

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

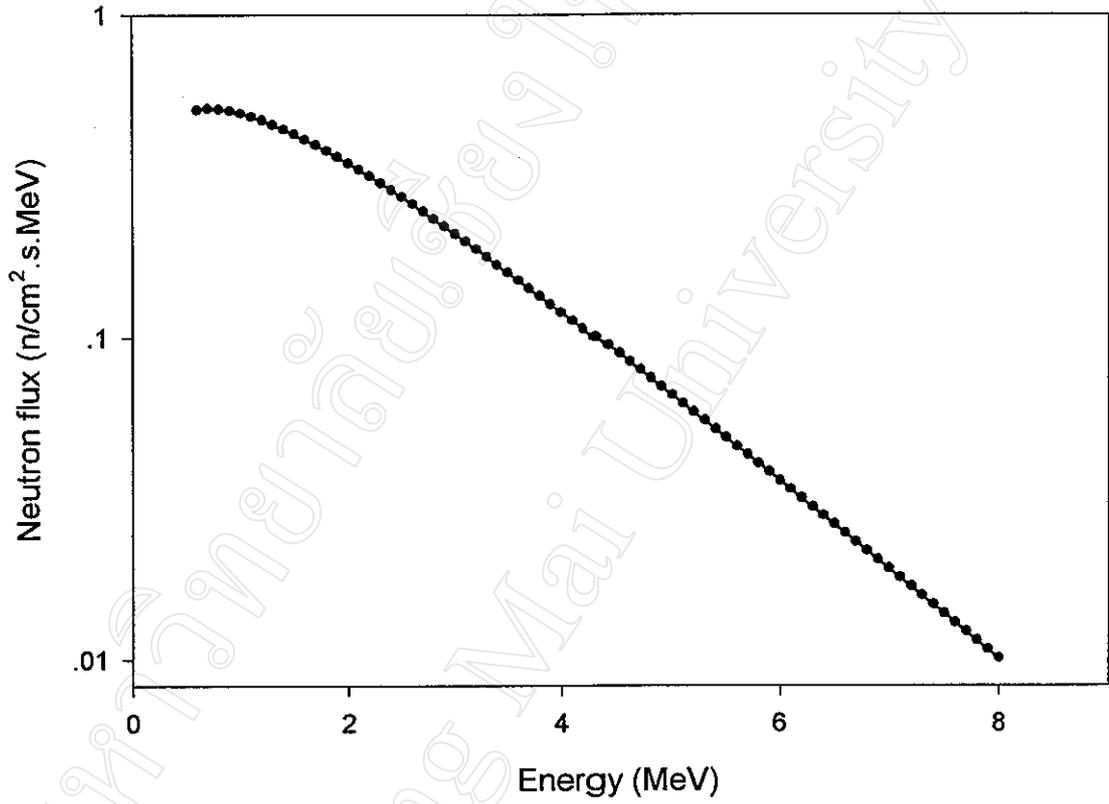
ในการทดลองเพื่อหาสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจากไอโซโทป  $^{252}\text{Cf}$  โดยวิธีการก่อกัมมันต์ในแผ่นโลหะและทำการคำนวณหาค่า saturated activity จากการคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II สำหรับการทดลองในอากาศ จะทำการหาสเปกตรัมของนิวตรอนในช่วงพลังงานของนิวตรอน 0.6 MeV ถึง 8 MeV โดยทำการแบ่งช่วงพลังงานของรังสีนิวตรอนเป็น 75 ช่วงพลังงาน สำหรับการทดลองในตัวกลางน้ำ จะทำการหาสเปกตรัมของนิวตรอนในช่วงพลังงานของรังสีนิวตรอน 0.4 MeV ถึง 8 MeV โดยแบ่งช่วงพลังงานเป็น 77 ช่วงพลังงาน โดยแต่ละช่วงพลังงานจะมีค่าพลังงานต่างกัน 0.1 MeV และพิจารณาใช้สเปกตรัมเริ่มแรกในการคำนวณแบบ Maxwellian ซึ่งมีค่า Maxwellian temperature parameter เป็น 1.42 MeV ซึ่งเป็นสเปกตรัมเริ่มแรกที่มีลักษณะใกล้เคียงกับสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจาก  $^{252}\text{Cf}$  ดังรูปที่ 4.1 เลือกใช้ ค่า cross section จากเพิ่มข้อมูล ENDF/B-VI ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงแล้วทำการ interpolated ข้อมูลค่า cross section ในแต่ละปฏิกิริยาให้สอดคล้องในค่าพลังงานที่กำหนดเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดี สำหรับการหาค่า correction factor เนื่องจากความแตกต่างของมุมต้นระหว่าง point source ที่ใช้ในการหาค่า absolute photo peak efficiency ของหัววัด และแผ่น detectors ซึ่งมีขนาด 1.2 ตารางเซนติเมตร จากการคำนวณโดยโปรแกรม SAMC (Srinoi,1999) พบว่าค่า correction factor ของมุมต้น  $K_{\Omega}$  มีค่าเท่ากับ 0.997

#### 4.1 ผลการทดลองการวิเคราะห์หาสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจากธาตุ $^{252}\text{Cf}$

##### 4.1.1 ผลการทดลองการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนในอากาศ

ที่ระยะห่างจาก  $^{252}\text{Cf}$  2.9 เซนติเมตร

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนในตัวกลางอากาศ ในครั้งนี้ได้ใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ จำนวน 4 ปฏิกิริยา โดยทำการอบรังสีที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน 2.9 เซนติเมตรในวันที่ 2 กันยายน 2542 ใช้เวลาในการอบรังสี 10,136 นาที ผลที่ได้จากการทดลองและผลจากการคำนวณแบบ iteration จำนวน 6 รอบ แสดงในตารางที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการทดลองใน ผ.ข.3.1 ได้สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจากการคำนวณดังรูป 4.2 รายละเอียดเพิ่มเติมในตารางที่ ผ.ค.1



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมแบบ Maxwellian มีค่า

Maxwellian temperature 1.42 MeV

ตารางที่ 4.1 แสดงผลจากการทดลองและผลการคำนวณค่า saturated activity จากการอาบแผ่นโลหะ

ในตัวกลางอากาศที่ระยะห่าง 2.9 เซนติเมตร จากแหล่งกำเนิดนิวตรอน  $^{252}\text{Cf}$

Nuclear reaction	$E_\gamma$ (MeV)	Photo peak area $\pm$ %error (counts)	$T_c$ (min)	$T_d$ (min)	Mass (g)	Measured activity (dis/sec)	Error (%) of measured activity	Calculated activity (dis/sec)	E/C ratio
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	0.81	5566 $\pm$ 1.4	25	538	2.77	1.91E-19	12.65	1.91E-19	0.99
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	0.889	1313 $\pm$ 6.3	1000	1515	1.53	1.97E-20	14.06	2.07E-20	0.95
$^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$	1.292	1818 $\pm$ 6.1	3000	5479	0.77	2.83E-21	13.97	2.66E-21	1.06
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	1.369	1557 $\pm$ 2.9	116	355	0.86	1.47E-21	12.91	1.48E-21	0.99

#### 4.1.2 ผลการทดลองการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนในน้ำที่ระยะห่างจาก $^{252}\text{Cf}$ 2.9 เซนติเมตร

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนในตัวกลางน้ำครั้งนี้ ใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ จำนวน 5 ปฏิกิริยา โดยทำการอาบรังสีที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน 2.9 เซนติเมตร ในวันที่ 21 กันยายน 2542 ใช้เวลาในการอาบรังสี 10,136 นาที ผลที่ได้จากการทดลองและผลจากการคำนวณแบบ iteration จำนวน 6 รอบ แสดงในตารางที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการทดลองใน ผ.จ.3.2 ได้สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจากการคำนวณดังรูป 4.3 รายละเอียดเพิ่มเติมในตารางที่ ผ.ค.1.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลจากการทดลองและผลการคำนวณค่า saturated activity จากกราฟแบบเส้นโค้ง

ในตัวกลางน้ำที่ระยะห่าง 2.9 เซนติเมตร จากแหล่งกำเนิดนิวตรอน  $^{252}\text{Cf}$

Nuclear reaction	$E_\gamma$ (MeV)	Photo peak area $\pm$ %error (counts)	$T_c$ (min)	$T_d$ (min)	Mass (g)	Measured activity (dis/sec)	Error (%) of measured activity	Calculated activity (dis/sec)	E/C ratio
$^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$	0.335	$3859 \pm 2.2$	50	1426	2.29	$2.66\text{E}-19$	13.39	$2.63\text{E}-19$	1.01
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	0.81	$2997 \pm 1.9$	16	1505	2.71	$1.39\text{E}-19$	13.35	$1.48\text{E}-19$	0.94
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	0.835	$3063 \pm 3.2$	1000	17405	2.51	$1.20\text{E}-19$	13.60	$1.12\text{E}-19$	1.07
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	0.889	$1643 \pm 7.9$	1418	5585	1.51	$1.50\text{E}-20$	15.38	$1.54\text{E}-21$	0.98
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	1.369	$1282 \pm 3.5$	120	308	0.87	$1.15\text{E}-21$	13.66	$1.14\text{E}-21$	1.01

#### 4.1.3 ผลการทดลองการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนในน้ำที่ระยะห่างจาก $^{252}\text{Cf}$ 5 เซนติเมตร

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีนิวตรอน ในตัวกลางน้ำครั้งนี้ใช้ปฏิกริยานิวเคลียร์ จำนวน 5 ปฏิกริยา โดยทำการอบรังสีที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน 5 เซนติเมตร ใน วันที่ 8 ตุลาคม 2542 ใช้เวลาในการอบรังสี 15,699 นาที ผลที่ได้จากการทดลองและผลจากการคำนวณแบบ iteration จำนวน 6 รอบ แสดงในตารางที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการทดลองใน พ.จ.3.3 ได้สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจากการคำนวณดังรูป 4.4 ूरายละเอียดเพิ่มเติมในตารางที่ ผ.ค.1.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลจากการทดลองและผลการคำนวณค่า saturated activity จากกราฟอานแมนโลหะ  
 ในตัวกลางน้ำที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร จากแหล่งกำเนิดนิวตรอน  $^{252}\text{Cf}$

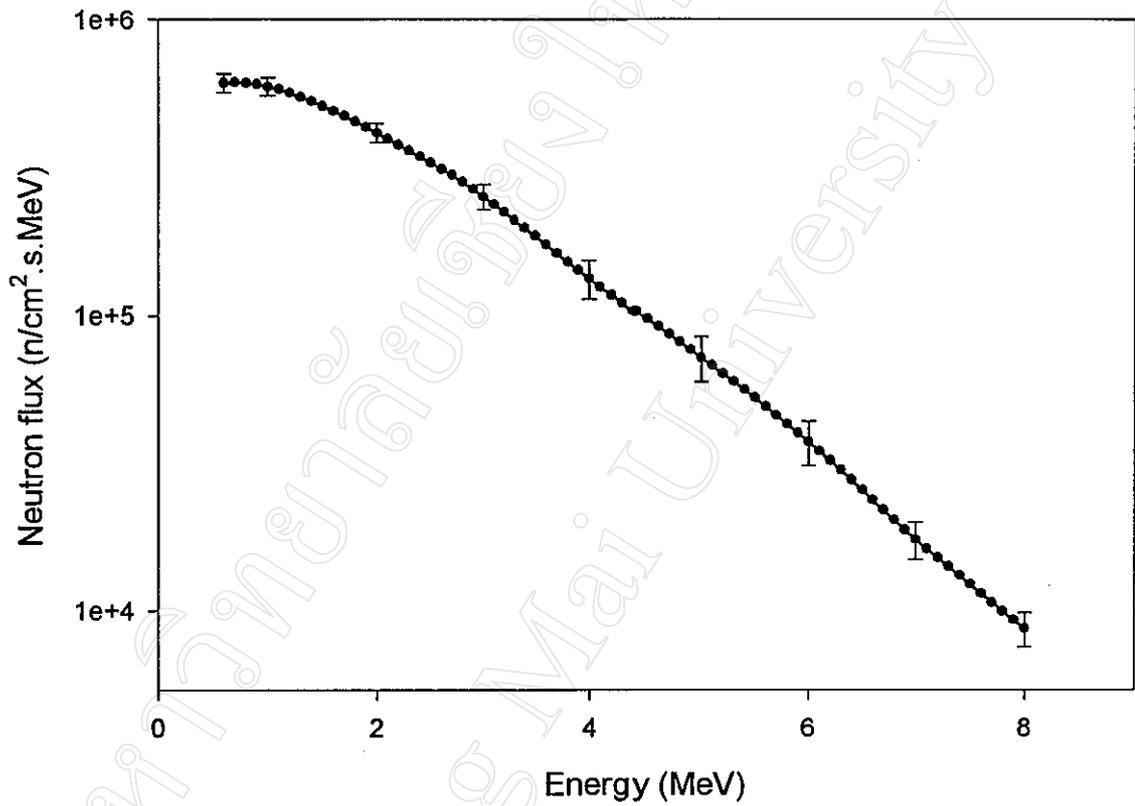
Nuclear reaction	$E_\gamma$ (MeV)	Photo peak area $\pm$ %error (counts)	$T_c$ (min)	$T_d$ (min)	Mass (g)	Measured activity (dis/sec)	Error (%) of measured activity	Calculated activity (dis/sec)	E/C ratio
$^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$	0.335	4516 $\pm$ 1.7	33	718	2.20	7.70E-20	11.70	7.62E-20	1.00
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	0.81	2493 $\pm$ 2.2	33	4097	2.78	4.30E-20	11.77	4.41E-20	0.97
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	0.835	2013 $\pm$ 6.1	1666	5584	2.56	3.38E-20	13.08	3.35E-20	1.00
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	0.889	1222 $\pm$ 10.0	2714	7688	1.41	4.71E-21	15.30	4.67E-21	1.00
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	1.369	689 $\pm$ 5.4	266	414	0.87	3.18E-22	12.78	3.19E-22	0.99

#### 4.1.4 ผลการทดลองการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนในน้ำที่ระยะห่างจาก $^{252}\text{Cf}$ 10.5 เซนติเมตร

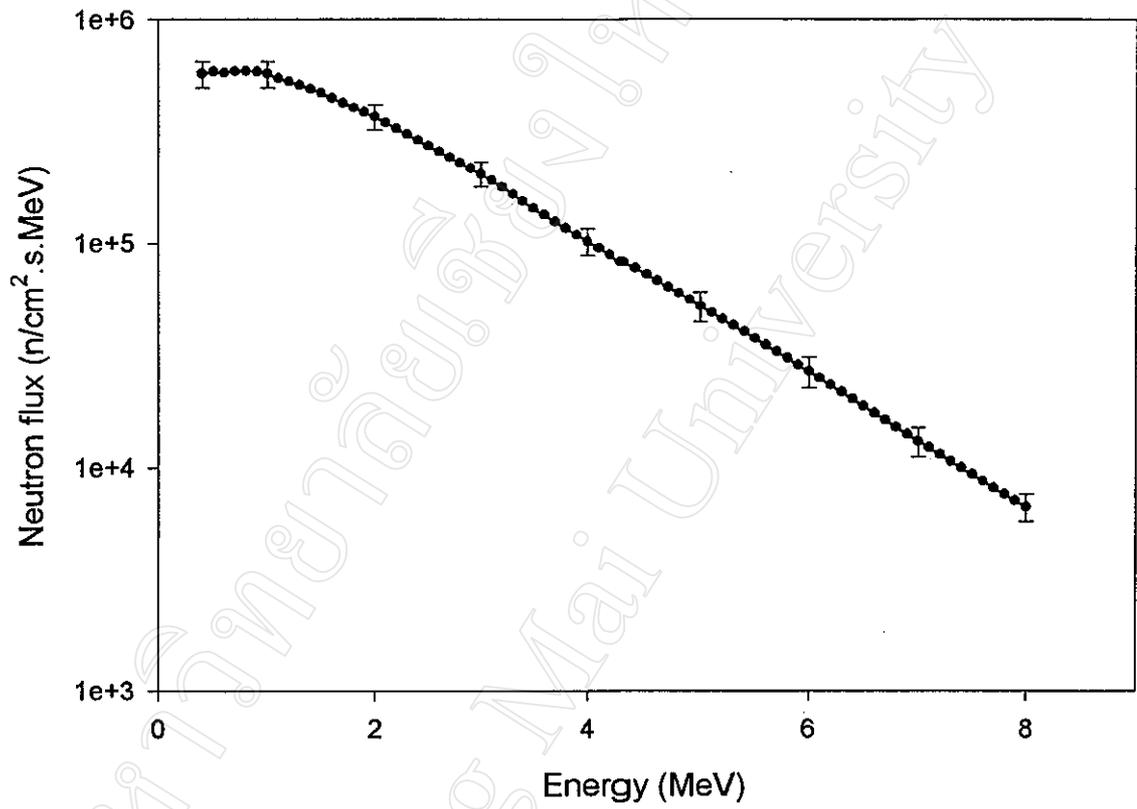
ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีนิวตรอน ในตัวกลางน้ำครั้งนี้ใช้ปฏิกิริยานิวเคลียร์ จำนวน 5 ปฏิกิริยา โดยทำการอบรังสีที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีนิวตรอน 10.5 เซนติเมตร ในวันที่ 8 พฤศจิกายน 2542 ใช้เวลาในการอบรังสี 244,448 นาที ผลที่ได้จากการทดลองและผลจากการคำนวณแบบ iteration จำนวน 3 รอบ แสดงในตารางที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการทดลองใน ผ.ง.3.4 ได้สเปกตรัมของรังสีนิวตรอน จากการคำนวณดังรูป 4.5 ดูรายละเอียดเพิ่มเติมในตารางที่ ผ.ค.1.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลจากการทดลองและผลการคำนวณค่า saturated activity จากกราฟอับสแอนด์โกท  
 ในตัวกลางน้ำที่ระยะห่าง 10.5 เซนติเมตร จากแหล่งกำเนิดนิวตรอน  $^{252}\text{Cf}$

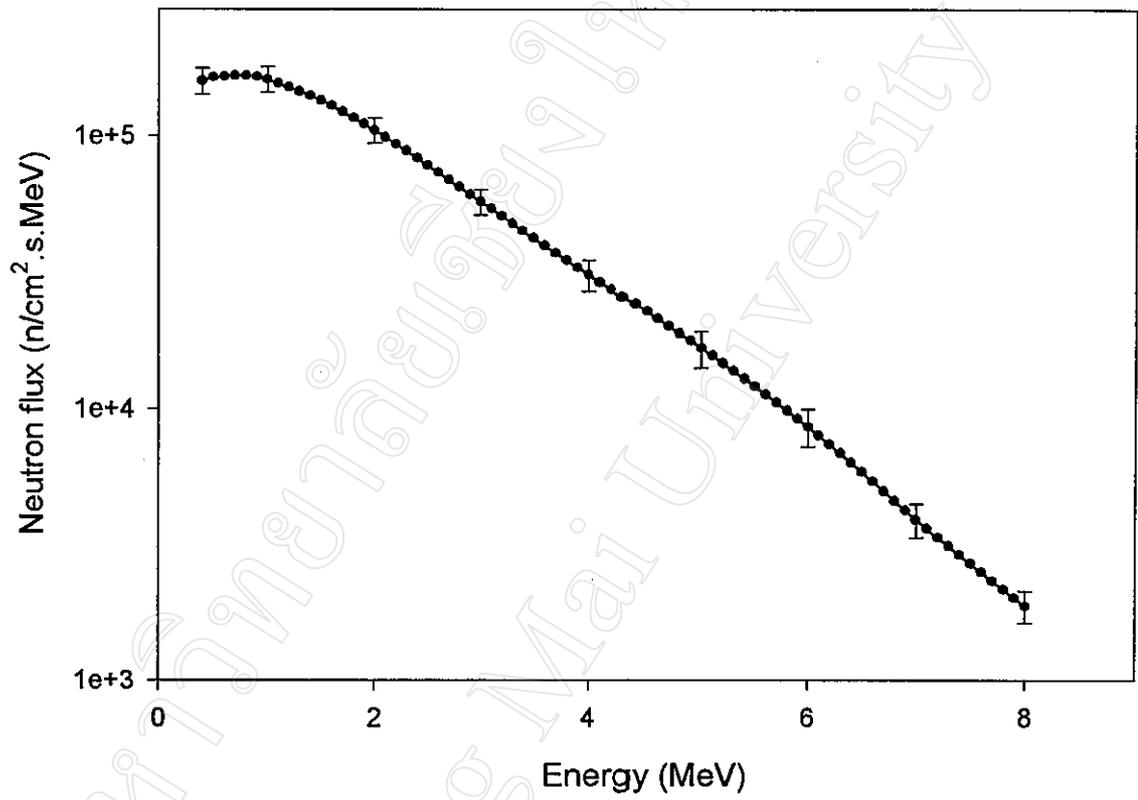
Nuclear reaction	$E_\gamma$ (MeV)	Photo Peak area (counts)	$T_c$ (min)	$T_d$ (min)	Mass (g)	Measured activity (dis/sec)	Error (%) of measured activity	Calculated activity (dis/sec)	E/C ratio
$^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$	0.335	3693±11.5	100	366	2.39	8.53E-21	11.46	8.55E-21	0.99
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	0.81	1935±11.3	150	1773	2.68	5.02E-21	11.21	5.04E-21	0.99
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	0.835	1009±18.1	4333	14890	2.54	4.30E-21	18.18	3.83E-21	1.12
$^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$	0.889	370±18.2	5434	7392	1.45	4.61E-22	18.20	5.21E-22	0.85
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	1.369	299±17.8	1083	482	0.85	4.90E-23	17.72	4.69E-23	1.05



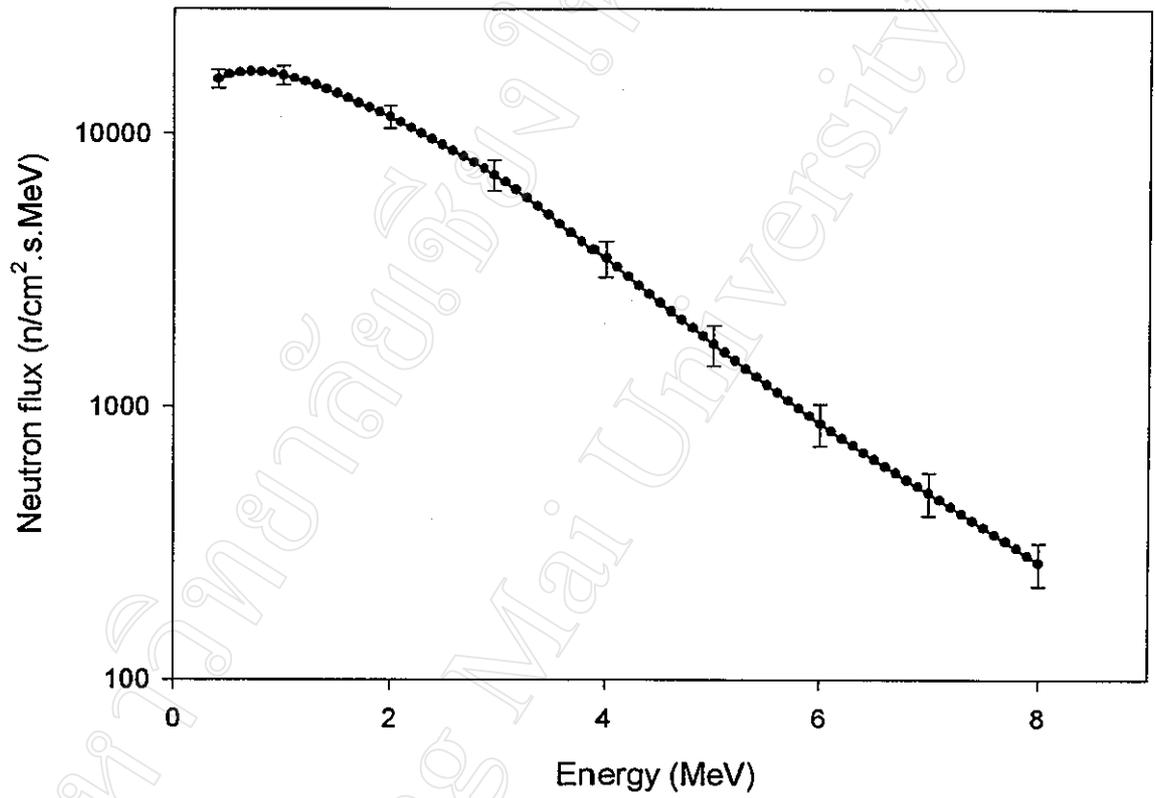
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจาก  $^{252}\text{Cf}$  ในตัวกลางอากาศ  
ห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 2.9 เซนติเมตร



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจาก  $^{252}\text{Cf}$  ในตัวกลางน้ำ  
ห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 2.9 เซนติเมตร



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจาก  $^{252}\text{Cf}$  ในตัวกลางน้ำ  
ห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 5 เซนติเมตร

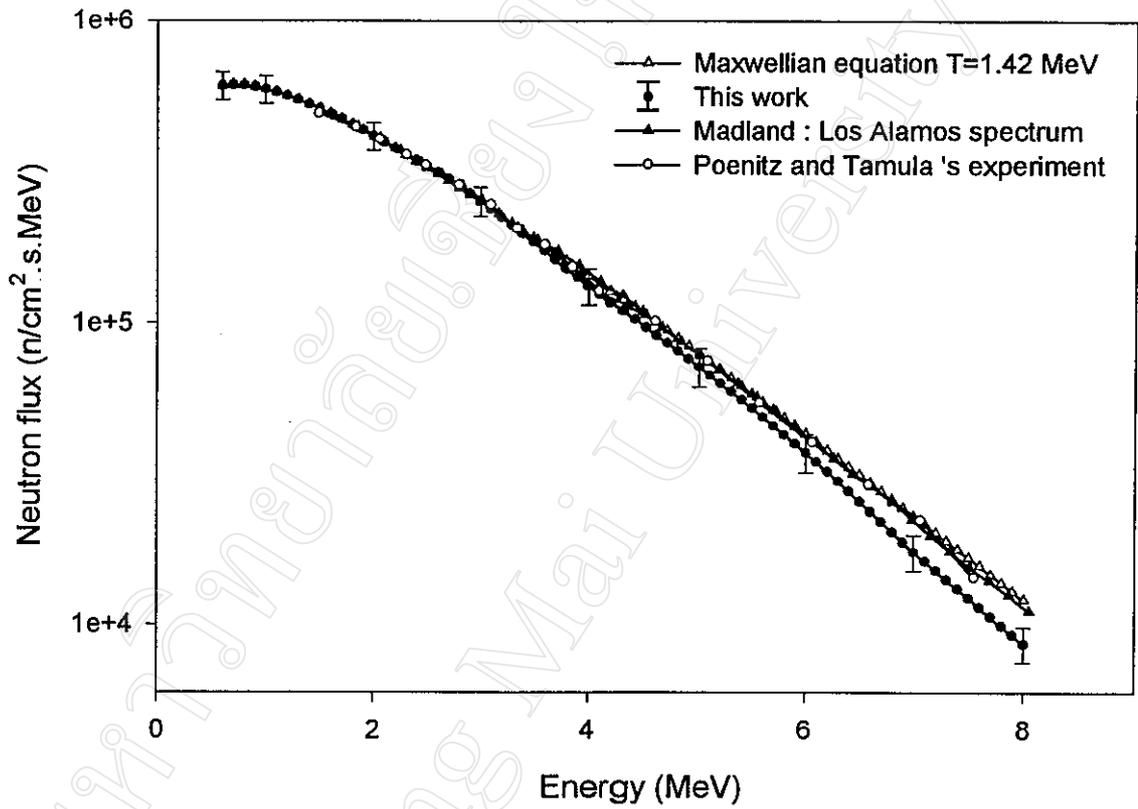


รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจาก <sup>252</sup>Cf ในตัวกลางน้ำ  
ห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 10.5 เซนติเมตร

## 4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองหาสเปกตรัมของ $^{252}\text{Cf}$

### 4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองหาสเปกตรัมของ $^{252}\text{Cf}$ ในอากาศ

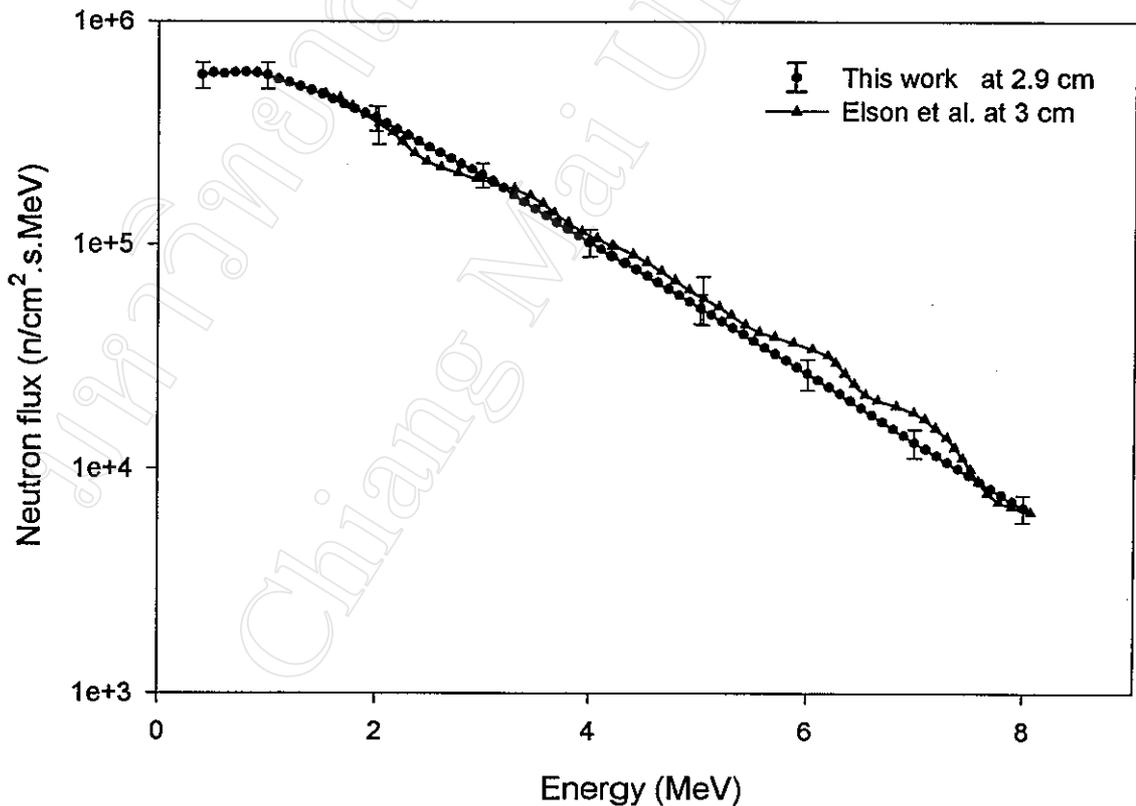
ทำการเปรียบเทียบสเปกตรัม ที่ได้จากการทดลองหาสเปกตรัม ของนิวตรอน จาก  $^{252}\text{Cf}$  โดยใช้เทคนิคการก่อกัมมันต์ในแผ่นโลหะ เทียบกับสเปกตรัมของ Maxwellian ที่ค่า Maxwellian temperature 1.42 MeV และยังเปรียบเทียบกับผลการคำนวณแบบ least square adjustment กับผลการทดลองของ Poenitz และคณะ (1983) โดย Madland และ คณะ (1985) ซึ่งใช้สเปกตรัมเริ่มแรกแบบ Los Alamos (Madland et al., 1985) และใช้ข้อมูลค่า cross section ในเพิ่มข้อมูล ENDF/B-V แสดงผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.4 พบว่าผลการทดลองค่อนข้างมีความสอดคล้องกับสเปกตรัมของ Maxwellian ที่ Maxwellian temperature 1.42 MeV และสอดคล้องกับสเปกตรัมของ Madland และคณะ ที่ใช้สเปกตรัมเริ่มแรกในการคำนวณแบบ Los Alamos ในช่วงพลังงาน 0.6 ถึง 6 MeV



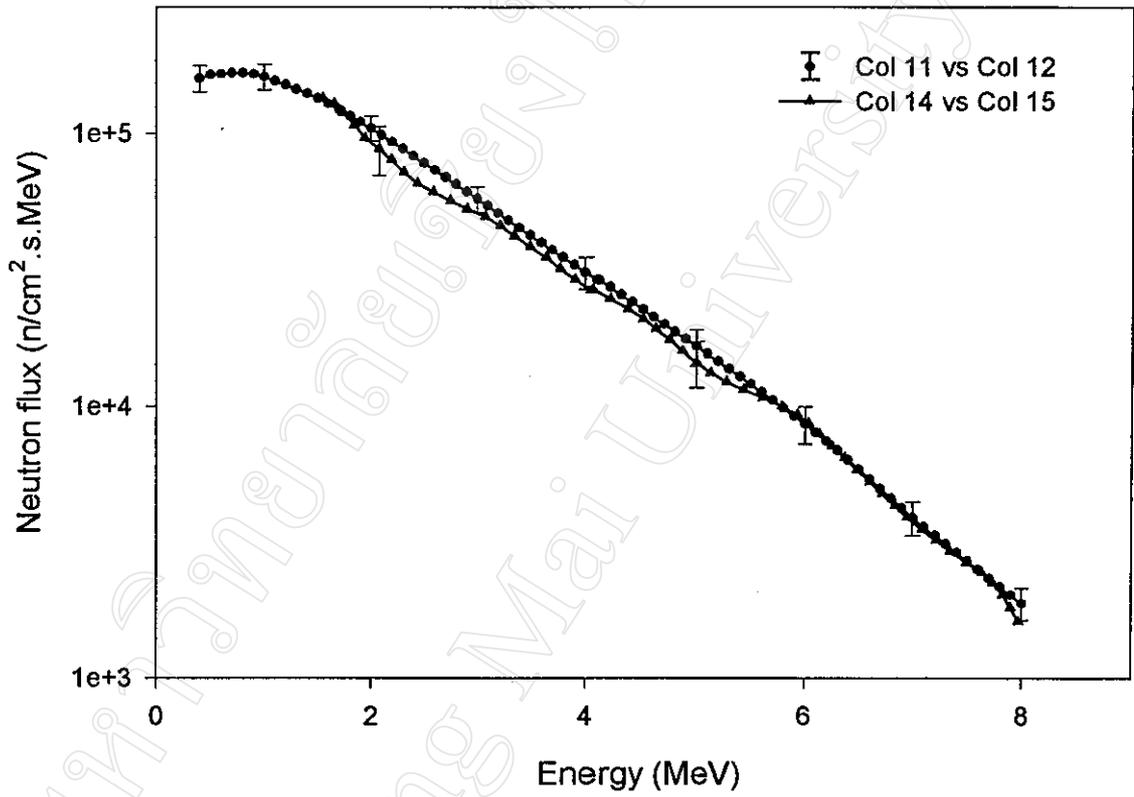
รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของ  $^{252}\text{Cf}$  ในอากาศ  
 ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 2.9 เซนติเมตร  
 ทำการ normalized ที่รังสีนิวตรอนพลังงาน 1.5 MeV

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองหาสเปกตรัมของ $^{252}\text{Cf}$ ในน้ำ

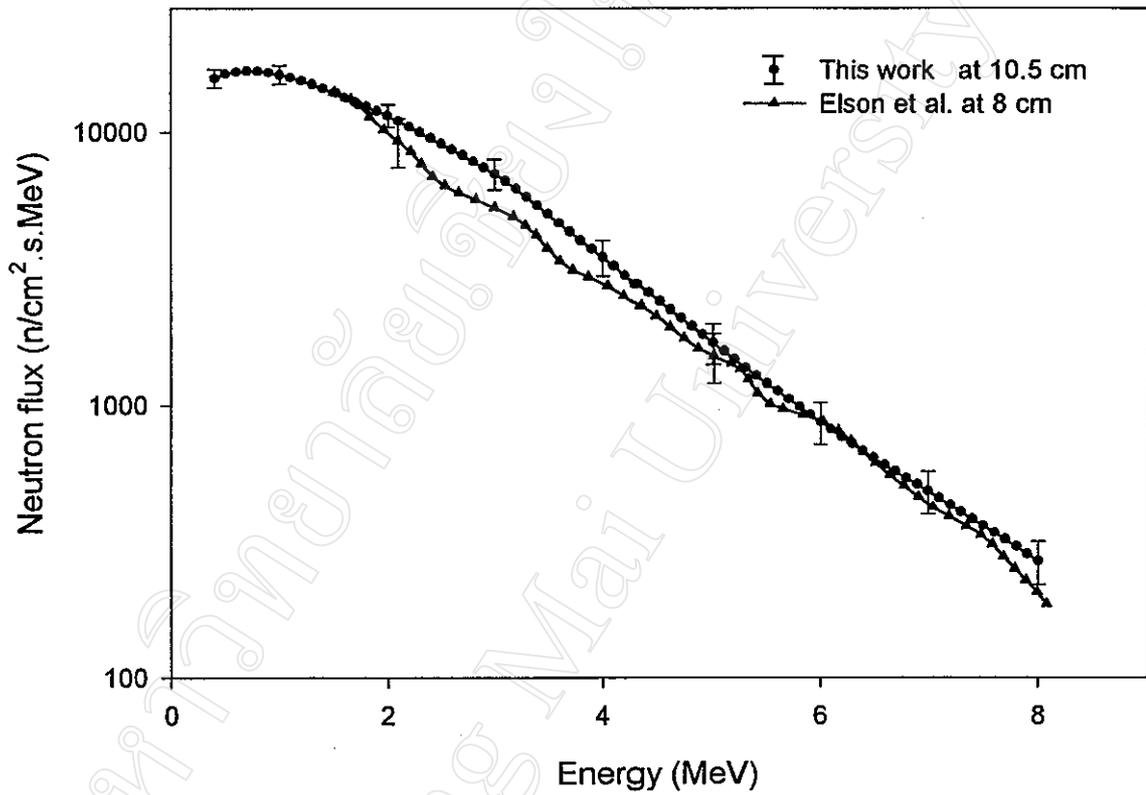
(ก) ในการวิเคราะห์ผลการทดลองหาสเปกตรัมของ  $^{252}\text{Cf}$  ในน้ำที่ระยะทางต่าง ๆ ห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนได้ทำการพลอตกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับ ผลการทดลองวัดสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจาก  $^{252}\text{Cf}$  ใน tissue equivalent ที่ระยะทางต่าง ๆ ของ Elson และคณะ (1979) ซึ่งทำการทดลองวัดสเปกตรัมของรังสีนิวตรอน โดยใช้หัววัด liquid scintillation ชนิด NE-213 ขนาด  $\frac{1}{2}$  นิ้ว ในตัวกลาง tissue equivalent ขนาด 60 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีปริมาณ ไฮโดรเจน 9.8 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอน 15 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน 71.6 เปอร์เซ็นต์ และ ไนโตรเจน 3.6 เปอร์เซ็นต์ ได้กราฟแสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.7 , 4.8 , 4.9 พบว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกันดี



รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของ  $^{252}\text{Cf}$  ในน้ำ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 2.9 เซนติเมตร ทำการ normalized ที่รังสีนิวตรอนพลังงาน 1.5 MeV

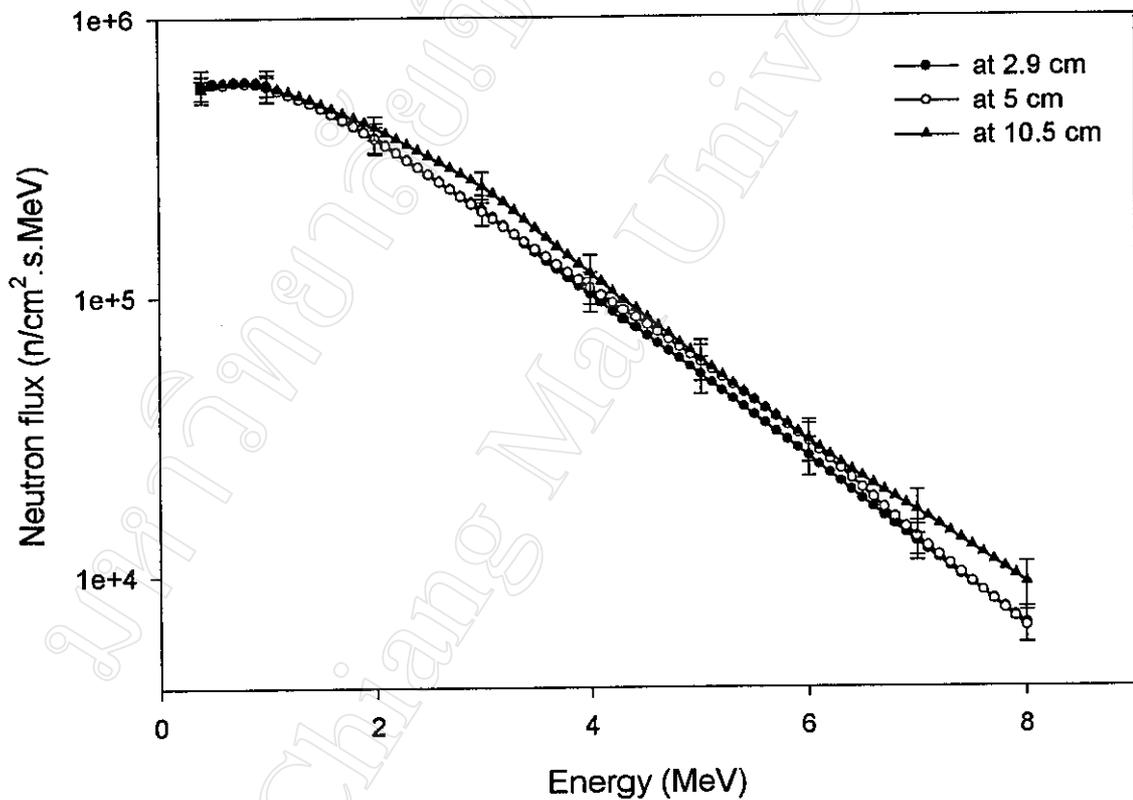


รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของ  $^{252}\text{Cf}$  ในน้ำ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 5 เซนติเมตร ทำการ normalized ที่รังสีนิวตรอนพลังงาน 1.5 MeV

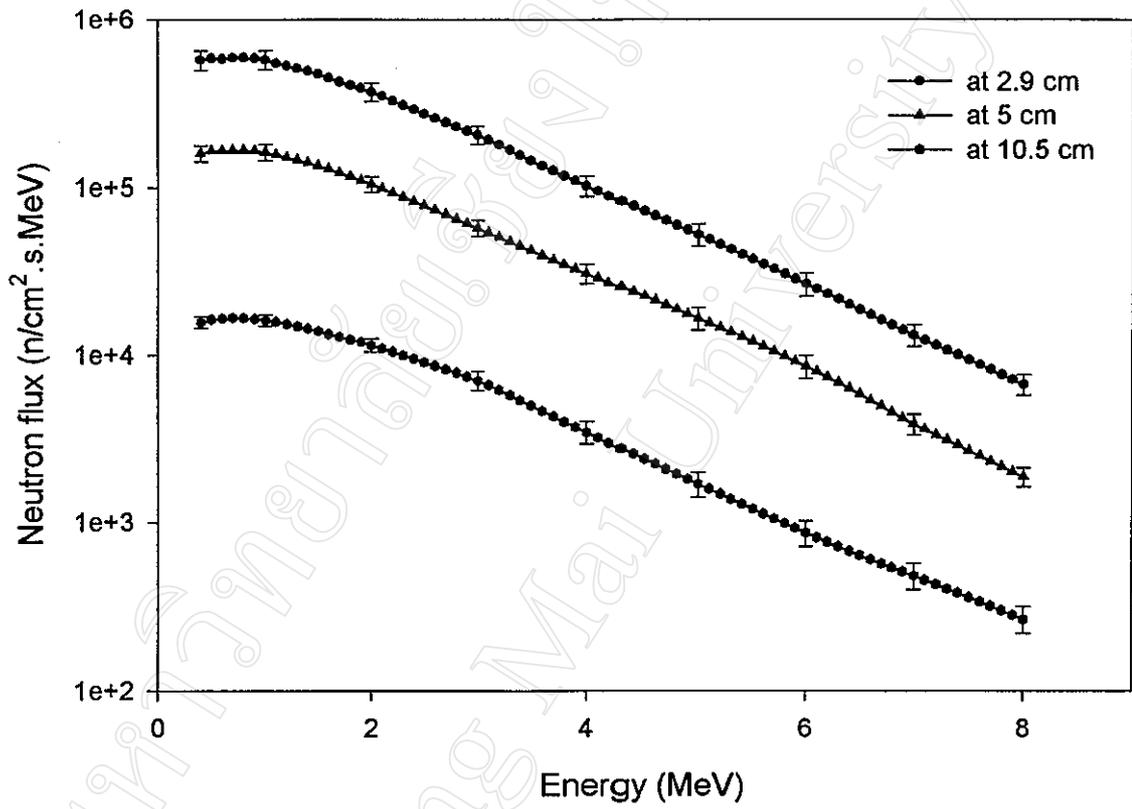


รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของ  $^{252}\text{Cf}$  ในน้ำ ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน 10.5 เซนติเมตร ทำการ normalized ที่รังสีนิวตรอนพลังงาน 1.5 MeV

(จ) ทำการเปรียบเทียบ สเปกตรัมของนิวตรอนจาก  $^{252}\text{Cf}$  ที่ระยะทางต่าง ๆ ในตัวกลางน้ำ พบว่ารังสีนิวตรอนพลังงานต่ำ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเนื่องจากรังสีนิวตรอนเกิดการชนกันกับอะตอมของไฮโดรเจนทำให้นิวตรอนมีพลังงานลดลงดังรูปที่ 4.9 และแสดงสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนในตัวกลางน้ำที่ระยะทางต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของนิวตรอนจาก  $^{252}\text{Cf}$  ในน้ำที่ระยะทาง 2.9, 5 และ 10.5 เซนติเมตร โดยทำการ normalized ที่รังสีนิวตรอนพลังงาน 0.7 MeV



รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมของนิวตรอนจาก  $^{252}\text{Cf}$  ในน้ำ  
ที่ระยะทาง 2.9 , 5 และ 10.5 เซนติเมตร

(ง) ทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนในตัวอย่างน้ำที่ระยะห่างจาก  $^{252}\text{Cf}$  2.9 และ 10 เซนติเมตร กับผลการทดลองวัด neutron dose ของ Wanwilairat และ คณะ(2000) ซึ่งมีค่าที่สอดคล้องกับผลการทดลองของ Yanch และคณะ (1992) ในตัวอย่างน้ำที่ระยะต่าง ๆ โดยใช้ค่า kerma ของเกลือ (Caswell et al.,1980) ได้ผลรวมของค่าฟลักซ์ของนิวตรอนกับค่า kerma ดังตารางที่ 4.5 แล้วทำการเปรียบเทียบโดยวิธีการ normalization ได้ผลดังตารางที่ 4.6 พบว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.5 แสดงผลรวมของผลคูณของค่าฟลักซ์ของนิวตรอนกับค่า kerma factors

Depth (cm)	Summation of $\Phi \times \text{kerma factors}$
2.9	0.442E-08
5	0.122E-08
10.5	0.133E-09

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองกับปริมาณ dose ที่ระยะทางต่าง ๆ ทำการ normalized ที่ 2.9 เซนติเมตร

ชื่อผู้ทดลอง	ปริมาณ dose ที่ระยะห่างจาก $^{252}\text{Cf}$				
	2.9 cm	3 cm	5 cm	10 cm	10.5 cm
Yanch		0.210	0.066	0.01	
Wanwilairat	0.232	0.215	0.065	0.01	0.0086
This work			0.064		0.0070