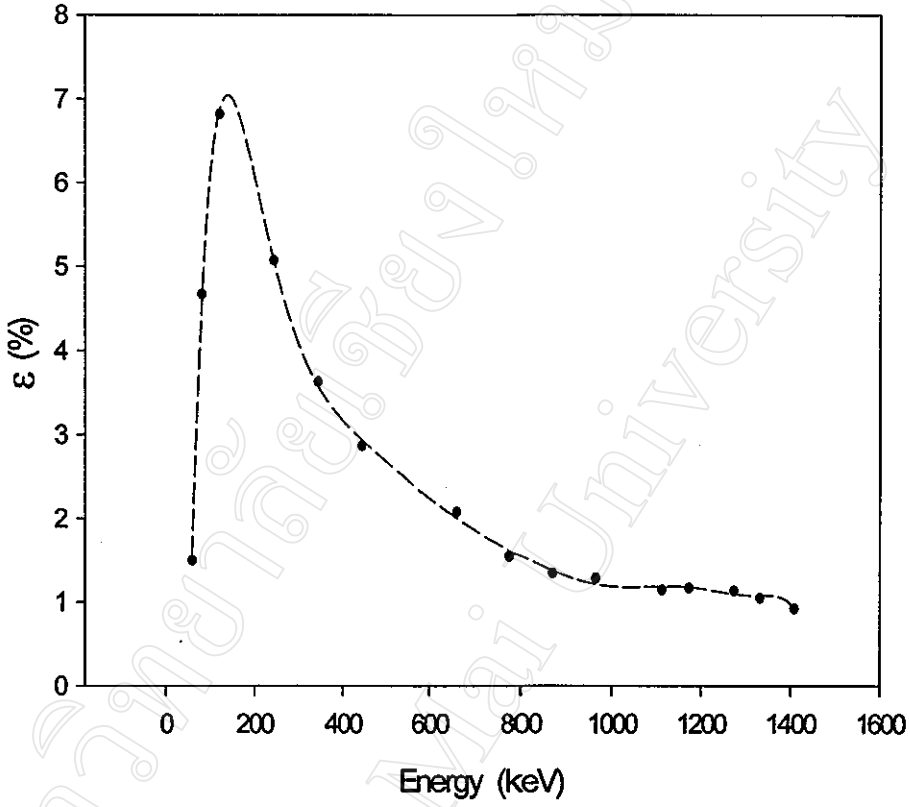
$I_g$ คือค่า gamma fraction (%)

A คือค่ากัมมันตภาพของสารกัมมันตรังสีมาตรฐาน (dis/sec)

ทำการทดลองเพื่อหาค่า ประสิทธิภาพของระบบหัววัด HPGe ที่ระยะห่างจากหัววัด 19.9 เซนติเมตร โดยใช้ไอโซโทป ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน $^{24}Na$ , $^{60}Co$ , $^{133}Ba$, $^{137}Cs$, $^{152}Eu$ , $^{241}Am$ ณ. วันที่ 30 มีนาคม 2542 แล้วนำค่าประสิทธิภาพที่ได้คูณกับสัดส่วนของรังสีแกมมาพลังงาน 661.64 keV ที่ระยะติดกับหัววัดต่อปริมาณรังสีแกมมาที่ระยะห่างจากหัววัด 19.9 เซนติเมตร ซึ่งมีค่า 43.6 ได้ผลการวัดค่าประสิทธิภาพดังตารางที่ 3.6 ได้กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพของหัววัดที่ระยะติดกับหัววัด HPGe ของรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.6

ตาราง 3.6 แสดงค่าประสิทธิภาพของหัววัด HPGe

| Gamma Source | $E_\gamma$ (keV) | $I_g$ (%) | $T_c$ (sec) | Peak area±error (%) (counts) | Peak efficiency (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| $^{22}Na$ | 1274.54 | 99.94 | 2000 | 1092±3.2 | 1.08 |
| $^{60}Co$ | 1173.23 | 99.89 | 1000 | 2356±2.9 | 1.17 |
| | 1332.50 | 99.98 | | 2116±2.9 | 1.08 |
| $^{133}Ba$ | 80.99 | 34.60 | 1000 | 5820±2.9 | 4.57 |
| $^{137}Cs$ | 661.64 | 85.21 | 1000 | 11166±0.9 | 1.99 |
| $^{152}Eu$ | 121.77 | 28.37 | 1000 | 81737±0.4 | 6.88 |
| | 244.69 | 7.51 | | 15997±1.2 | 5.07 |
| | 344.27 | 26.580 | | 40389±0.6 | 3.58 |
| | 443.98 | 3.151 | | 3771±2.6 | 2.93 |
| | 778.89 | 12.960 | | 8435±1.8 | 1.61 |
| | 867.38 | 4.160 | | 2291±3.0 | 1.37 |
| | 964.05 | 14.620 | | 8010±1.3 | 1.20 |
| | 1112.08 | 13.560 | | 6572±1.9 | 1.19 |
| $^{241}Am$ | 59.53 | 35.900 | 1000 | 4988±3.0 | 1.54 |




รูปที่ 3.6 แสดงประสิทธิภาพ (absolute photo peak efficiecy)
ที่ระยะติดกับหัววัด HPGe

**3.2.3 การหาพื้นที่ใต้ peak ของรังสีแกมมาโดยโปรแกรม Aptec**

โปรแกรม Aptec เป็นโปรแกรมที่ใช้ประกอบกับ MCA card โดยโปรแกรมจะแสดงค่า counts ที่ได้จากการวัดในรูปของสเปกตรัมของรังสีแกมมา โดยค่า net counts สำหรับรังสีแกมมาในช่วง ROI (roll region) ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าดังสมการที่ (3.3) (Aptec Nuclear Inc.,1989)

$$\text{net counts} = \text{gross counts} - \text{background counts} \qquad (3.3)$$

เมื่อ

gross counts คือค่า counts ทั้งหมดของรังสีแกมมาใน ROI

| | |
|---|---|
| background counts | คือค่า counts ทั้งหมดของรังสีแกมมาใต้ background line ใน ROI |
| net counts | คือค่า counts ที่เป็นผลต่างระหว่าง gross counts และ background counts |

ในโปรแกรม Aptec จะหา background line ได้จากการ fit สมการโพลิโนเมียลลำดับที่หนึ่ง ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ (3.4) ระหว่างค่า counts เฉลี่ยใน channel เริ่มต้นของ background คือ $A_{BL}$ และ ค่า counts เฉลี่ยใน channel สุดท้ายของ background คือ $A_{BH}$ เพื่อหาค่าคงที่ $B_0$ , $B_1$

$$xb_i = B_0 + B_i Ch_i \tag{3.4}$$

$$A_{BL} = \frac{\sum_{i=BL}^{BL+k} x_i}{k} \tag{3.5}$$

$$A_{BH} = \frac{\sum_{i=BH-K}^{BH} x_i}{k} \tag{3.6}$$

เมื่อ

| | |
|---|---|
| $x_i$ | คือค่า counts ในแต่ละ channel |
| $xb_i$ | คือค่า counts ของ background ในแต่ละ channel |
| BL | คือ start channel ของ background |
| BH | คือ stop channel ของ background |
| RL | คือ start channel ของ ROI |
| RH | คือ stop channel ของ ROI |
| k | คือจำนวน channel ที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ย |
| $A_{BL}$ | คือ ค่า counts เฉลี่ยของ start channel ของ background |
| $A_{BH}$ | คือ ค่า counts เฉลี่ยของstop channel ของ background |

โดยที่

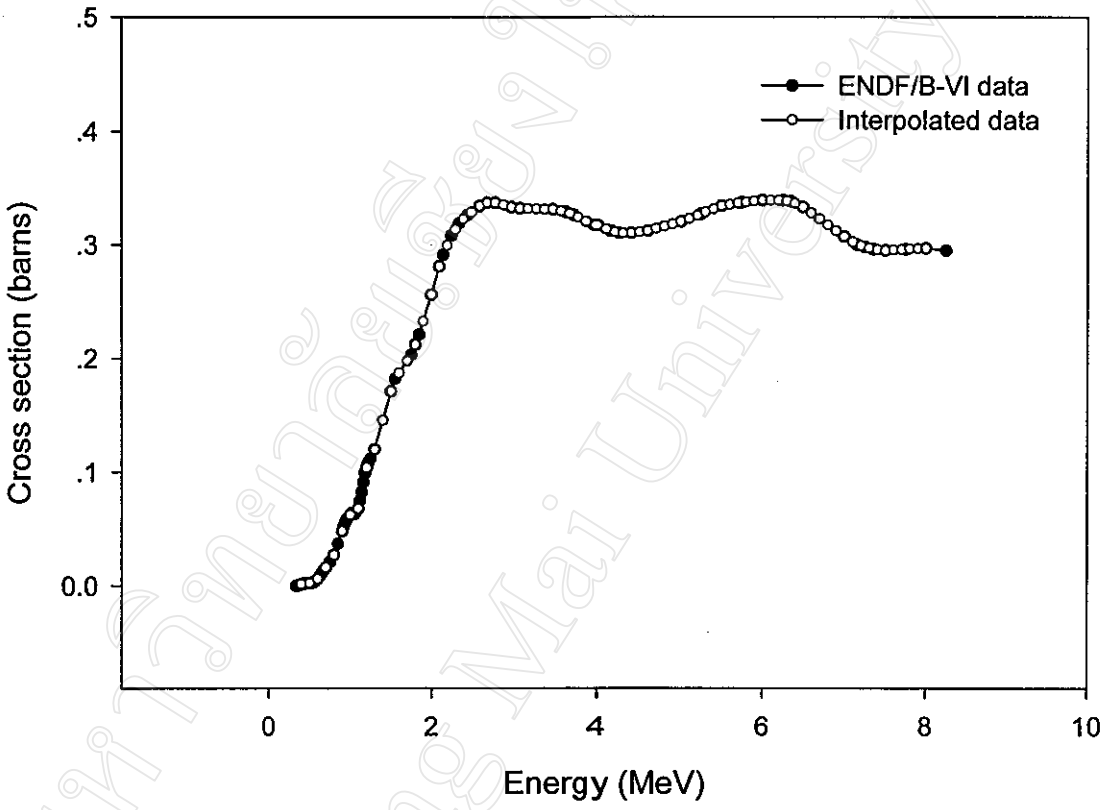
$$\text{background counts} = \sum_{i=RL}^{RH} xb_i \tag{3.7}$$

ดังนั้นพื้นที่ใต้ peak ที่ลบค่า background counts มีค่าดังสมการที่ (3.8)

$$\text{peak area} = \sum_{i=RL}^{RH} x_i - \sum_{i=RL}^{RH} xb_i \qquad (3.8)$$

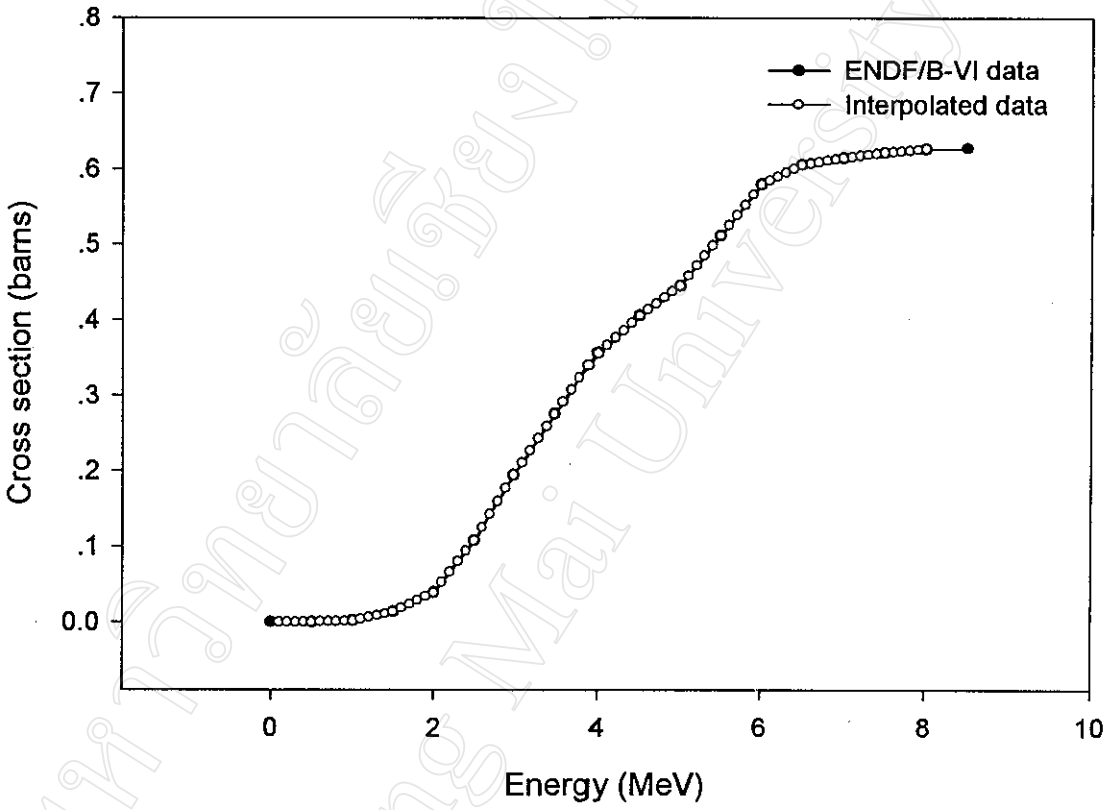
**3.2.4 การคัดเลือก threshold detectors และการจัดเตรียมข้อมูลค่า cross section**

ทำการคัดเลือก detectors และปฏิกิริยาที่เหมาะสม สำหรับใช้เป็น threshold detectors ในการวัดสเปกตรัมของรังสีนิวตรอน โดยเทคนิคการก่อกัมมันต์ใน detectors โดยใช้หลักการคัดเลือก detectors ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ2.8 และจัดหาข้อมูลค่า cross section ของการเกิดปฏิกิริยาที่เราเลือกใช้ให้สอดคล้องกับพลังงานของรังสีนิวตรอนทั้ง 77 ค่า โดยใช้โปรแกรม interpolation ดังรายละเอียดใน ผ.ก.2 ในการวิจัยนี้เลือกใช้ข้อมูลค่า cross section ของการเกิดปฏิกิริยาจาก ENDF/B - VI ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า cross section และพลังงาน ดังรูปที่ 3.7 ถึง 3.12 ดูรายละเอียดในภาคผนวก ผ.ก.3 ซึ่งข้อมูลค่า cross section ของการเกิดปฏิกิริยานี้เป็นข้อมูลที่ประกอบในการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II



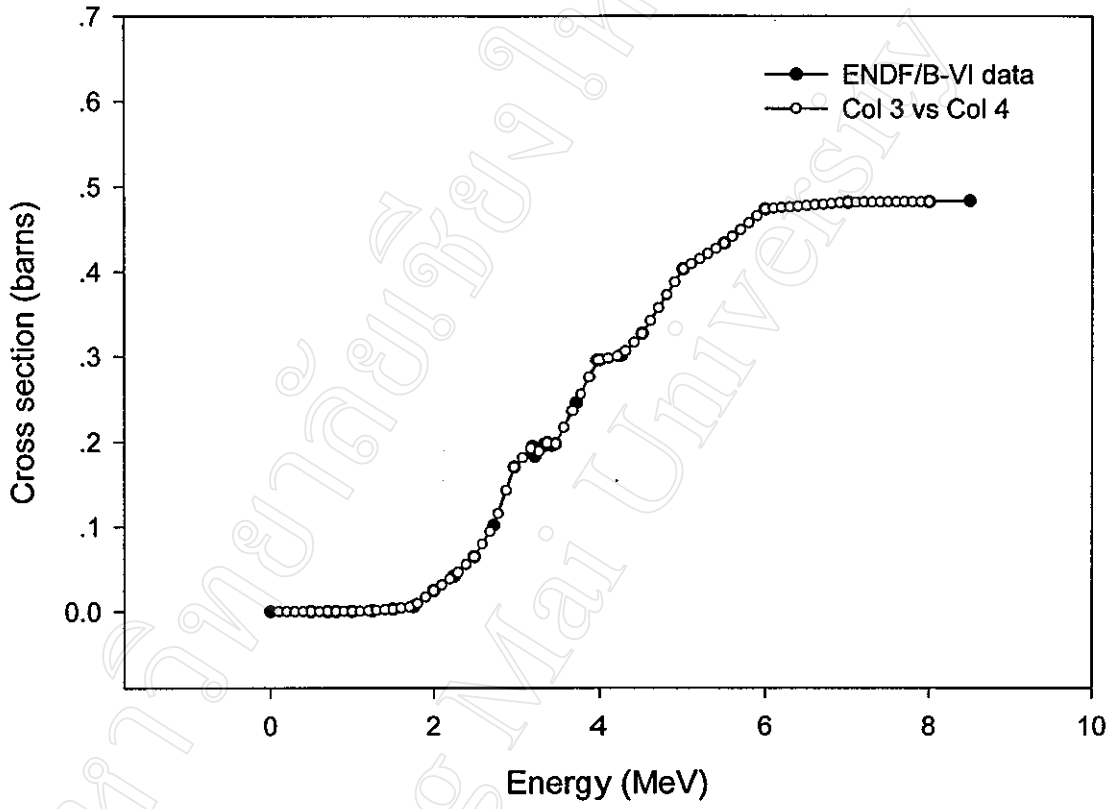

รูปที่ 3.7 แสดงค่า cross section ของปฏิกิริยา $^{115}In(n,n')^{115m}In$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University



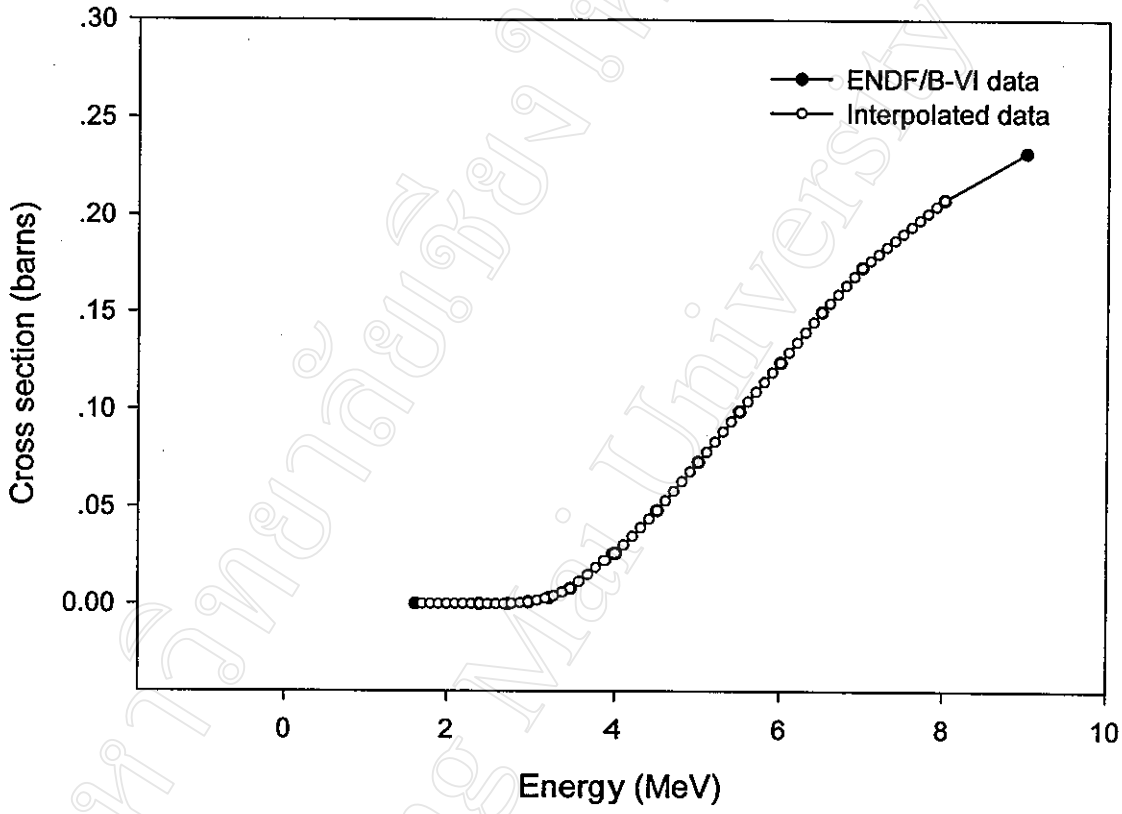

รูปที่ 3.8 แสดงค่า cross section ของปฏิกิริยา $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University



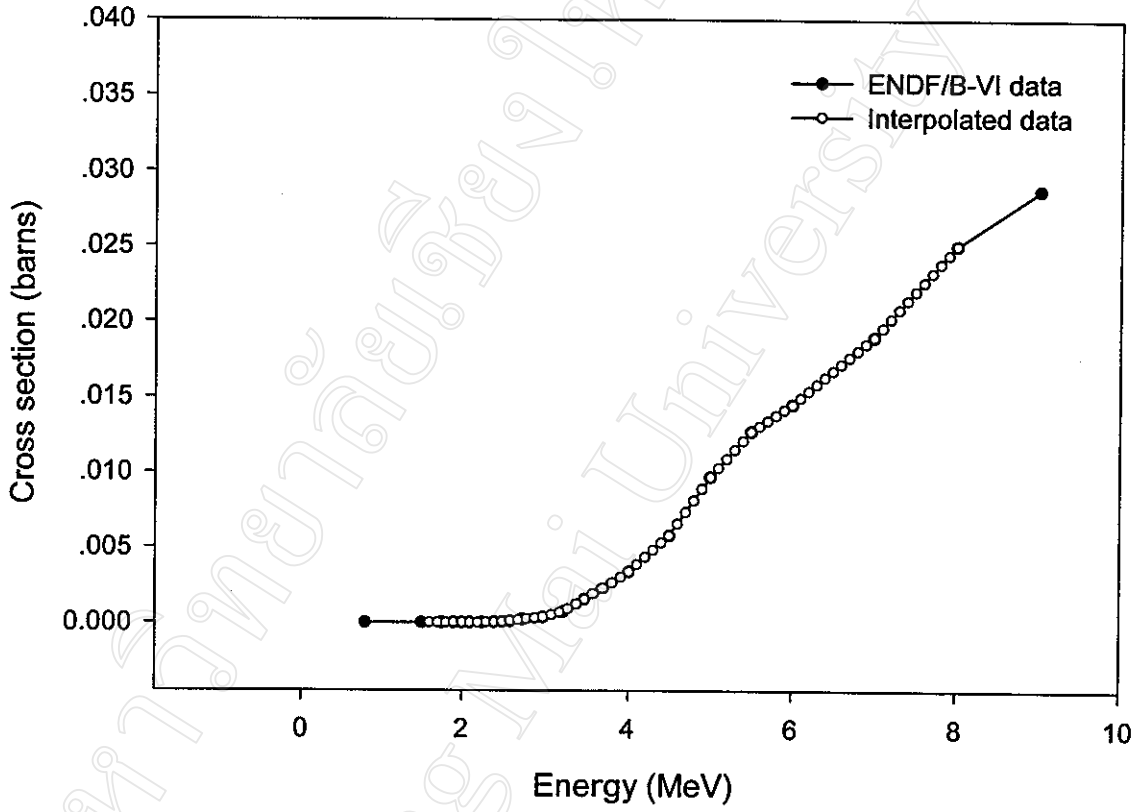

รูปที่ 3.9 แสดงค่า cross section ของปฏิกิริยา $^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University



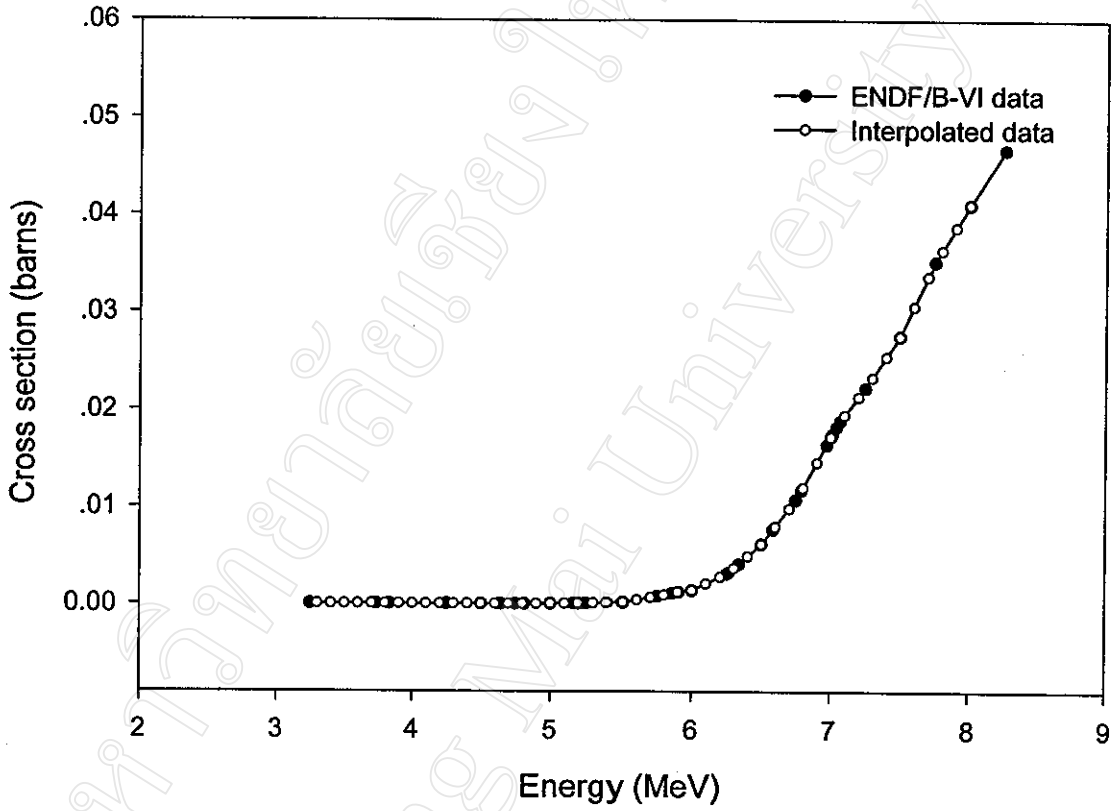

รูปที่ 3.10 แสดงค่า cross section ของปฏิกิริยา $^{46}Ti(n,p)^{46}Sc$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University




รูปที่ 3.11 แสดงค่า cross section ของปฏิกิริยา $^{59}Co(n,p)^{59}Fe$

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University




รูปที่ 3.12 แสดงค่า cross section ของปฏิกิริยา $^{27}Al(n,\alpha)^{24}Na$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

**3.2.5 การอาบแผ่น detectors**

การนำ detectors ไปอาบรังสีนิวตรอนนั้น จะต้องทำการจัดอุปกรณ์สำหรับแขวนสารตัวอย่าง ( sample holder ) ให้สามารถควบคุมให้ detectors อยู่ห่างจากไอโซโทปกัมมันตรังสี $^{252}Cf$ ในระยะทางที่เท่ากันในการวิจัยครั้งนี้ได้ออกแบบ sample holder ดังหัวข้อ 3.1.5 โดยในการอาบรังสีนิวตรอนของ detectors ครั้งแรกทำการอาบรังสีในตัวกลางอากาศ ที่ระยะห่างจาก $^{252}Cf$ 2.9 เซนติเมตร แล้วจึงทำการอาบแผ่น detectors ในตัวกลางน้ำที่ระยะห่างจาก $^{252}Cf$ เป็นระยะทาง 2.9 , 5 และ 10.9 เซนติเมตร โดยจัดวางชุดอุปกรณ์สำหรับแขวนสารตัวอย่างลงในน้ำ โดยให้ส่วนขาตั้งด้านซ้ายและด้านขวาห่างจากผนังของ phantom เป็นระยะทาง 10 เซนติเมตร ด้านหน้าและด้านหลังห่างจากผนัง phantom เป็นระยะทาง 22.5 เซนติเมตร จะทำให้ไอโซโทปกัมมันตรังสีอยู่ตรงกลางของ phantom นำน้ำใส่ใน phantom พลาสติก ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.3 โดยใช้ระดับน้ำที่ 40 เซนติเมตร วาง $^{252}Cf$ ลงในชุดอุปกรณ์สำหรับแขวนสารตัวอย่างในส่วนหลอดใส่สารกัมมันตรังสี

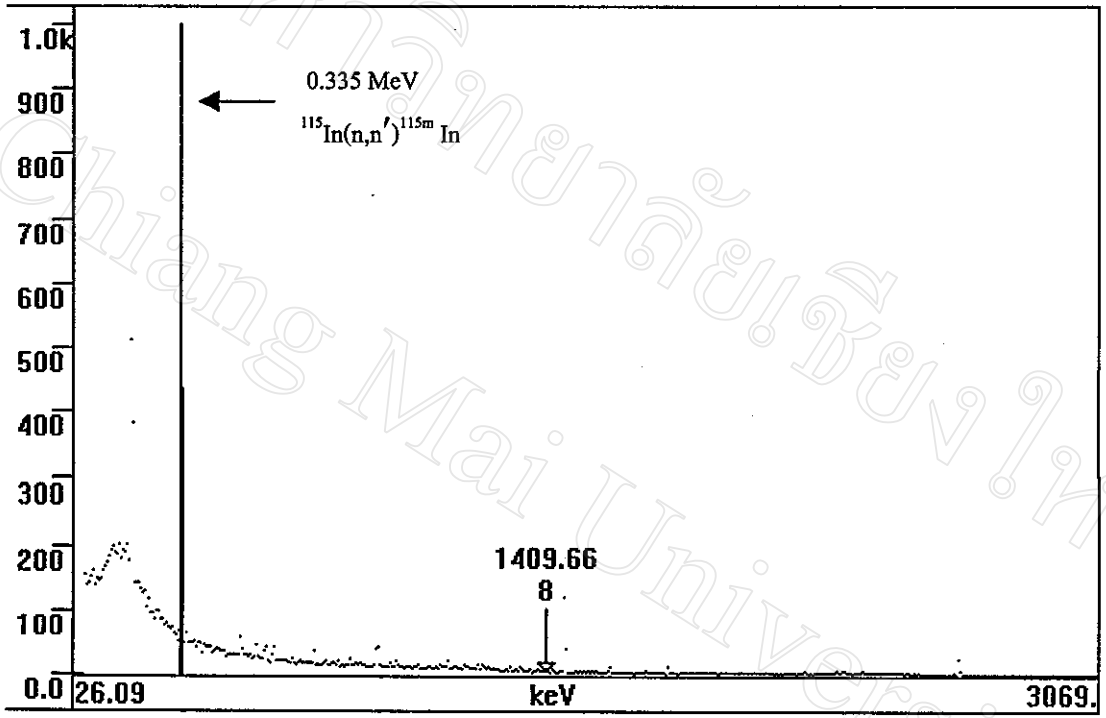
**3.3 การวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีแกมมา**

ทำการวัดรังสีแกมมาจาก detectors แต่ละชนิด โดยใช้หัววัด HPGe ซึ่ง detector แต่ละชนิดจะให้รังสีแกมมาซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาต่าง ๆ หลายค่าพลังงาน โดยโปรแกรม Aptec จะแสดงปริมาณของรังสีแกมมา ในรูปของสเปกตรัมของรังสีแกมมา สำหรับการวิจัยครั้งนี้สนใจวัดรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ ดังรายละเอียดในตารางที่ 3.7 ได้สเปกตรัมของรังสีแกมมาจากปฏิกิริยาที่สนใจดังตัวอย่างสเปกตรัมของรังสีแกมมาในรูปที่ 3.13 ถึง รูปที่ 3.18 แล้วทำการหาค่า counts ของรังสีแกมมาแต่ละค่าพลังงานเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณโดยโปรแกรม SAND II ต่อไป

ตารางที่ 3.7 แสดงรายละเอียดของปฏิกิริยานิวเคลียร์

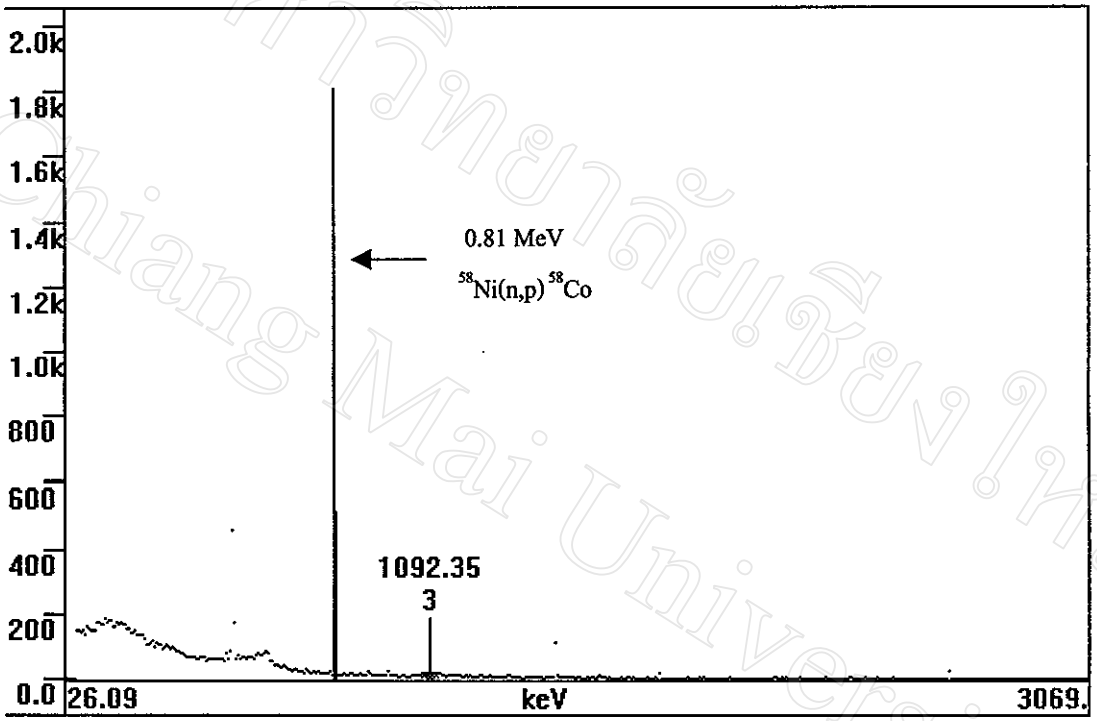
| Nuclear reaction | Isotope abundance (%) | $E_\gamma$ (MeV) | $T_{1/2}$ | Gamma fraction (%) | Efficiency (%) | $E_{Th}$ (MeV) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $^{115}In(n,n')^{115m}In$ | 95.7 | 0.335 | 4.4 h | 95.7 | 3.67 | 1.1 |
| $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$ | 68.3 | 0.81 | 71.4 d | 99 | 1.52 | 2.6 |
| $^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$ | 5.8 | 0.835 | 295.8 d | 100 | 1.45 | 3.1 |
| $^{46}Ti(n,p)^{46}Sc$ | 8 | 0.889 | 84 d | 100 | 1.32 | 7 |
| $^{59}Co(n,p)^{59}Fe$ | 100 | 1.292 | 45 d | 44 | 1.07 | 5 |
| $^{27}Al(n,\alpha)^{24}Na$ | 100 | 1.369 | 15 h | 100 | 1.06 | 8.8 |

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University



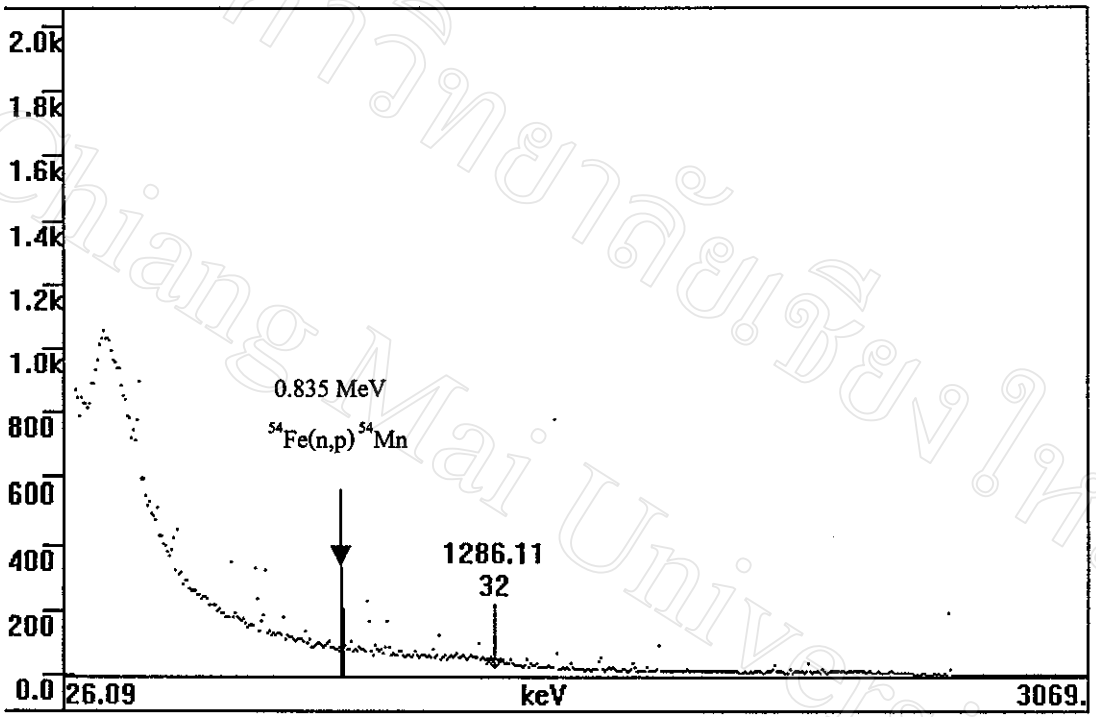

รูปที่ 3.13 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาจากปฏิกิริยา $^{115}In(n,n')^{115m}In$

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University



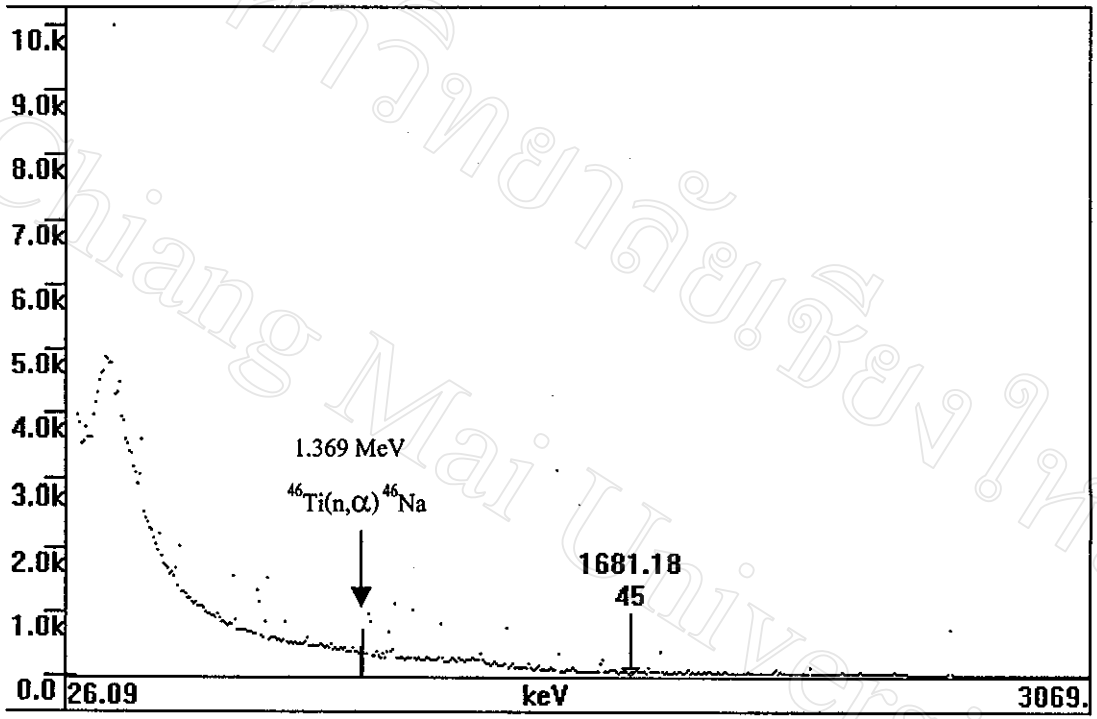

รูปที่ 3.14 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาจากปฏิกิริยา $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University



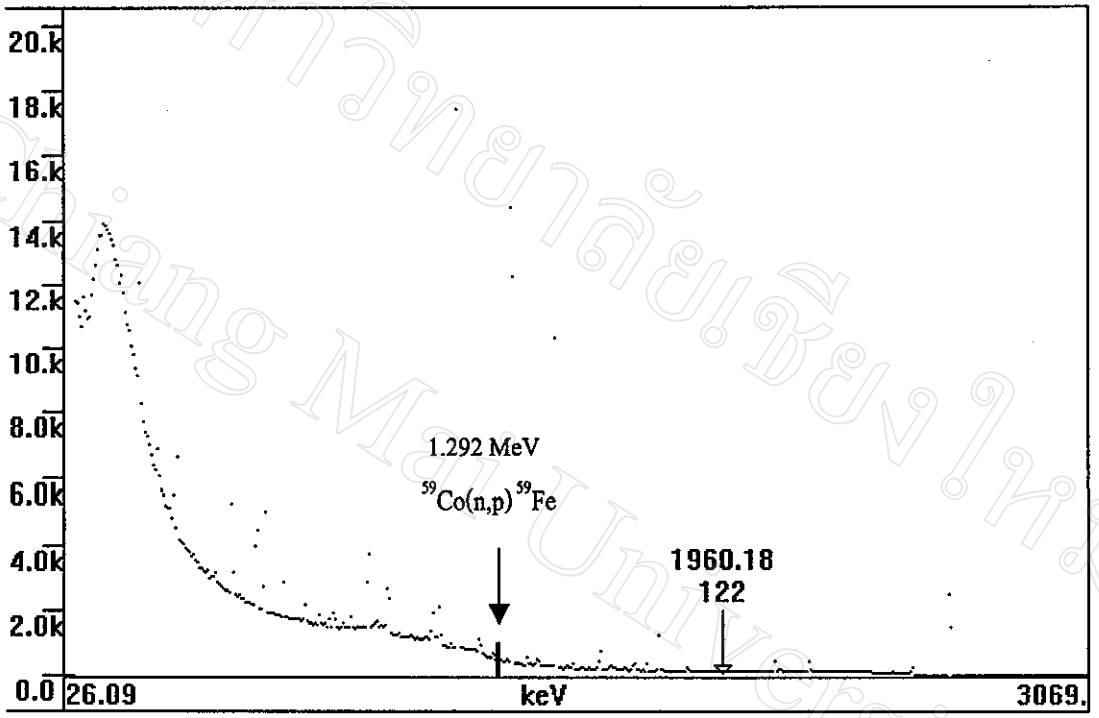

รูปที่ 3.15 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาจากปฏิกิริยา $^{54}Fe(n,p)^{54}Mn$

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University



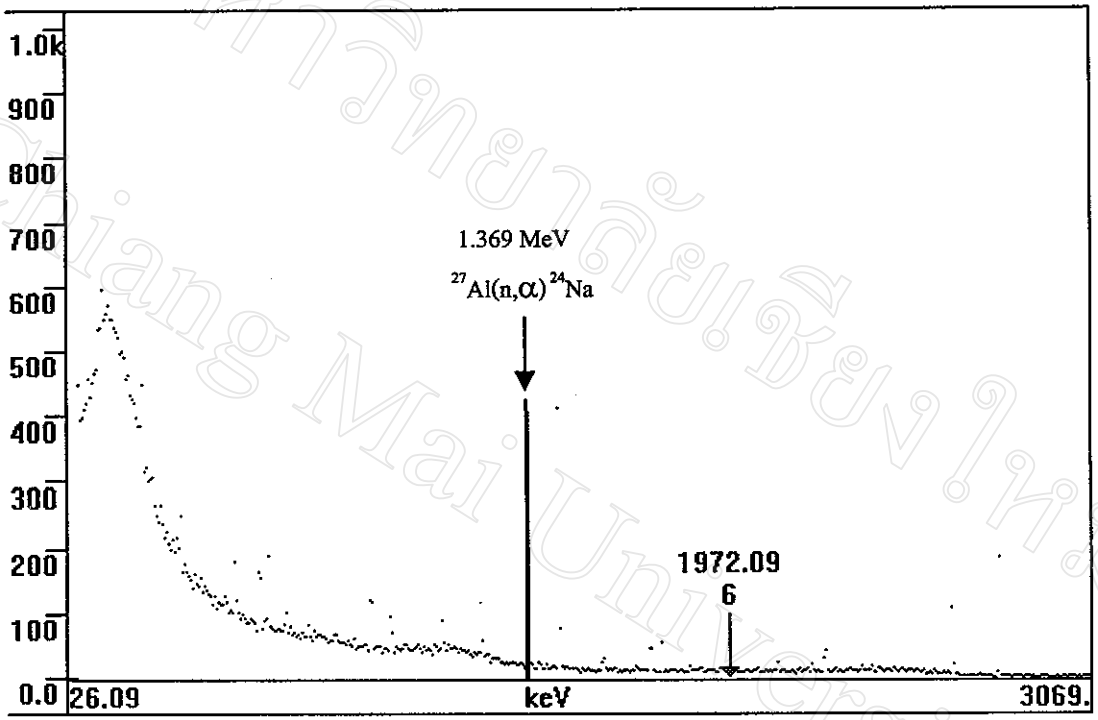

รูปที่ 3.16 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาจากปฏิกิริยา $^{46}Ti(n,p)^{46}Sc$

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University




รูปที่ 3.17 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาจากปฏิกิริยา $^{59}Co(n,p)^{59}Fe$

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University




รูปที่ 3.18 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาจากปฏิกิริยา $^{27}Al(n,\alpha)^{24}Na$

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

**3.4 การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลองหาสเปกตรัมของนิวตรอน โดยวิธีก่อกัมมันต์ในแผ่นโลหะ**

ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (experimental uncertainty) ของการหาสเปกตรัมของนิวตรอนโดยวิธีการก่อกัมมันต์ในแผ่นโลหะในครั้งนี้ประกอบด้วย

(ก) ค่าความคลาดเคลื่อนของการนับเชิงสถิติ (counting statistical uncertainty)

(ข) ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (systematic uncertainty)

**3.4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของการนับเชิงสถิติ**

ค่าความคลาดเคลื่อนของการนับเชิงสถิติ เป็นค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการนับปริมาณรังสีแกมมาแต่ละค่าพลังงาน โดยถ้าให้ปริมาณรังสีแกมมาที่แท้จริงมีค่าดังสมการที่ (3.3 ) ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติของการวัดปริมาณรังสีแกมมาที่แท้จริง ในแต่ละพลังงาน $\sigma_{net}$ มีค่าดังสมการที่ (3.9 )

$$\sigma^2_{net} = \sigma^2_{gross} + \sigma^2_{backg} \qquad (3.9)$$

ในการทดลองครั้งนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติในการวัดรังสีแกมมาจากการทดลองที่ระยะต่าง ๆ โดยโปรแกรม Aptec เป็นดังนี้

(ก) ในตัวกลางอากาศห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 2.9 เซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนของการนับเชิงสถิติที่ประเมินได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง ±1.4 ถึง ±6.3 เปอร์เซ็นต์ จากปฏิกิริยา $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$ และ $^{46}Ti(n,p)^{46}Sc$ ตามลำดับ

(ข) ในตัวกลางน้ำ ห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 2.9 เซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนของการนับเชิงสถิติที่ประเมินได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง ±1.9 ถึง ±7.9 เปอร์เซ็นต์ จากปฏิกิริยา $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$ และ $^{46}Ti(n,p)^{46}Sc$ ตามลำดับ

(ค) ในตัวกลางน้ำ ห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 5 เซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนของการนับเชิงสถิติที่ประเมินได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง ±2.1 ถึง ±10.0 เปอร์เซ็นต์ จากปฏิกิริยา $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$ และ $^{46}Ti(n,p)^{46}Sc$ ตามลำดับ

(ง) ในตัวกลางน้ำ ห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 10.5 เซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนของการนับเชิงสถิติที่ประเมินได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง ±2.8 ถึง ±14.6 เปอร์เซ็นต์ จากปฏิกิริยา $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$ และ $^{46}Ti(n,p)^{46}Sc$ ตามลำดับ

**3.4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ**

ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบประกอบด้วยหลายสาเหตุพอที่จะสรุปได้ดังนี้

(ก) ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจาก การทดลองหาค่าประสิทธิภาพของหัววัด HPGe พบว่ามีความคลาดเคลื่อน ±3 เนื่องจากการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 867.3 keV จากธาตุ $^{152}$Eu

(ข) ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า cross section ที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งประเมินค่าความคลาดเคลื่อนไว้ประมาณ ±10 เปอร์เซ็นต์ (McElroy,1977)

(ค) ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตำแหน่งการวาง detectorsรอบแหล่งกำเนิดนิวตรอนประเมินไว้ที่ ±0.1 มิลลิเมตร ในอากาศการลดลงเป็นตามกฎกำลังสองผกผันจะประเมินความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตำแหน่งได้ประมาณ ±7 เปอร์เซ็นต์ และถ้าประเมินว่าการเปลี่ยนแปลงของ neutron flux ในน้ำใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของ dose จะประเมินความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตำแหน่ง ในตัวกลางน้ำที่ระยะห่าง 2.9 , 5 และ 10.5 เซนติเมตร เป็น ±8 , ±5 และ ±3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

(ง) ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการสลายตัวของ $^{252}$Cf ในระหว่างการอาบแผ่น detectors ประเมินไว้ที่ ±0.5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการการทดลองที่ระยะห่างจาก $^{252}$Cf 2.9 เซนติเมตร ในอากาศ และ ±0.57 , ±0.7 และ ±1.2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการการทดลองที่ระยะห่างจาก $^{252}$Cf 2.9 , 5 และ 10.5 เซนติเมตร ในตัวกลางน้ำตามลำดับ

ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนรวมของค่า saturated activity สำหรับการทดลองหาสเปกตรัมของนิวตรอนโดยการใช้เทคนิคการก่อกัมมันต์ในแผ่นโลหะ ในครั้งนี้มีคำนวณได้จากสมการที่ (3.7)

$$\sigma^2_{exp}(\%) = \sigma^2_{sta}(\%) + \sum_i \sigma^2_{sys}(\%) \qquad (3.10)$$

เมื่อ

$\sigma^2_{exp}(\%)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองหาค่า saturated activity

$\sigma^2_{sta}(\%)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของการนับเชิงสถิติ

$\sigma^2_{sys}(\%)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ